



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ  
ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ**

**Ιωάννης Παπατσούτσος**

**ΑΘΗΝΑ**  
**ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2015**

**Επιβλέπων:** Δημήτριος Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ  
**Συνεπιβλέπων:** Σίμων-Μιχαήλ Παπαλεξίου, Δρ. ΕΜΠ



## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

### ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Ιωάννης Παπατσούτσος

Αθήνα, Νοέμβριος 2015



Ο μηχανικός εμπνευσμένος από το νόμο της Οικονομίας και οδηγημένος από τον υπολογισμό, μας φέρνει σε συμφωνία με τους νόμους του σύμπαντος.

Αγγίζει την αρμονία.

Charles-Éduard Jeanneret -Gris (Le Corbusier)

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία και ταυτόχρονα τις σπουδές μου κλείνει ένα μεγάλο κομμάτι της ζωής μου το οποίο δε θα ολοκληρωνόταν χωρίς τους σημαντικούς ανθρώπους που είχα δίπλα μου.

Θα ήθελα αρχικά να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή Δημήτρη Κουτσογιάννη για την ανάθεση και επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και για το διδακτικό του έργο και την αγάπη που μου μετέφερε για το αντικείμενο του Υδραυλικού μηχανικού σε προπτυχιακό επίπεδο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Δρ. Σίμων-Μιχαήλ Παπαλεξίου ο οποίος μου πρόσφερε απλόχερα τις γνώσεις του και τη βοήθειά του και συνείσφερε σημαντικά στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Χωρίς τη διάθεσή του και την έμπνευσή του δε θα είχα φτάσει σε αυτό το αποτέλεσμα. Με έμαθε να δουλεύω επαγγελματικά και μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ με τους καλύτερους. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερω για αυτή τη συνεργασία και βοήθεια.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τα φίλη μου Χριστίνα που ήταν δίπλα μου σε όλη αυτή την πορεία.

Δε θα μπορούσα να ξεχάσω τους γονείς μου Γιώργο και Βασιλική και τα αδέρφια μου Στάθη και Παναγιώτη που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και ήταν δίπλα μου με όλους τους δυνατούς τρόπους, καθώς και όλα όσα μου έχουν προσφέρει μέχρι τώρα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον παππού μου Γιάννη και τη γιαγιά μου Ηλέκτρα οι οποίοι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη ζωή μου και συνέβαλαν στη διαμόρφωση του χαρακτήρα μου.

Παπατσούτσος Ιωάννης

Αθήνα, Νοέμβριος 2015

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Ο άνεμος αποτελεί μια τυχαία μεταβλητή η οποία είναι δύσκολο να προβλεφθεί, είναι επικίνδυνη για τις κατασκευές και ευθύνεται για καταστροφές μεγάλου οικονομικού κόστους. Σε πολλούς πλέον κώδικες κατασκευών έχει ενταχθεί η διαστασιολόγηση των κατασκευών έναντι των ισχυρών ανέμων και ιδιαίτερα σε κτίρια μεγάλου ύψους (ουρανοξύστες). Ένα σοβαρό πρόβλημα είναι ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να εκτιμηθούν με αξιοπιστία οι πιθανότητες των ακραίων τιμών του ανέμου που είναι και πιο καταστροφικοί. Απαραίτητη ακόμη είναι η μοντελοποίηση του ανέμου για τη σωστή πρόβλεψη ακραίων τιμών της ταχύτητάς του που θα χρησιμοποιηθούν στην πρόληψη και την προστασία των ανθρώπων από ακραίους ανέμους, στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και στην παρακολούθηση του κλίματος για τυχόν αλλαγές του. Επομένως είναι απαραίτητη η πιθανοτική μελέτη της ταχύτητας του ανέμου ώστε σε κάθε μέγεθος να μπορεί να αντιστοιχηθεί μία πιθανότητα υπέρβασης ή πιθανότητα μη υπέρβασης. Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου έχουν μελετηθεί εκτενώς κυρίως στον κατασκευαστικό τομέα μέσω της εφαρμογής της κλασσικής Θεωρίας των Ακραίων Τιμών και έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές διαφορετικές κατανομές για την έκφρασή τους. Στην παρούσα διπλωματική μελέτη γίνεται απευθείας προσαρμογή τριών θεωρητικών κατανομών, διαφορετικού βάρους ουράς, σε τέσσερα δείγματα ακραίων τιμών ταχύτητας του ανέμου που προέκυψαν από το σύνολο των δεδομένων και το ανώτερο 10%, 5% και 1% των δεδομένων, μέσω μίας νόρμας ελαχιστοποίησης του σφάλματος και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση στο συνολικό σώμα το οποίο είναι και το σύνηθες. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα και γίνεται εποχιακά αλλά και στο σύνολο των μηνών. Με αυτή τη μέθοδο γίνεται προσπάθεια να προκύψει η κατανομή που εκφράζει καλύτερα τα ακραία φαινόμενα της ταχύτητας του ανέμου. Οι κατανομές που προσαρμόζονται στα τέσσερα δείγματα είναι η Pareto II με ουρά τύπου δύναμης, η Λογαριθμοκανονική με ενδιάμεση ουρά και η Weibull με εκθετική ουρά.

# ABSTRACT

---

Wind is a random variable that is hard to predict and can prove out to be devastating for constructions leading to great financial losses. In the Codes of Practice of many countries the design of wind loads is obligatory in regions with high winds and is especially necessary for high-rise constructions (skyscrapers). It is also necessary to create wind prediction models that could facilitate the introduction of citizen protection plans in cases of extreme phenomena, the utilisation of wind power for electricity and keep track of climate change. Consequently, the probabilistic study of the wind speed, in order to define a certain return period constitutes a necessity nowadays. The extreme wind speed has been widely studied especially in the structural engineering area through the classical Extreme Value Theory. Many different probability distributions have been used for the modelling of extreme wind speed. In this thesis, three theoretical probability distributions, with different tail magnitude are directly adjusted to four different tail empirical samples of wind speed data. For this purpose a norm of square error is minimized, and then a comparison of the whole body is conducted. The analysis is global and is concerned both seasonal and in the total of the months. In this way the distribution that best describes the extreme wind speed is tried to be exported. The three theoretical distributions that are fitted are Pareto II with a power type tail, Log-Normal with middle heaviness of tail and Weibull with exponential type tail.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b>	<b>i</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iii</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	<b>iv</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ	1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
<b>2 ΠΕΡΙ ΑΝΕΜΩΝ</b>	<b>3</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	3
2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΥ	13
2.2.1 ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΑ ΠΙΕΣΗΣ	14
2.2.2 ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΙΠΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ (GUST-MEASURING ANEMOMETERS)	18
2.3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΧΡΗΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	23
2.4 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΥ	24
2.4.1 ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ	24
2.4.2 ΤΟΠΙΚΕΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ	29
2.5 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	32
2.6 ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ	37
2.6.1 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ ΑΠΟ ΑΚΡΑΙΟΥΣ ΑΝΕΜΟΥΣ	38
2.7 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ	48
2.8 ΆΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	52
<b>3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ (EXTREME VALUE THEORY)</b>	<b>56</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ	58
3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ	60
3.3 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ	62



3.4	ΠΕΔΙΑ ΕΛΞΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ	64
3.4.1	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΛΞΗΣ ΤΗΣ $\Phi_A$ (FRECHET)	65
3.4.2	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΛΞΗΣ ΤΗΣ WEIBULL	66
3.4.3	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΛΞΗΣ ΤΗΣ GUMBEL	66
3.5	ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ PARETO	66
3.6	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΒΑΣΕΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΟΥΡΑΣ	68
3.6.1	ΓΕΝΙΚΑ	68
3.6.2	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΚΑΤΑ WERNER ΚΑΙ UPPER	68
3.6.3	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΚΑΤΑ EMBRECHTS ET AL.	70
3.6.4	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΒΑΣΕΙ OUARDA ET AL.	71
<b>4</b>	<b>ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ</b>	<b>75</b>
4.1	ΚΑΤΑΝΟΜΗ PARETO ΤΥΠΟΥ II	75
4.2	ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	76
4.3	ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL	77
<b>5</b>	<b>ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΟΥΡΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ</b>	<b>79</b>
5.1	ΟΥΡΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ	79
5.2	ΟΥΡΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ PARETO ΤΥΠΟΥ II	79
5.3	ΟΥΡΑ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ	80
5.4	ΟΥΡΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ WEIBULL	81
<b>6</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΑΝΕΜΩΝ - ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙ</b>	<b>83</b>
<b>7</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	<b>89</b>
7.1	ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	89
7.2	ΑΡΧΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	93
7.3	ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	94
7.4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	95
7.5	ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ	96
7.6	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	96
7.7	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	97
7.7.1	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	118

7.7.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ	128
<b>8 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>132</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>136</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	<b>144</b>

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η στατιστική επεξεργασία και μελέτη των ακραίων τιμών της μέσης ταχύτητας του ανέμου. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα και αφορά τη μέση ταχύτητα 2 λεπτών του ανέμου. Η στατιστική ανάλυση περιλαμβάνει αρχικά την εξαγωγή τεσσάρων δειγμάτων με δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου σε εποχιακή κλίμακα και στο σύνολο όλων των μηνών μαζί. Τα δείγματα εξάγονται στο συνεχές μέρος της ταχύτητας και αφορούν ακραίες τιμές της ουράς της ταχύτητας του ανέμου. Στη συνέχεια γίνεται η απευθείας προσαρμογή των τεσσάρων δειγμάτων σε τρεις γνωστές και ευρέως διαδεδομένες θεωρητικές κατανομές μέσω μίας νόρμας ελαχιστοποίησης του σφάλματος. Παράλληλα γίνεται η εξαγωγή των παραμέτρων κλίμακας και σχήματος των τριών κατανομών για τα εμπειρικά δεδομένα για κάθε μήνα και για το σύνολο όλων των μηνών μαζί. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται αρχικά με βάση τη μέση βαθμονόμηση της κάθε κατανομής για κάθε μήνα ξεχωριστά αλλά και για το σύνολο των μηνών μαζί, αλλά και της μέσης τιμής της βαθμονόμησης των μηνών και του συνόλου για τα τέσσερα δείγματα. Πραγματοποιούνται επίσης συγκρίσεις των κατανομών ανά δύο και ανά τρεις ανάλογα με το ποσοστό επί τοις εκατό εφαρμογής της κάθε κατανομής και εξάγονται θηκογράμματα και άλλα γραμμικά διαγράμματα σύγκρισης. Τέλος, συγκρίνονται οι παράμετροι σχήματος και κλίμακας, οι οποίες καθορίζουν την ουρά μίας κατανομής και επομένως την εμφάνιση ακραίων τιμών, με την εξαγωγή διαγραμμάτων και θηκογραμμάτων.

## 1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία αποτελείται από οχτώ κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο είναι η εισαγωγή, στην οποία γίνεται αναφορά στο συνολικό περιεχόμενο της διπλωματικής. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους τρόπους δημιουργίας του ανέμου, στα μηχανήματα μέτρησης, στους τύπους ανέμων, στη διερεύνηση μεταβολής του ανέμου σε μία υποτιθέμενη κλιματική αλλαγή, σε καταστροφές λόγω ανέμου, και στη σημασία του ανέμου στη διαστασιολόγηση των κατασκευών. Παρουσιάζονται εν συντομία κάποια βασικά στοιχεία για τη σημασία του ανέμου και της ακριβέστερης μελέτης του.

Στο τρίτο κεφάλαιο για καθαρά βιβλιογραφικούς λόγους και για ολοκληρωμένη παρουσίαση της μελέτης των ακραίων τιμών, αφού δε χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, αναφέρεται η θεωρία των ακραίων τιμών και κάποια βασικά στοιχεία της και τρόποι κατάταξης των διαφόρων κατανομών ανάλογα με το μέγεθος της ουράς τους.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα βασικά στοιχεία των θεωρητικών κατανομών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσαρμογή των εμπειρικών δεδομένων.

Το πέμπτο κεφάλαιο πάλι για λόγους ολοκληρωμένης βιβλιογραφίας παρουσιάζει τα βασικά στοιχεία των ουρών των τριών κατανομών.

Το έκτο κεφάλαιο αφορά προγενέστερες εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στη μελέτη ακραίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου και στην προσπάθεια ακριβέστερων προσαρμογών της ακραίας ταχύτητας του ανέμου σε θεωρητικές κατανομές.

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάλυση και σύγκριση, ενώ το όγδοο τα συμπεράσματα.

Ακολουθούν βιβλιογραφικές αναφορές και το παράρτημα.

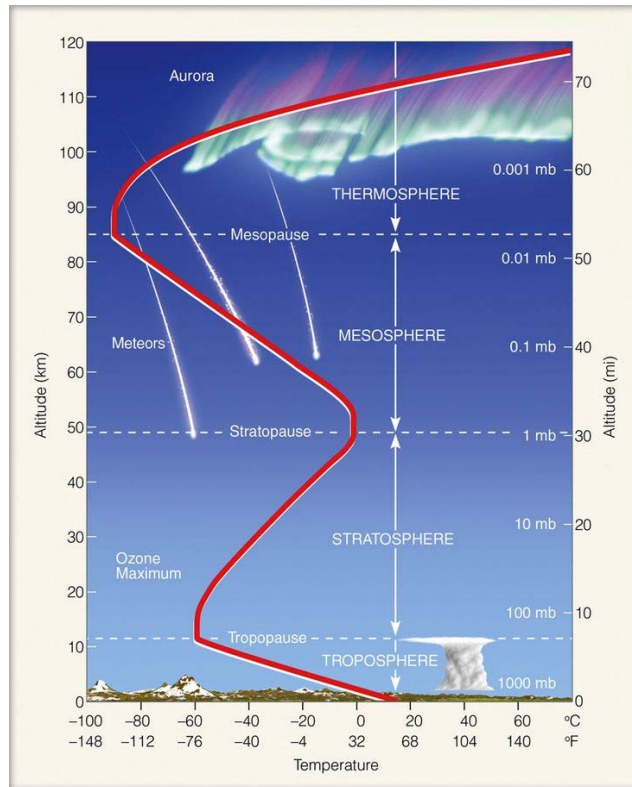
## 2 ΠΕΡΙ ΑΝΕΜΩΝ

---

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος άνεμος συνήθως παραπέμπει στην κίνηση του αέρα που γίνεται οριζόντια και ως εκ τούτου μπορεί να οριστεί σαν η οριζόντια κίνηση του αέρα που περνάει από ένα καθορισμένο σημείο. Ο άνεμος είναι μία κίνηση του ελεύθερου αέρα που προκαλείται, σε μεγάλη κλίμακα, από θερμικά ρεύματα στα πρώτα 16 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης. Στην πραγματικότητα η κίνηση του ανέμου πραγματοποιείται σε τρεις διαστάσεις και σε πολλές κατευθύνσεις, και αποτελείται από οριζόντια και κατακόρυφα συστατικά, αν και το κατακόρυφο στοιχείο είναι συνήθως μικρό και εμφανίζεται σε σημεία με ιδιαίτερη μορφολογία εδάφους ή σε ξαφνικές καταιγίδες. Στο τμήμα της ατμόσφαιρας που είναι γνωστό και ως ονομάζεται τροπόσφαιρα, ο αέρας θερμαίνεται έμμεσα από την ακτινοβολία του ήλιου (Σχήμα 2.1), του οποίου η ενέργεια κατά το 40% βρίσκεται στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Αυτή η ενέργεια απορροφάται από την επιφάνεια της γης, ακτινοβολείται εκ νέου στην τροπόσφαιρα όπου μόνο ο ατμός του νερού που εξατμίζεται και τα συστατικά του διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να την απορροφήσουν.

Ο άνεμος αποτελεί σημαντική κλιματολογική μεταβλητή, η οποία διέπεται από χαοτική συμπεριφορά και επομένως είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως οποιεσδήποτε απειροελάχιστες αλλαγές πραγματοποιηθούν 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 μπορούν να προβλεφθούν ταχύτητες σχεδιασμού για τον άνεμο και να αξιοποιηθεί μέρος της ενέργειας που προκύπτει από αυτόν. Πολύ σημαντικός παράγοντας προβλεψιμότητας της μεταβλητής αποτελεί η έγκαιρη και έγκυρη ενημέρωση, κυρίως για περιοχές που προσβάλλονται συχνά από καταστροφικά φαινόμενα όπως κυκλώνες και τυφώνες. Στις περιπτώσεις αυτές 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 (Δημάκος, 2014).

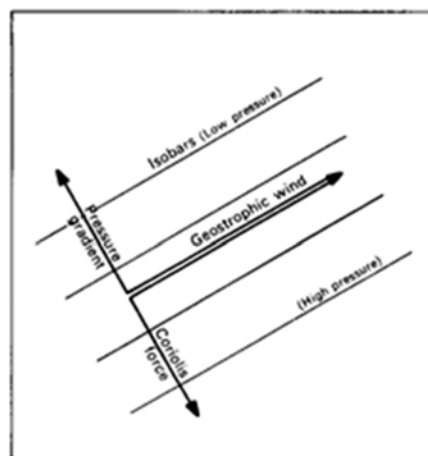


**Σχήμα 2.1.** Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (“Earth Science Reference,” n.d.)

Ο αρχικός παράγοντας επομένως που προκαλεί την κίνηση του ανέμου είναι η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα που βρίσκεται πάνω από τις τροπικές ζώνες και πάνω από τις αντίστοιχες πολικές περιοχές. Ο άνεμος οφείλεται σε διαφορές στην πίεση του αέρα. Η πίεση που είναι υψηλότερη σε ένα σημείο δημιουργεί μία δύναμη ώθησης από την υψηλή στη χαμηλή πίεση. Οι διαφοροποιήσεις σε πίεση ανάμεσα στα διάφορα σημεία συμβαίνει λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα – το θερμότερο μέτωπο είναι ελαφρύτερο από το ψυχρότερο- με αποτέλεσμα να προκαλούνται κινήσεις των αερίων μαζών, με απώτερο στόχο την εξίσωση των θερμοκρασιών αυτών, αφού η φύση επιδιώκει την ισορροπία μέσω της μεγιστοποίησης της εντροπίας. Ουσιαστικά προκαλείται από τη θερμότητα που ακτινοβολείται από τον ήλιο. Ακτινοβολία, θερμοδυναμική, και μηχανικά φαινόμενα μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια που μεταδίδεται στην ατμόσφαιρα σε μηχανική ενέργεια που συνδέεται με την κίνηση του αέρα, προκαλώντας τα διάφορα είδη του ανέμου. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στις πιέσεις, τόσο ισχυρότερη είναι και αυτή η δύναμη. Η απόσταση μεταξύ των περιοχών υψηλής και χαμηλής πίεσης καθορίζει επίσης και το πόσο γρήγορα επιταχύνεται η κίνηση του αέρα. Οι μετεωρολόγοι αναφέρονται στη δύναμη που προκαλεί τη ροή του ανέμου ως δύναμη πίεσης κλίσης. Φυσικά είναι λογικό πως οι έννοιες «υψηλή» και «χαμηλή» πίεση είναι σχετικές και δεν υπάρχουν συγκεκριμένες τιμές που να διαχωρίζουν τις δύο αυτές έννοιες. Ο άνεμος χρησιμοποιείται για να περιγράψει

την επικρατούσα κατεύθυνση από την οποία φυσάει ο αέρας και με ταχύτητα η οποία δίνεται σε μίλια/ώρα (miles per hour), κόμβους (knots) ή μέτρα/δευτερόλεπτο (m/sec). Οι τροπικές ζώνες που θεωρούνται ζεστές περιοχές έχουν πάνω τους μία ζεστή στήλη αέρα και οι πολικές περιοχές θα έχουν πάνω τους μία έντονα κρύα στήλη αέρα. Οι τροπικές ζώνες που θεωρούνται ζεστές περιοχές έχουν πάνω τους μία ζεστή στήλη αέρα και οι πολικές περιοχές θα έχουν πάνω τους μία έντονα κρύα στήλη αέρα. Σε ένα δεδομένο ύψος η πίεση στην κρύα στήλη ( $p_2$ ) θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της ζεστής στήλης ( $p_1$ ) και έτσι ο αέρας θα ρέει από την περιοχή υψηλής πίεσης στην περιοχή χαμηλής. Πρέπει να υπάρχει μία συνέχεια στη ροή και αυτό δημιουργεί τη βασική κυκλοφορία. Το εξιδανικευμένο κυκλικό αυτό κύκλωμα δημιουργεί το βασικό καιρικό μοτίβο και σε οριζόντιο και σε κατακόρυφο επίπεδο. Αυτή η θεώρηση οδηγεί σε μία γενική κυκλοφορία του αέρα από τις πολικές περιοχές στις τροπικές.

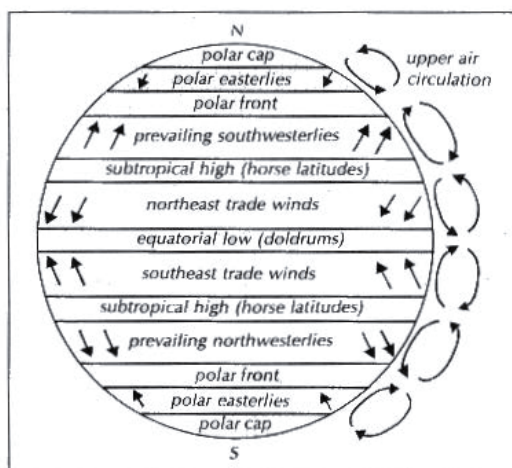
Ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας που είναι υπεύθυνος για την κίνηση του αέρα σε μεγάλη κλίμακα είναι η περιστροφή της γης, η οποία δημιουργεί δύο αποτελέσματα. Αρχικά η περιστροφή της γης επιταχύνει κάθε σωματίδιο του αέρα. Είναι σύνηθες να περιγράφεται αυτό το φαινόμενο από την αντίστοιχη αποκλίνουσα δύναμη, που ονομάζεται δύναμη Coriolis, η οποία κινεί το σωματίδιο του αέρα προς τα δεξιά της κατεύθυνσης της κίνησής του, στο Βόρειο ημισφαίριο και προς τα αριστερά της κίνησής του στο Νότιο ημισφαίριο. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη με τη γωνιακή ταχύτητα της γης γύρω από τον άξονά της, το ημίτονο του γεωγραφικού πλάτους, και την ταχύτητα των σωματιδίων του αέρα. Όταν η κίνηση του αέρα φτάνει σε μία σταθερή κατάσταση, η δύναμη Coriolis εξισορροπεί την πίεση της κλίσης δύναμης, αφήνοντας μία συνισταμένη κίνηση περίπου κατά μήκος των γραμμών ίσης πίεσης, ή ισοβαρείς, που ονομάζεται γεωστροφικός άνεμος (Σχήμα 2.2). Αυτή η θεωρία είναι κοντά στην πραγματική κίνηση του αέρα σε ύψος από 600 μέτρα και πάνω από την επιφάνεια της γης.



**Σχήμα 2.2.** Η γεωστροφική ισορροπία (Βόρειο Ημισφαίριο) (Sachs, 1978)

Η δεύτερη επίδραση της περιστροφής της γης γίνεται εμφανής στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Με τη δύναμη της περιστροφής, κάθε σωματίδιο του αέρα στην ατμόσφαιρα έχει μία στροφορμή με κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Καθώς ένα σωματίδιο κινείται προς τους πόλους (παραμένοντας προσεγγιστικά στο ίδιο ύψος από την επιφάνεια της γης) η ακτίνα περιστροφής του θα μειωθεί, και υπό το σκεπτικό της διατήρησης της γωνιακής στροφορμής, η συνιστώσα της ταχύτητάς του στην κατεύθυνση Δύση-Ανατολή θα αυξηθεί αντίστοιχα. Αυτή η επίδραση είναι μικρή κοντά στον ισημερινό, δεδομένου του ότι θα υπάρξει μικρή αλλαγή στην ακτίνα περιστροφής. Στις εύκρατες ζώνες αυτός είναι ο λόγος για τα Westerlies, τα οποία είναι σε αντίθετη κατεύθυνση από τη γενική ροή του αέρα και στα δύο ημισφαίρια.

Το γενικά πρότυπα του ανέμου και της πίεσης φαίνονται στο Σχήμα 2.3.



**Σχήμα 2.3.** Κατανομή αέρα και πίεσης (“Weather 2011,” n.d.)

Τα Doldrums (equatorial low) είναι περιοχές με λίγο ή καθόλου άνεμο, και οι υποτροπικές ζώνες υψηλής πίεσης (sub-tropical high pressure belts) είναι επίσης περιοχές με ελαφρούς ή μεταβλητούς ανέμους. Ανάμεσα βρίσκονται οι άνεμοι Trades, οι οποίοι είναι σταθεροί και μεσαίας ή χαμηλής ταχύτητας. Οι Westerlies και τα υπο-πολικά χαμηλά είναι περιοχές με πολύ διαταραγμένο καιρό, με βαρομετρικά χαμηλά και αντικυκλώνες. Αυτά δημιουργούνται βασικά από τη συνάντηση ζεστών και κρύων ρευμάτων αέρα. Το ψυχρό μέτωπο αποτελείται από μία φέτα κρύου αέρα που αναγκάζεται να κινηθεί κάτω από τα στρώματα του θερμού αέρα, ο οποίος με τη σειρά του ωθείται πίσω στον κρύο αέρα με ένα κυκλοφοριακό τρόπο. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για αρκετές ημέρες έως ότου το ψυχρό μέτωπο πιάνει το αντίστοιχο ζεστό και το βαρομετρικό χαμηλό διαλύεται σε μία ενιαία μάζα κυκλοφορίας κρύου αέρα. Ένα ιδανικό βαρομετρικό χαμηλό έχει μία ζώνη από βροχή ή χιόνι γύρω από το θερμό αέρα. Η ύφεση (depression) επιβάλλεται από τη γενική ροή του αέρα, η



οποία είναι προς τη κατεύθυνση του θερμού ρεύματος του αέρα. Σε μία depression, όπου ο κρύος αέρας ωθείται σε λιγότερο θερμό αέρα, το κέντρο είναι σε χαμηλή πίεση και οι εξωτερικοί άνεμοι είναι υψηλής πίεσης. Οι πιέσεις κυμαίνονται γύρω στα 1000 μιλίμπαρ ή τη μία ατμόσφαιρα και η μέγιστη διαφορική πίεση σε μία ύφεση είναι της τάξης των 50 μιλίμπαρ. Η ταχύτητα του ανέμου μεταξύ οποιωνδήποτε δύο ισοβαρών είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την απόσταση μεταξύ τους, ή με την κλίση πίεσης, και αυτός ο γεωστροφικός άνεμος υπολογίζεται από:

Γεωστροφικός Άνεμος = κλίση πίεσης /  $2\rho\omega\beta \sin \varphi$  ( $\varphi > 10^\circ$ ),

(Geostrophic wind = pressure gradient /  $2\rho\omega\beta \sin \varphi$  ( $\varphi > 10^\circ$ ))

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα,  $\omega\beta$  είναι γωνιακή ταχύτητα της Γης γύρω από τον άξονά της, και  $\varphi$  είναι η γωνία του γεωγραφικού πλάτους. Η γεωστροφική ταχύτητα του ανέμου έχει τροποποιηθεί από την εσωτερική επιτάχυνση του κυκλοφορούντος αέρα, και σε μια ύφεση μειώνεται η ταχύτητα για να δώσει την κλίση του ανέμου.

Όσον αφορά ακόμα τους ανέμους των πάνω στρωμάτων του αέρα υπάρχουν ακόμα κάποια φαινόμενα που πρέπει να αναφερθούν. Σε ύψη μεταξύ 25.000 και 40.000 πόδια, μπορεί να σχηματιστεί ένα σωληνοειδές ρεύμα αέρα με μεγάλες ταχύτητες ανέμου, που ονομάζεται jet stream (ρεύμα jet). Αν και αυτό έχει μεγάλη σημασία για τα αεροσκάφη, έχει μόνο δευτερεύουσα επίδραση στις καιρικές συνθήκες κοντά στην επιφάνεια. Πειράματα στο επίπεδο των 300 millibars (30.000 πόδια) στη αεροπορική διαδρομή Νέας Υόρκης- Σαν Φρανσίσκο, έδειξαν ταχύτητες άνω των 200 κόμβων και έχουν παρατηρηθεί μέσες μηνιαίες ταχύτητες 80 κόμβων. Άλλα φαινόμενα υψηλής ταχύτητας που εμφανίζονται κοντά στην επιφάνεια της γης είναι ο ανεμοστρόβιλος, οι τυφώνες, οι τροπικές καταιγίδες. Αυτή η κίνηση του ανέμου στα ανώτερα στρώματα δείχνει την κίνηση του αέρα, ο οποίος καθορίζει τις μεγάλης κλίμακας μετακινήσεις του ανέμου στην επιφάνεια της γης. Πιο κοντά στο έδαφος ο άνεμος επιβραδύνεται από εμπόδια μικρής κλίμακας (φράχτες) ή μεγαλύτερης κλίμακας (βουνά) έτσι ώστε η ταχύτητα στην επιφάνεια είναι ουσιαστικά μηδέν. Αυτό το μηδενικής ταχύτητας στρώμα αέρα καθυστερεί την παραπάνω στρώση και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ο αέρας φθάνει στα άνω στρώματα, ή κλίση ταχύτητας. Αυτά τα στρώματα αργού αέρα προσδιορίζουν τη μέση ταχύτητα, για ένα σύντομο χρονικό διάστημα (περίπου μία ώρα), αν και είναι σπάνιο για αυτή τη μέση ταχύτητα να είναι η πραγματική ταχύτητα για πάνω από μερικά δευτερόλεπτα, επειδή έχει τροποποιηθεί από μία δευτερεύουσα επίδραση τριβής, που ονομάζεται δίνη (eddy). Οι δίνες (eddies) δημιουργούνται στον αέρα, όταν η ροή του αέρα συναντά μία απότομη ασυνέχεια στην επιφάνεια της γης, όπως δένδρα, κτίρια, βουνά. Υπάρχουν ελάχιστες φυσικές ή ανθρωπογενή αντικείμενα που δεν προκαλούν δίνη, μερικές αξιοσημείωτες εξαιρέσεις είναι η ήρεμη θάλασσα ή ένα αεροσκάφος υψηλής ταχύτητας. Οι επιφάνειες που δεν προκαλούν

τη δημιουργία δινών ονομάζονται αεροδυναμικές (aerodynamic) και σχήματα τα οποία δημιουργούν λιγότερες δίνες από άλλα ονομάζονται ήμι-αεροδυναμικά. Όλα τα άλλα σχήματα ονομάζονται μη αεροδυναμικά ή bluff (χονδρά). Οι δίνες ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις, και όταν υπερθέτονται πάνω από τη μέση ροή του αέρα, προκαλούν μεταβλητούς ανέμους, φαινόμενο το οποίο είναι σύνηθες στα εύκρατα κλίματα. Όταν η ταχύτητα του ανέμου φθάνει σε ένα μέγιστο, αυτό ονομάζεται ριπή (gust) και η ελάχιστη ταχύτητα ορίζεται ως ανάπαυλα - νηνεμία (lull). Δεν υπάρχει τρόπος πρόβλεψης αυτών των εναλλαγών, ακόμα και με την ύπαρξη δεδομένων αρκετών χρόνων. Παρατηρούνται ορισμένες τάσεις, όπως η αλλαγή της κατεύθυνσης έως 30° στην έναρξη της ριπής και η γρήγορη αύξηση της ταχύτητας του ανέμου η οποία είναι ανάλογη με την αιχμή του τετραγώνου ηλεκτρικού κύματος. Ποιοτικά ωστόσο οι διακυμάνσεις του ανέμου σε σύντομο χρονικό διάστημα (για παράδειγμα 1 ώρα) είναι εντελώς τυχαία όσον αφορά τη μέση ταχύτητα για αυτή την περίοδο. Επιπλέον το τυχαίο πρότυπο είναι το ίδιο, σε κάθε στιγμή για κάθε μέτρηση του ανέμου όπου οι συνθήκες παραμένουν ίδιες. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί σημαίνει ότι μελλοντική μέγιστη, ελάχιστη και μέση ταχύτητα μπορεί να προβλεφθεί από βραχυπρόθεσμες μετρήσεις σε πιθανοτική βάση. Επομένως είναι απαραίτητη η στατιστική ανάλυση και επεξεργασία και ερμηνεία δεδομένων του ανέμου για μία πιο ακριβή γνώση των φορτίσεων που προκαλεί ο άνεμος σε κατασκευές.

**Πίνακας 2.1.** Σχέση μεταξύ των διαφόρων μονάδων μέτρησης της ταχύτητας

	<b>knot</b>	<b>m/s</b>	<b>m.p.h.</b>	<b>km/h</b>	<b>ft/s</b>
<b>knot</b>	1	0.515	1.152	1.853	1.689
<b>m/s</b>	1.943	1	2.237	3.600	3.281
<b>m.p.h.</b>	0.868	0.477	1	1.609	1.467
<b>km/h</b>	0.540	0.278	0.621	1	0.911
<b>ft/s</b>	0.592	0.305	0.682	1.097	1

(Left-hand column = factor in body of table x unit in top row)

Εκτός αυτών των μονάδων, μία ακόμα κλίμακα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, η κλίμακα Μποφόρ (Beaufort). Η αντιστοιχία της ταχύτητας ανέμου  $V_{10}$  σε m/s, σε ύψος 10 m, με τον αριθμό Beaufort B, δίνεται από τη σχέση

$$V_{10} = 0.836B^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Κατά συνέπεια αν τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου είναι εκφρασμένα στην κλίμακα Beaufort, τότε η ταχύτητα του ανέμου  $V_2$  σε ύψος 2 m, εκφρασμένη σε m/s, θα δίνεται από τη σχέση

$$V_2 = 0.836 \frac{\ln 2 - \ln z_0}{\ln 10 - \ln z_0} B^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

όπου η παράμετρος τραχύτητας  $z_0$  εκφράζεται σε m (Κουτσογιάννης, 2000).

**Πίνακας 2.2.** Ερμηνεία της κλίμακας Μποφόρ σε ξηρά και θάλασσα.

Μποφόρ	Χαρακτηρισμός ανέμου	Χαρακτηρισμός θάλασσας	Φαινόμενα	
			στην ξηρά	στην θάλασσα
0	Άπνοια (νηνεμία)	Γαλήνια	Δεν φυσά άνεμος, ο καπνός υψώνεται κατακόρυφα.	Επίπεδη, κατοπτρική επιφάνεια (κοινώς «θάλασσα λάδι»).
1	Σχεδόν άπνοια / Υποπνέων (ελαφρύ αεράκι)	Ρυτιδούμενη	Ο άνεμος μετακινεί τον καπνό, όχι όμως τον ανεμοδείκτη.	Το νερό κάνει μικρές «ρυτίδες».
2	Πολύ ασθενής (ελαφριά αύρα)	Ήρεμη	Ο άνεμος γίνεται αισθητός στο δέρμα, τα φύλλα κινούνται.	Μικρά κυματάκια που δεν «σπάνε». Οι κορυφές τους έχουν υαλώδη μορφή και ποτέ αφρό.
3	Ασθενής (γλυκιά αύρα)	Λίγο ταραγμένη	Φύλλα και μικρά κλαριά κινούνται διαρκώς.	Τα μικρά κύματα αρχίζουν να σπάνε και εμφανίζεται λίγος αφρός («προβατάκια»).
4	Σχεδόν μέτριος (μέτρια αύρα)	Λίγο ταραγμένη ως ταραγμένη (μέτρια)	Ο άνεμος σηκώνει σκόνη και πεσμένα χαρτιά. Τα κλαδιά αρχίζουν να κινούνται.	Μέτρια κύματα, εμφανίζεται αφρός και σταγονίδια νερού (πίτυλος).
5	Μέτριος	Ταραγμένη	Μικρά δέντρα αρχίζουν να κινούνται.	Μεγαλύτερα κύματα (ύψους 1,2 - 2,5 μ.), εμφανίζονται αφρώδεις κορυφές παντού.
6	Ισχυρός	Κυματώδης	Μεγάλα κλαδιά κινούνται και ο αέρας σφυρίζει. Η χρήση της ομπρέλας γίνεται δύσκολη.	Μεγάλα κύματα (ύψους 2 - 4 μ.) με επιμήκεις αφρώδεις κορυφές («άσπρα άλογα») και έντονο πίτυλο.
7	Σφοδρός / Σχεδόν θυελλώδης	Κυματώδης έως πολύ κυματώδης	Τα δέντρα κινούνται ολόκληρα και το περπάτημα ενάντια στον άνεμο γίνεται δύσκολο.	Η θάλασσα ογκούται (φουσκώνει) και λευκός αφρός από κύματα (ύψους 3 - 5 μ.) που σπάζουν αρχίζει να παρασύρεται και να σχηματίζονται ραβδώσεις κατά την διεύθυνση του ανέμου.

(Near Gale)

8	Θυελλώδης (Gale)	Πολύ κυματώδης έως τρικυμώδης	Μεγάλα δέντρα κινούνται ολόκληρα και μικρά κλαδιά σπάνε. Η οδήγηση γίνεται δύσκολη και το περπάτημα ενάντια στον άνεμο εξαιρετικά δύσκολο.	Η θάλασσα αρχίζει να φουρτουιάζει. Σχετικά υψηλά κύματα (4 - 6 μ.) με προεξέχουσες κορυφές που αρχίζουν να σπάνε. Σχηματίζονται έντονες λωρίδες αφρού κατά την διεύθυνση του ανέμου. Μεγάλες ποσότητες αιωρούμενου αφρού.
9	Πολύ Θυελλώδης (Strong Gale)	Τρικυμώδης	Μεγάλα κλαδιά σπάνε, μικρές ζημιές σε καμινάδες και σκεπές. Προσωρινή σήμανση και οδοφράγματα παρασύρονται. Δύσκολη η όρθια στάση.	Υψηλά κύματα (6 - 9 μ.) με πυκνές ραβδώσεις αφρού κατά την διεύθυνση του ανέμου. Οι κορυφές των κυμάτων αρχίζουν να γέρνουν, να πέφτουν και να κυλινδρουν. Ο αφρός είναι δυνατόν να επηρεάζει την ορατότητα.
10	Θύελλα (Storm)	Πολύ τρικυμώδης	Σπάνια παρατηρείται στο εσωτερικό της ξηράς. Δέντρα σπάζουν ή ξεριζώνονται. Πολλά κεραμίδια αποσπώνται από τις σκεπές, αρκετές ζημιές στο εξωτερικό των κτιρίων.	Πολύ υψηλά (8 - 12,5 μ.) κύματα με μακριές λοφώδεις ράχες. Το σπάσιμο και κύλισμα των κορυφών των κυμάτων γίνεται έντονο και βίαιο. Η θάλασσα εμφανίζει μεγάλα λευκά μπαλώματα και η συνολική της εμφάνιση αρχίζει να ασπρίζει. Η ορατότητα μειώνεται.
11	Βίαιη / Σφοδρή θύελλα  (Violent Storm)	Εξαιρετικά τρικυμώδης  (ή Άγρια)	Πολύ σπάνια παρατηρείται στο εσωτερικό της ξηράς. Πολλές στέγες υφίστανται μεγάλη ζημιά. Αρκετές ζημιές σε κτίρια, αυτοκίνητα, πάρκα. Έπιπλα και βαριά αντικείμενα εκτός κτιρίων παρασύρονται. Αδύνατη η όρθια στάση. Εκτεταμένες ζημιές στην βλάστηση.	Εξαιρετικά υψηλά (9 - 14 μ.) ογκώδη κύματα, μεγάλες ποσότητες αιωρούμενου αφρού, μικρή ορατότητα. Δύσκολη η θέα πλοίων μικρής και μεσαίας χωρητικότητας, ίσως για λίγη ώρα να χάνονται πίσω από τα κύματα.

12	Τυφώνας	Μαινόμενη	<p>Εξαιρετικά σπάνιο συμβάν στο εσωτερικό της ξηράς. Σοβαρές καταστροφές σε μεγάλη έκταση. Μερικά παράθυρα μπορεί να σπάσουν. Κινητά σπίτια (mobile homes), καθώς και κακής κατασκευής υπόστεγα και αχυρώνες υφίστανται μεγάλες ζημιές ή και καταστρέφονται. Συντρίμια εκσφενδονίζονται και παρασύρονται. Πολύ εκτεταμένες ζημιές στην βλάστηση.</p>	<p>Τεράστια κύματα (14 μ. και άνω). Ο αέρας γεμίζει με αφρό και πίτυλο, η θάλασσα ασπρίζει εντελώς. Ελάχιστη έως μηδενική ορατότητα.</p>
	(Hurricane-force)*	(ή Πολύ άγρια)		

---

Η κίνηση του ανέμου επηρεάζεται από από όλες τις υπόλοιπες κλιματολογικές μεταβλητές με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, καθώς και από άλλους παράγοντες μη κλιματολογικούς. Επηρεάζεται επίσης 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 (Koutsoyiannis, 2011). Μια τέτοια θεώρηση είναι αρκετά ικανοποιητική και μπορεί να εξηγήσει σε τέτοιο επίπεδο, την αλλαγή στο κλιματικό καθεστώς που επικρατεί σε κάθε μία διαφορετική κλιματική ζώνη. Όσον αφορά στο θέμα της προβλεψιμότητας όμως υπάρχουν πολύ περισσότερες δυσκολίες και παράγοντες επιρροής (Δημάκος, 2014).

Η ταχύτητα του ανέμου μετρούμενη στις μονάδες που αναφέρθηκαν πιο πάνω, χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της μεταβλητής του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετριέται με ειδικά μηχανήματα που ονομάζονται ανεμόμετρα. Με την πάροδο του χρόνου οι συσκευές αυτές έχουν εξελιχθεί πολύ ώστε να μπορούν να μετρήσουν την ταχύτητα του ανέμου με μεγάλη ακρίβεια και παράλληλα όμως και άλλες μεταβλητές που σχετίζονται με την ταχύτητα του ανέμου, όπως η διεύθυνση του ανέμου. Όπως ήδη αναφέρθηκε η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζεται από τις διάφορες άλλες κλιματολογικές μεταβλητές αλλά και από κάποιους άλλους παράγοντες οι οποίοι λαμβάνουν χώρα σε διάφορες κλίμακες. Αυτοί είναι η βαθμίδα πίεσης, τα Rossby κύματα, καθώς επίσης και οι τοπικές κλιματολογικές συνθήκες. Έχει διαπιστωθεί ακόμα σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνση του ανέμου τουλάχιστον σε επίπεδο χώρας (Ελλάδα) (Δημάκος, 2014). Η βαθμίδα πίεσης είναι πολύ σημαντική για την ταχύτητα του ανέμου καθώς είναι ένας από τους παράγοντες γέννησης του ανέμου, που μαζί και με την απόσταση των σημείων διαφοράς πίεσης καθορίζουν και το πόσο μεγάλη θα είναι η ταχύτητα του ανέμου. Τα Rossby κύματα είναι ισχυροί άνεμοι στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Αυτά λειτουργούν σε παγκόσμια κλίμακα και μετακινούνται από τη Δύση στην Ανατολή (Westerlies). Τα κύματα Rossby αποτελούν μία 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.

## 2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΥ

Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου είναι απαραίτητη και πολύ σημαντική για το σχεδιασμό μίας κατασκευής. Στην πιο απλοποιητική εκδοχή της η δύναμη που ασκεί ο άνεμος σε μία κατασκευή είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Επομένως μία σωστή μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου θα δώσει μία αρχική εκτίμηση της δύναμης που θα δεχθεί μία κατασκευή. Είναι ξεκάθαρη η ανάγκη επομένως για σωστές και πιο ακριβείς

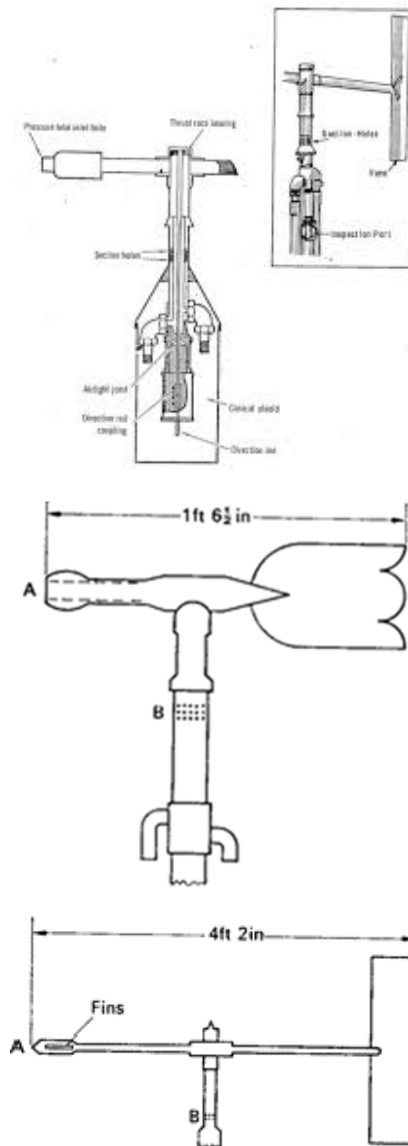
μετρήσεις. Η ταχύτητα του ανέμου μετριέται σε οριζόντιο επίπεδο παρόλο που υπάρχει μέσα της και το κατακόρυφο συστατικό της ριπής του ανέμου. Ο όρος ταχύτητα είναι διανυσματικό μέγεθος και υποδηλώνει διεύθυνση και τιμή. Τα περισσότερα ανεμόμετρα πλέον μαζί με την τιμή της ταχύτητας του ανέμου δίνουν και τη διεύθυνση του ανέμου τη στιγμή της μέτρησης. Η διεύθυνση του ανέμου μετριέται ωρολογιακά και πιο συχνά δίνεται στην κλίμακα των 360°.

Τα πρώτα μηχανήματα ένδειξης της ταχύτητας ήταν πιάτα κρεμασμένα σε οριζόντιο άξονα, και στέκονταν σε διεύθυνση κόντρα στον άνεμο (γύρω στο 1600). Αυτά δεν ήταν όμως κατάλληλα αλλά ήταν η αρχή τεσσάρων πιο σύγχρονων ανεμόμετρων.

### 2.2.1 ANEMOMETRA ΠΙΕΣΗΣ

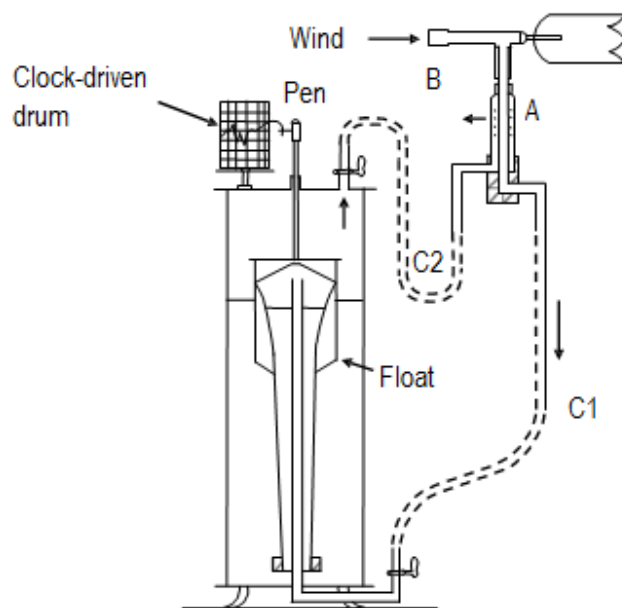
Η κινητική ενέργεια του αέρα μετριέται σαν δυναμική πίεση στο τέλος ενός οριζόντιου σωλήνα, ο οποίος διατηρείται στον άνεμο από ένα πτερύγιο. Οι τιμές της δυναμικής και της στατικής πίεσης μεταφέρονται μέσω των σωλήνων C1 και C2 στο εσωτερικό και εξωτερικό του ειδικά διαμορφωμένου πλωτήρα που βρίσκεται στο εσωτερικό της συσκευής και αυτές οι διακυμάνσεις καταγράφονται και αντιπροσωπεύουν τις στιγμιαίες ταχύτητες του ανέμου. Τα ανεμόμετρα αυτά δε μπορούν να αντιπροσωπεύσουν σωστά τους χαμηλούς ανέμους αλλά ούτε και τις γρήγορες διακυμάνσεις τις ταχύτητας του ανέμου. Επιπλέον, επειδή η διαφορά της δυναμικής και της στατικής πίεσης επηρεάζεται από την πυκνότητα του αέρα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές της θερμοκρασίας. Επίσης είναι ακόμα απαραίτητο να μην παγώνει το εσωτερικό νερό και να αποφεύγονται οι κραδασμοί που επηρεάζουν τις καταγραφές. Τυπικά ανεμόμετρα αυτής της κατηγορίας φαίνονται στο Σχήμα 2.4.





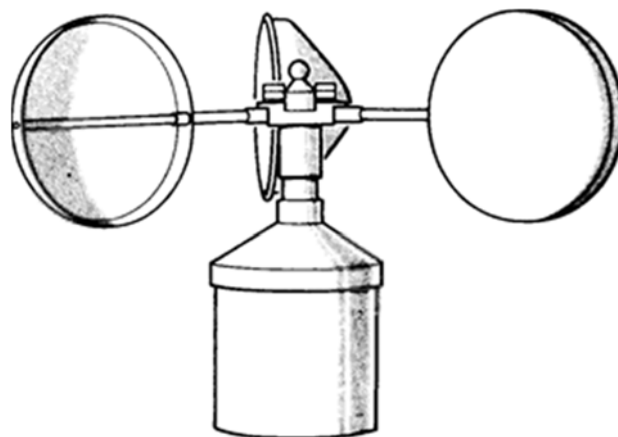
**Σχήμα 2.4.** Τυπικά ανεμόμετρα πίεσης (πηγή διαδικτυο).

- Wind Profilers. Τα ανεμόμετρα αυτά χρησιμοποιούν ραδιοκύματα για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου και μπορούν να μετρήσουν συνεχώς την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος από 0.5 έως 16 χιλιόμετρα.



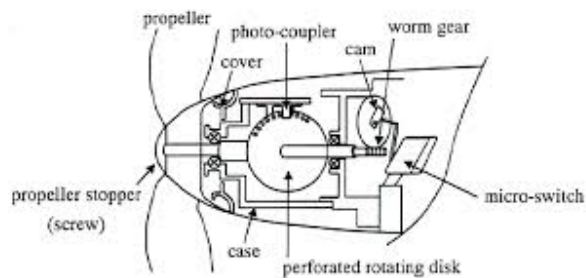
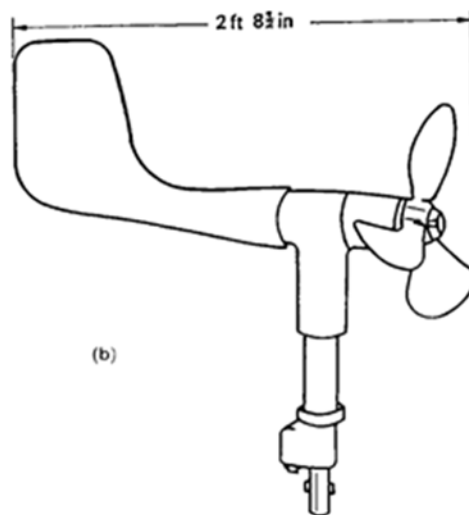
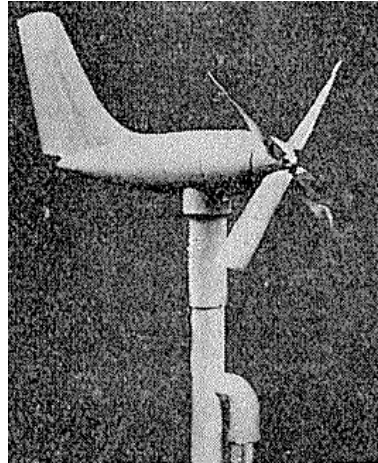
Σχήμα 2.5. Wind Profiler, όπου A: static pressure, B: dynamic pressure, C1: dynamic-pressure tube, C2: static-pressure tube (πηγή Sachs, 1978)

- Περιστροφικά ανεμόμετρα. Αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:
  - (i) Ανεμόμετρα με κύπελλα. Τρία ή τέσσερα κύπελλα σε έναν κατακόρυφο άξονα που κινούνται με τη διαφορά αντίστασης του αέρα στην μπροστινή και πίσω πλευρά των κυπέλλων. Η μετεωρολογική υπηρεσία του Ηνωμένου Βασιλείου χρησιμοποιούσε ανεμόμετρα με τρία κύπελλα.



Σχήμα 2.6. Ανεμόμετρο με τρία κύπελλα (three cup anemometer). Η εσωτερική πλευρά του κάθε κύπελου είναι 5ίντσες (πηγή Sachs, 1978).

(ii) Ανεμόμετρα με έλικα (Windmill anemometer). Μία έλικα είναι τοποθετημένη σε κατακόρυφο άξονα και βρίσκεται με τη βοήθεια ενός πτερυγίου στη διεύθυνση του ανέμου. Βασικά ιαπωνικά και αμερικάνικα μοντέλα φαίνονται στο Σχήμα 2.7.



**Σχήμα 2.7.** Windmill anemometers. (a) Sanuki Speedovane (Japan). (b) Friez Aero-vane (U.S.A.). (c) Το εσωτερικό ενός windmill anemometer (πηγή διαδίκτυο).

## 2.2.2 ANEMOMETRA ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΡΙΠΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ (GUST-MEASURING ANEMOMETERS)

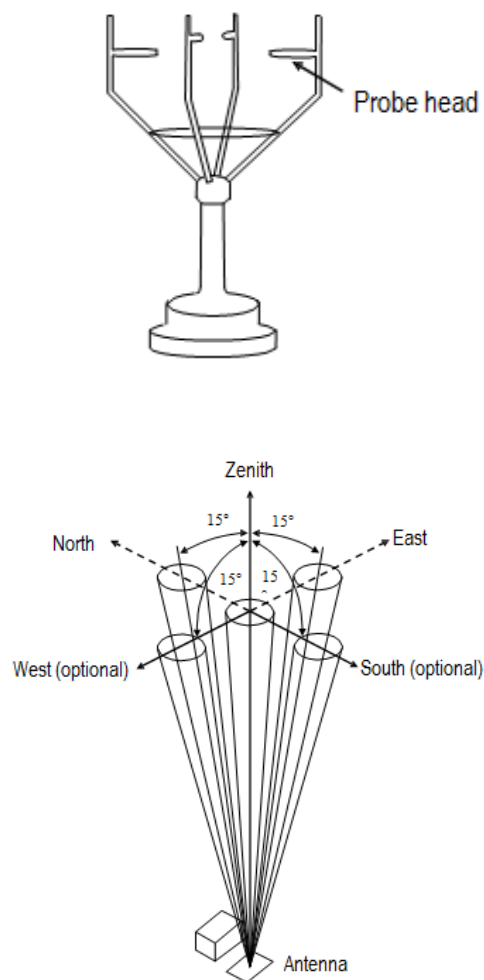
Τα ανεμόμετρα για τη ριπή που είναι ικανά για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου των 3/10 του δευτερολέπτου με ακρίβεια είναι δύο ειδών:

- Το θερμού σύρματος ανεμόμετρο (hot-wire anemometer). Ένα θερμαινόμενο σύρμα ψύχεται από τη ροή του ανέμου και μετριέται το ρεύμα που απαιτείται για τη διατήρηση της αρχικής θερμοκρασίας



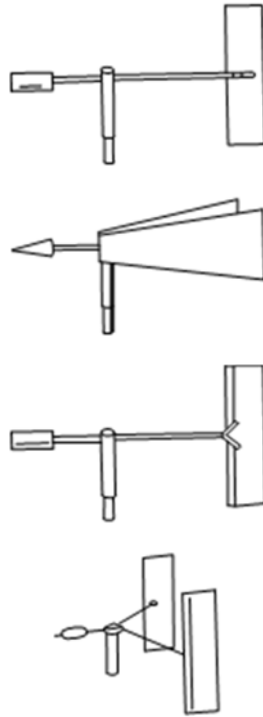
**Σχήμα 2.8.** Στην πρώτη φωτογραφία είναι η βασική μορφή ενός ανεμόμετρου θερμού σύρματος (“eFunda: Introduction to Hot-Wire Anemometers,” n.d.) και στη δεύτερη η πιο σύγχρονη εκδοχή της συσκευής (“REED AM-4204 Hot Wire Anemometer w/ RS232 Output,” n.d.).

- Ανεμόμετρο ριπής (gust anemometer). Μία ελαφριά, διάτρητη μπάλα τοποθετείται στο άκρο ενός προβόλου. Η έλξη του ανέμου στη μπάλα κάμπτει τον πρόβολο, του οποίου οι τάσεις μετριούνται με επιμηκυνσιόμετρα.
- Ηχητικά ανεμόμετρα (sonic anemometers). Μετρούν την αλλαγή στην ταχύτητα διάδοσης των ηχητικών κυμάτων λόγω της αντίστασης του ανέμου. Τα ηχητικά ανεμόμετρα έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης καθώς δεν έχουν εξαρτήματα για να προκαλέσει την κίνησή τους ο άνεμος και είναι αρκετά ευαίσθητα στις εναλλαγές της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου.



**Σχήμα 2.9.** Ηχητικό ανεμόμετρο (sonic anemometer).

Τέλος υπάρχουν και ανεμόμετρα τα οποία μετρούν μόνο τη διεύθυνση του ανέμου και ονομάζονται ανεμόμετρα έλικας (“Japan - Chapter 4- Measurement of surface wind.pdf,” n.d.).



**Σχήμα 2.10.** Τυπικά ανεμόμετρα έλικας (Sachs, 1978).

Όλα αυτά τα ανεμόμετρα παρουσιάζουν μειονεκτήματα, σε σύγκριση με το ιδανικό. Για να καταγραφούν όλες οι αποκλίσεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, ένα μηχάνημα ένδειξης της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου θα πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες.

- Η αδράνεια και η τριβή των κινούμενων μερών θα πρέπει να είναι αμελητέα. Καθώς η αυξανόμενη αδράνεια απαιτεί αύξηση της επιτάχυνσης για να επιταχύνει τον αισθητήρα (στρεπτική ροπή του ανέμου = αδράνεια × επιτάχυνση), θα υπάρξει μία χρονική καθυστέρηση για τη μέτρηση της αυξανόμενης ταχύτητας, μία υπερβαση στη μέγιστη ταχύτητα και μία υστέρηση πάλι στην επιβράδυνση της ταχύτητας. Η τριβή λειτουργεί επιβραδυντικά σε κάθε περίπτωση. Και τα δύο είδη ανεμόμετρου, το ανέμομετρο με τα κύπελλα και το ανεμόμετρο με το πτερύγιο έχουν σχετικά υψηλή ροπή αδράνειας.
- Ο αισθητήρας της ριπής θα πρέπει να έχει υψηλή φυσική συχνότητα, έτσι ώστε να είναι ικανό να εγγράφει τις εναλλαγές της ριπής χωρίς να υπάρχει συντονισμός. Στην πράξη αυτό δεν είναι δυνατόν, και μία εναλλακτική απαίτηση είναι ότι η μη-

ενισχυμένη απόκριση πρέπει να είναι υψηλότερη από τη συχνότητα συντονισμού της πλειοψηφίας των δομών. Μια υστέρηση στις ριπές της κλίμακας 0-1 δευτερόλεπτα θεωρείται ανεκτή για τα ανεμόμετρα που μετρούν τις ριπές.

- Το μηχάνημα μέτρησης θα πρέπει να καλύπτει το πλήρες εύρος της ταχύτητας του ανέμου και της κατεύθυνσης με την ίδια ευαισθησία. Το μέγιστο εύρος της ταχύτητας ποικίλλει σε ανά τον κόσμο, αλλά σε γενικές γραμμές θα πρέπει να κυμαίνεται από 0 έως 200 μίλια/ώρα.
- Οι αισθητήρες θα πρέπει να αποδίδουν εξίσου κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες. Ορισμένοι κίνδυνοι που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετρήσεις είναι οι ισχυροί άνεμοι, ο πάγος ή το χιόνι, το χαλάζι, οι κεραυνοί, και τα πουλιά. Κανένα ανεμόμετρο δεν πληρεί όλες τις προϋποθέσεις, και ο κατάλληλος τύπος θα πρέπει να επιλέγεται για τον απαραίτητο σκοπό.

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ανεμόμετρα είναι:

Ανεμόμετρο με τέσσερα κύπελλα (Four-cup anemometer) (ΗΠΑ, Ιαπωνία, Γερμανία).

Ανεμόμετρο με τρία κύπελλα (Three-cup anemometer) (Ηνωμένο Βασίλειο και τις χώρες της Κοινοπολιτείας).

Ανεμόμετρο με πτερύγιο (Windmill anemometer) (Ιαπωνία, ΗΠΑ).

Ανεμόμετρο πίεσης (Pressure anemometer) (Ηνωμένο Βασίλειο).

Τα ανεμόμετρα έχουν αναπτυχθεί πάρα πολύ και πλέον έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και είναι πιο ευαίσθητα στις εναλλαγές διεύθυνσης και της ταχύτητας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έχει ξεκινήσει από το 2007 η διαδικασία για την αντικατάσταση των παλαιού τύπου ανεμομέτρων με νέα για καλύτερες μετρήσεις των χαρακτηριστικών του ανέμου. Ενδεικτικά αναφέρθηκαν οι πιο βασικές κατηγορίες ανεμομέτρων. Είναι πιθανό να μην αναφέρθηκαν όλα τα είδη ανεμομέτρων που υπάρχουν για αυτό για περισσότερα ανεμόμετρα και τρόπους μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου πληροφορίες θα πρέπει να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία και σε τεχνικά εγχειρίδια.

Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου γίνονται με ανεμόμετρα τα οποία είναι τοποθετημένα στα 10 μέτρα από την επιφάνεια της γης με ανεμόμετρα τα οποία μπορεί να είναι διάφορα μοντέλα από περιστρεφόμενα κύπελλα (rotating cups), τα οποία χρησιμοποιούνταν παλαιότερα κυρίως, ή νέα μοντέλα με χρήση υπερήχου, χωρίς κινούμενα μέρη. Σε πολλά σημεία έχει αρχίσει ήδη η αντικατάσταση των παλαιότερων τύπων ανεμομέτρων με τα νέα.

Η ταχύτητα του ανέμου που αναφέρεται σε κάθε παρατήρηση/μέτρηση είναι η μέση ταχύτητα για την πιο πρόσφατη 2-λεπτη προγενέστερη περίοδο της στιγμής παρατήρησης.

Αυτός θεωρείται επίσης ο συνεχής άνεμος (sustained wind) για τις τυπικές επιφανειακές μετρήσεις (στις προγνώσεις τυφώνων, αυτός ο συνεχής άνεμος είναι ο μέσος άνεμος ενός λεπτού). Αυτός ο άνεμος των 2 λεπτών υπολογίζεται από μία σειρά από 24 μέσες τιμές των πέντε δευτερολέπτων.

Η ριπή του ανέμου (wind gust) αναφέρεται επίσης όταν ο μέγιστος στιγμιαίος άνεμος κατά τη διάρκεια των πιο πρόσφατων δέκα λεπτών πριν από την παρατήρηση είναι μεγαλύτερος πάνω από 10 κόμβους από τη μικρότερη νηνεμία (lull) κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Αν συμβαίνει αυτό, τότε ο μέγιστος στιγμιαίος άνεμος αυτού του 10λεπτου πριν τη μέτρηση αναφέρεται ως η τιμή της ριπής.

Εάν η μέγιστη στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου από τη μία μέτρηση στην επόμενη υπερβεί του 25 κόμβους, η τιμή αυτή αναφέρεται ως αιχμή του ανέμου. Θα είναι τουλάχιστον ίση με την αναφερόμενη ριπή (gust), αλλά είναι πιθανό να είναι και υψηλότερη εάν αυτή η μέγιστη τιμή του ανέμου εμφανιστεί πριν τα δέκα λεπτά από τη μέτρηση, διάστημα στο οποίο μετριέται η τιμή της ριπής του ανέμου (gust).

Μερικά πρόσθετα σχόλια θα πρέπει να γίνουν πάνω σε αυτές τις μετρήσεις. Αρχικά όπως διαπιστώνει κάποιος η μέση 2-λεπτη τιμή του ανέμου είναι συνήθως αρκετά χαμηλότερη από την μέγιστη (αιχμή-peak) ή από τη ριπή του ανέμου, ιδιαίτερα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Επίσης, τα παλαιάς τεχνολογίας ανεμόμετρα με τα περιστρεφόμενα κύπελλα μετρούν την ταχύτητα με βάση τη δύναμη του ανέμου που ασκείται σε αυτές τις κούπες. Δεδομένου όμως ότι εμπλέκεται η μάζα τους και κάποια αδράνεια, ακόμα και κάποιο πολύ ευαίσθητο ανεμόμετρο απαιτούσε ένα χρονικό διάστημα περίπου 5 δευτερόλεπτα για τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής ή της ριπής του ανέμου, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη και να περιοριστούν τα φαινόμενα αυτά. Τα νέα ηχητικά ανεμόμετρα (sonic anemometers) εξακολουθούν να χρησιμοποιούν τις 24 μετρήσεις των μέσων πέντε δευτερολέπτων για τον υπολογισμό της μέσης 2λεπτης ταχύτητας του ανέμου, αλλά χρησιμοποιούν όμως το μέσο όρο 3-δευτερολέπτων για τον υπολογισμό των τιμών της ριπής και της αιχμής. Επειδή είναι πιο ευαίσθητα στις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου και χρησιμοποιούν ένα μικρότερο μέσο χρόνο γι' αυτά, αυτό οδηγεί σε περισσότερες μετρήσεις ριπών του ανέμου και μέγιστης τιμής, αλλά και σε υψηλότερες τιμές για αυτές τις μεταβλητές από ότι παλαιότερα.

Επομένως μέσω ενός παραδείγματος φαίνεται πως γίνονται αυτές οι μετρήσεις. Έστω ότι εξετάζεται η παρατήρηση της τιμής της ταχύτητας του ανέμου που γίνεται στις 14:55. Αυτή η παρατήρηση επομένως έδωσε μία ταχύτητα του ανέμου 16 κόμβους, μία ριπή του ανέμου 24 κόμβους και μία μέγιστη τιμή του ανέμου 31 κόμβους. Ας δούμε λοιπόν πως ερμηνεύεται αυτή η μέτρηση. Αρχικά όσον αφορά τη μέση 2λεπτη τιμή του ανέμου, αυτή αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου για την περίοδο 14:53-14:55. Η ριπή του ανέμου



είναι η μέγιστη τιμή του ανέμου που παρατηρήθηκε στο διάστημα 14:45-14:55 και βρέθηκε 24 κόμβους (και εξ ορισμού θα πρέπει να υπήρχε και ανάπαυλα (lull) μέχρι 14 κόμβους σε αυτό το χρονικό διάστημα για να αναφερθεί αυτή η μέτρηση της ριπής του ανέμου-gust). Τέλος θα πρέπει η στιγμιαία ταχύτητα σε κάποιο σημείο μεταξύ 13:55 και 14:55 να έφτασε τους 31 κόμβους. Αφού συνέβη πριν το 10λεπτο που γίνεται η μέτρηση της ριπής του ανέμου και ξεπέρασε τους 25 κόμβους αναφέρεται ως αιχμή του ανέμου (peak wind) (Matthews, 2007).

## 2.3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΧΡΗΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αιολική ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Το όνομα προέρχεται από την ελληνική μυθολογία. Ο Αίολος είχε οριστεί από τον Δία κλειδοκράτορας τον ανέμων και τους προκαλούσε ή τους σταματούσε κατά βούληση. Οι οκτώ άνεμοι ήταν: Βορέας, Καικίας, Απηλιώτης, Εύρος, Νότος, Λιψ, Ζέφυρος, Σκίρων. Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα στη ναυσιπλοΐα και είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με ανεξάντλητη και χωρίς κόστος πρώτη ύλη που δε ρυπαίνει το περιβάλλον. Από την αρχαιότητα αξιοποιήθηκε στην παραγωγή μηχανικής (αλευρόμυλοι, ανεμόμυλοι για άντληση υπόγειων νερών, αποστράγγιση) και ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτριες). Η πρώτη χρήση αιολικής ενέργειας έγινε στη ναυσιπλοΐα, ενώ οι πρώτοι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για άλεσμα δημητριακών και άντληση νερού. Οι αρχαιότεροι ανεμόμυλοι (κατακόρυφου άξονα) κατασκευάστηκαν στην Περσία τον 6ο έως τον 9ο αιώνα μ.Χ., ενώ η πρώτη γραπτή αναφορά γίνεται στην Κίνα το 13ο αιώνα μ.Χ. Στην Ευρώπη αναπτύχθηκαν διάφορα είδη ανεμόμυλου (οριζόντιου άξονα) από τον 13ο αιώνα και πιθανόν οι νερόμυλοι να αποτέλεσαν πρότυπο για την κατασκευή τους. Το 17ο αιώνα η 'τεχνολογία' μεταφέρεται στην Αμερική όπου οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για άντληση νερού. Στην Ελλάδα (ειδικότερα στο Αιγαίο) η χρήση ανεμομύλων χρονολογείται από το 13ο αιώνα. Το 1960 υπήρχαν 10000 ανεμόμυλοι στο Οροπέδιο Λασιθίου, 2500 στην υπόλοιπη Κρήτη, και 600 στη Ρόδο. Ο πρώτος ανεμόμυλος για παραγωγή ηλεκτρισμού κατασκευάστηκε το 1888 στο Cleveland του Ohio. Είχε διάμετρο πτερωτής 17 μέτρα και ισχύ 12 kW. Σήμερα η Δανία χώρα πλούσια σε αιολικό δυναμικό έχει τα πρωτεία στην κατασκευή αλλά και στην χρήση ανεμογεννητριών. Πριν 30 χρόνια, μια τυπική ανεμογεννήτρια ήταν της τάξης των 25 kW. Σήμερα, οι αιολικές μηχανές που κατασκευάζονται είναι της τάξης των 750-2.500 kW (Μαμάσης, 2013).

## 2.4 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΥ

### 2.4.1 ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ

**Τυφώνες** συμβαίνουν σε αρκετά σημεία του κόσμου, ωστόσο αναφέρονται με διαφορετικές ονομασίες σε κάθε μέρος. Στον Ατλαντικό Ωκεανό και στον ανατολικό Ειρηνικό Ωκεανό χρησιμοποιείται η λέξη θύελλα (hurricane) ενώ στον δυτικό Ειρηνικό Ωκεανό και στην Άπω Ανατολή χρησιμοποιείται ο όρος τυφώνας (typhoon). Στον Ινδικό Ωκεανό και την Αυστραλία χρησιμοποιείται ο όρος κυκλώνας (cyclone). Όλοι αυτοί οι όροι χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το ίδιο φαινόμενο. Οι τυφώνες λόγω της μορφής τους δεν πρέπει να ταυτίζονται με τους ανεμοστρόβιλους. Ο ανεμοστρόβιλος (tornado) είναι κάτι τελείως διαφορετικό. Υποδηλώνει το πολύ μικρότερο ατμοσφαιρικό φαινόμενο ενός σχετικά μικρού στροβιλισμού του αέρα (whirlwind) (η διάμετρος του ανεμοστρόβιλου είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα ή και λιγότερα, ενώ η κλίμακα του τυφώνα είναι εκατοντάδες χιλιόμετρα με μάλιστα του κυκλώνα γύρω στα 25 χιλιόμετρα) με κατακόρυφο άξονα που εκτείνεται από τα σύννεφα στο έδαφος, που συμβαίνει συνήθως κατά τη διάρκεια καταιγίδων με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου και πολύ μικρότερη ατμοσφαιρική πίεση στο κέντρο από τους κυκλώνες. Το βάθος της ατμόσφαιρας που συμμετέχει στο σχηματισμό των κυκλώνων είναι της τάξης των 10 χιλιομέτρων. Οι κυκλώνες είναι τροπικές καταιγίδες, μικρότερης έκτασης αλλά εντονότερης έντασης από τις καταιγίδες των εύκρατων περιοχών. Δημιουργούνται πάνω από θερμούς ωκεανούς και η ενέργεια τους πιστεύεται ότι παρέχεται από τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού που αναρροφάται στο κέντρο χαμηλής πίεσης. Οι πορείες τους είναι εντελώς τυχαίες, παρόλο που υπάρχει η τάση να κινούνται σε ευθεία γραμμή. Οι κύριες περιοχές που πλήττονται από τους κυκλώνες είναι η ανατολική ακτή της Βόρειας Αμερικής και οι κινεζικές ακτές. Τα πιο καταστροφικά τους αποτελέσματα δεν οφείλονται στην ταχύτητα του ανέμου, που είναι μεν υψηλή αλλά όχι και ασυνήθιστα μεγάλη αλλά στο κύμα καταιγίδας ή κύμα θύελλας που χτυπάει τις ακτές. Όπως και με τους ανεμοστρόβιλους, η ταχύτητα των κυκλώνων είναι δύσκολο να μετρηθεί αλλά εκτιμάται με δορυφορικά και άλλα μέσα. Εκτιμήσεις για την ταχύτητα του ανέμου θεωρούν ταχύτητες μεγαλύτερες από 150 κόμβους (278km/h).

Για να καταγραφεί επισήμως ως τυφώνας μία καταιγίδα, πρέπει η σταθερή ταχύτητα των ανέμων να είναι μεγαλύτερη ή ίση με 74 mi/h (118 km/h), δηλαδή να φτάσει τα 12 Μποφόρ. Αν είναι από 8 ως 11 Μποφόρ (39 - 73 mi/h ή 63 - 117 km/h), τότε καταγράφεται ως τροπική καταιγίδα (tropical storm), ενώ αν είναι ως 38 mi/h (62 km/h), τότε καταγράφεται ως τροπική ύφεση (tropical depression) ή απλώς βαρομετρικό χαμηλό.

Γενικότερα οι τροπικοί κυκλώνες αρχίζουν να εκδηλώνονται, κατά κανόνα, εκατέρωθεν της ζώνης των τροπικών νηνεμιών, αποκαλούμενη διεθνώς ντόλντραμς (doldrums). Πρόκειται για τη ζώνη μεταξύ των γεωγραφικών παραλλήλων 7° και 15° τόσο σε βόρειο γεωγραφικό

πλάτος όσο και σε νότιο. Κυρίως δημιουργούνται στα μέσα πλάτη από 20° και 35°, ενώ αντιθέτως στη ζώνη του Ισημερινού (+/- 5° γύρω από τον Ισημερινό) δεν δημιουργούνται, επειδή η δύναμη Coriolis που δημιουργεί την κυκλική κυκλοφορία και κατευθύνει τους ανέμους προς το κέντρο χαμηλής πίεσης, τείνει προς το μηδέν.

Οι κυκλώνες που επηρεάζουν τις περιοχές του Ειρηνικού, Βορείου Ατλαντικού και Νοτίου Ινδικού εντοπίζονται στην αρχή στο δυτικό τμήμα τους. Πάντως έχουν σημειωθεί και εξαιρέσεις, όπως στον Βόρειο Ατλαντικό κατά τη διάρκεια Αυγούστου και Σεπτεμβρίου να συμβαίνει εκδήλωση τροπικού κυκλώνα κοντά στο Πράσινο Ακρωτήριο.

**Πίνακας 2.3.** Μεγέθη ανέμων τροπικών κυκλώνων (“Wikipedia, the free encyclopedia,” 2015)

<b>ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΩΝ ΤΡΟΠΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝΩΝ</b>
Τροπική ύφεση 20-34 κόμβους
Τροπική θύελλα 35-64 κόμβους
Τροπικός κυκλώνας > 64 κόμβους

**Πίνακας 2.4.** Ο πίνακας παρουσιάζει τους μήνες ανάπτυξης τροπικών καταιγίδων και κυκλώνων ανά περιοχή καθώς και τις μέγιστες ταχύτητές τους.(πηγή NOAA, Wikipedia.org).

<b>Μήνες Ανάπτυξης και Μέσοι Αριθμοί Τροπικών Καταιγίδων και Κυκλώνων ανά έτος</b>					
<b>Περιοχές ανάπτυξης</b>	<b>Έναρξη εποχής</b>	<b>Λήξη εποχής</b>	<b>Τροπικές καταιγίδες (39-73 μίλια/ώρα 63-117 χιλιόμετρα/ώρα)</b>	<b>Τροπικοί κυκλώνες (&gt;74 μίλια/ώρα 118 χιλιόμετρα/ώρα)</b>	<b>Τροπικοί κυκλώνες κατηγοριών 3, 4 και 5 (&gt;111 μίλια/ώρα 178 χιλιόμετρα/ώρα )</b>
Βορειοδυτικός Ειρηνικός	Απρίλιος	Ιανουάριος	26,7	16,9	8,5
Νότιος Ινδικός	Νοέμβριος	Απρίλιος	20,6	10,3	4,3
Βορειοανατολικός Ειρηνικός	Μάιος	Νοέμβριος	16,3	9	4,1
Βόρειος Ατλαντικός	Ιούνιος	Νοέμβριος	10,6	5,9	2
Αυστραλία/Νοτιοδυτικός Ειρηνικός	Νοέμβριος	Απρίλιος	9	4,8	1,9
Βόρειος Ινδικός	Απρίλιος	Δεκέμβριος	5,4	2,2	0,4

Προφανώς και είναι πιθανό να συμβούν τυφώνες και εκτός αυτών των ημερομηνιών και έχουν συμβεί κιόλας, αλλά αυτές οι ημερομηνίες επιλέχθηκαν ώστε να περικλείουν το 97% της τροπικής δραστηριότητας. Στη λεκάνη του Ατλαντικού υπάρχει μία κορύφωση της

δραστηριότητας από τον Αύγουστο μέχρι τον Οκτώβριο με 78% των συνολικών ημερών των τροπικών καταιγίδων, 87% των ημερών των τυφώνων μικρής κλίμακας (κατηγορίας 1 και 3 της κλίμακας Saffir-Simpson) και 96% των ημερών των τυφώνων μεγάλης κλίμακας (κατηγορίας 3,4,5 της κλίμακας Saffir-Simpson) (Landsea, 1993). Η μέγιστη δραστηριότητα είναι αρχές με μέσα Σεπτέμβρη. Είναι πιθανό μία φορά στα τόσα χρόνια να συμβαίνει τροπικός κυκλώνας εκτός αυτής της περιόδου, κυρίως Μάιο ή Δεκέμβριο.

Στη λεκάνη του Βορειοανατολικού Ειρηνικού η περίοδος είναι μεγαλύτερη όπως φαίνεται και στον πίνακα με τη δραστηριότητα να ξεκινάει στα τέλη του Μαΐου ή στις αρχές του Ιουνίου και να ολοκληρώνεται τέλη Οκτωβρίου ή αρχές Νοεμβρίου. Η δραστηριότητα είναι αυξημένη τέλη Αυγούστου με αρχές Σεπτεμβρίου.

Για τον κεντρικό Ειρηνικό η κορύφωση της δραστηριότητας είναι τον Αύγουστο και το Σεπτέμβριο.

Στη λεκάνη του Βορειοδυτικού Ειρηνικού τροπικοί κυκλώνες συμβαίνουν όλο τον χρόνο με μειωμένη δραστηριότητα το Φεβρουάριο και το πρώτο μισό του Μαρτίου. Η βασική περίοδος είναι από τον Ιούλιο μέχρι το Νοέμβριο με αιχμή τα τέλη Αυγούστου και τις αρχές Σεπτέμβρη.

Στη λεκάνη του βόρειου Ινδικού υπάρχουν δύο περίοδοι αιχμής το Μάιο και το Νοέμβριο, ενώ τροπικοί κυκλώνες εμφανίζονται από τον Απρίλη μέχρι το Δεκέμβριο. Οι ισχυρότερες κυκλωνικές καταιγίδες (με ταχύτητες μεγαλύτερες από 33μέτρα/δευτερόλεπτο,76 μίλια/ώρα συμβαίνουν σχεδόν αποκλειστικά από τον Απρίλιο μέχρι τον Ιούνιο και από τέλη Σεπτεμβρίου μέχρι αρχές Δεκεμβρίου.

Στις λεκάνες του Νοτιοδυτικού και Νοτιοανατολικού Ινδικού οι περίοδοι είναι αρκετά παρόμοιες με τροπικούς κυκλώνες να ξεκινούν στα τέλη του Οκτωβρίου με αρχές Νοεμβρίου και να φτάνουν σε διπλή περίοδο αιχμής, μία στα μέσα του Ιανουαρίου και μία στα μέσα Φεβρουαρίου με αρχές Μαρτίου, και να τελειώνουν το Μάιο.

Στη λεκάνη του νοτιοδυτικού Ειρηνικού η δραστηριότητα των τροπικών κυκλώνων ξεκινάει στα τέλη Οκτώβρη με αρχές Νοεμβρίου με αιχμή τα τέλη Φεβρουαρίου με αρχές και τελειώνει στις Αρχές Μαΐου.

Παγκοσμίως, ο Σεπτέμβριος είναι ο πιο ενεργός μήνας και ο Μάιος ο λιγότερος (Neumann,1993).

Στο Δυτικό Ημισφαίριο, όπου οι τροπικοί κυκλώνες είναι γνωστοί ως hurricanes (τυφώνες), χρησιμοποιείται η Κλίμακα Σαφίρ-Σίμπσον ή Κλίμακα Τυφώνων Σαφίρ-Σίμπσον (Saffir-Simpson Hurricane Scale) για την ταξινόμησή τους.

Η κλίμακα κατατάσσει τους τυφώνες σε 5 κατηγορίες με βάση την ένταση των ανέμων και για την ακρίβεια την σταθερή ταχύτητα ανέμου και ειδικότερα στην μέγιστη ταχύτητα, η οποία παρατηρείται πάντα στον δακτύλιο γύρω από το ήρεμο κέντρο (μάτι) του κυκλώνα, όπου πνέουν οι ισχυρότεροι άνεμοι, γνωστός ως το τοίχωμα του ματιού (eyewall). Αντιθέτως, οι ριπαίοι άνεμοι, δηλαδή οι στιγμιαίες ισχυρότερες ριπές ανέμου, αν και πάντα αναφέρονται στα μέσα ενημέρωσης, δεν υπολογίζονται στην κατάταξη.

Η κλίμακα ξεκινάει από την Κατηγορία 1 που αντιστοιχεί σε ασθενείς τυφώνες και φτάνει στην μέγιστη δυνατή Κατηγορία 5 με ανέμους άνω των 155 μιλίων/ώρα ή 250 χλμ/ώρα (69 μέτρα/δευτερόλεπτο ή 136 κόμβους). Σύμφωνα πάντως με τα πρωτότυπα έγγραφα της κλίμακας και πολλές άλλες πηγές, η κλίμακα αρχίζει πραγματικά στα 39 μίλια/ώρα, δηλαδή με τις τροπικές καταιγίδες, που χωρίζονται σε κατηγορίες A και B (39-50 μίλια/ώρα και 51-73 μίλια/ώρα αντίστοιχα).

Οι ταξινομήσεις της κλίμακας αυτής προορίζονται κυρίως για την μέτρηση του επιπέδου των ζημιών και πλημμυρών που αναμένεται να προκαλέσει ο τυφώνας κατά την προσέγγισή του στην ξηρά, αν και έχουν επικριθεί ως υπερβολικά απλές.

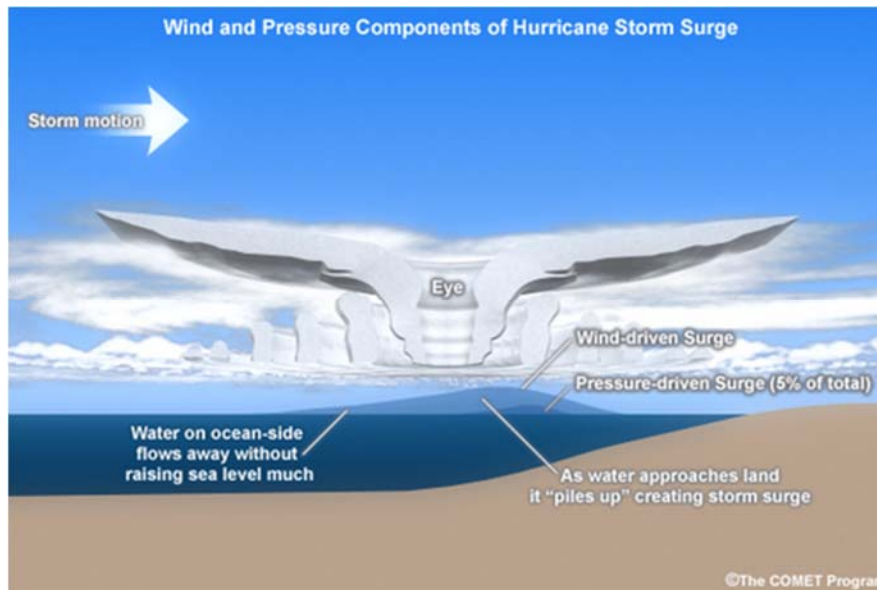
Πιο αναλυτικά στοιχεία για την κλίμακα Σαφίρ-Σίμπσον (Saffir-Simpson Hurricane Scale) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 2.5.** Saffir-Simpson κλίμακα και αντίστοιχες ταχύτητες του ανέμου (πηγή NOAA).

<b>Κλίμακα Τυφώνων Σαφίρ-Σίμπσον</b>					
<b>Κατηγορία</b>	<b>Μέγιστη Σταθερή Ταχύτητα Ανέμου (1-min sustained wind speed)</b>			<b>Κύμα θύελλας (storm surge) που πλημμυρίζει την ακτή (ύψος σε μέτρα)</b>	<b>Ατμοσφαιρική ή πίεση σε hPa</b>
	Κόμβοι	Μίλια/ώρα (mph)	Χλμ./ώρα (km/h)		
Τροπική ύφεση	< 34	< 39	< 63	≈ 0	
Τροπική καταιγίδα	34 - 64	39 - 73	63 - 118	0,1 - 1,1	
Τυφώνας Κατηγορίας 1	64 - 83	74 - 95	119 - 153	1,2 - 1,6	≥ 980
Τυφώνας Κατηγορίας 2	83 - 96	96 - 110	154 - 177	1,7 - 2,5	965 - 979
Τυφώνας Κατηγορίας 3	96 - 113	111 - 130	178 - 209	2,6 - 3,8	945 - 964
Τυφώνας Κατηγορίας 4	113 - 135	131 - 155	210 - 249	3,9 - 5,5	920 - 944
Τυφώνας Κατηγορίας 5	≥ 135	≥ 155	≥ 250	≥ 5,5	≥ 920

Ο Πίνακας 2.5 παρουσιάζει την κλίμακα που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση των τυφώνων (hurricanes) στο δυτικό ημισφαίριο. Κύμα θύελλας ή κύμα καταιγίδας μπορεί να είναι η πιο καταστροφική και θανάσιμη πτυχή ενός τυφώνα. Οι περισσότερες απώλειες ζωών οφείλονται στο κύμα θύελλας και τις πλημμύρες και όχι τόσο στους μεγάλης ταχύτητας ανέμους. Οι πιο θανάσιμοι τυφώνες στην ιστορία των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής δεν ήταν κατηγορίας 5. Είναι μια μεγάλη ποσότητα νερού που παράγεται όταν ένας τυφώνας κινείται σε ένα μεγάλο σώμα νερού. Ο άνεμος σπρώχνει το νερό τόσο γρήγορα, δημιουργώντας ένα ανάχωμα νερού που είναι υψηλότερο από το κανονικό επίπεδο της θάλασσας. Καθώς η καταιγίδα πλησιάζει την ξηρά το κύμα θύελλας μπορεί να εισχωρήσει βαθιά μέσα στις ηπειρωτικές περιοχές. Έρχεται ως ξαφνικό γεγονός και μπορεί να χτυπήσει την ξηρά με μεγάλα κύματα. Οι πλημμύρες που παράγουν αυτά τα κύματα είναι συχνά από τις πιο θανατηφόρες και επιβλαβείς επιπτώσεις ενός τυφώνα. Το μέγιστο δυνατό ύψος που μπορεί να φτάσει το κύμα θύελλας είναι αρκετά περίπλοκο φαινόμενο και εξαρτάται από την ένταση της τροπικής καταιγίδας, την ταχύτητά της, το μέγεθος (δηλαδή την ακτίνα των ισχυρότερων ανέμων της), τη γωνία με την οποία προσεγγίζει την ακτή και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ακτής και του βυθού\*. Η ατμοσφαιρική πίεση αναφέρεται στην ατμοσφαιρική πίεση που παρατηρείται στο κέντρο τους (στο μάτι του τυφώνα).

\*



Σχήμα 2.11. Γραφική αναπαράσταση κύματος θύελλας (πηγή NOAA).

Πίνακας 2.6. Αντιστοιχία της κλίμακας Σαφίρ-Σίμπσον με κλίμακες ταξινόμησης των τυφώνων ή όπως ονομάζονται στις διάφορες χώρες (typhoons,cyclones) (πηγή Wikipedia.org).

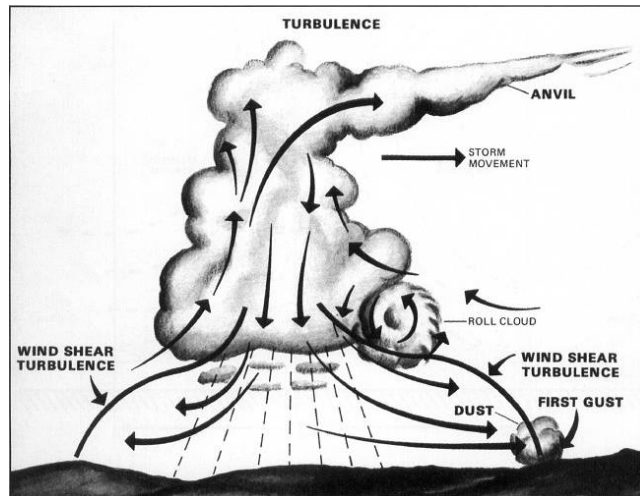
ΙΑΠΩΝΙΑ		ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ		ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ	
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου(km/h)	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΣΕ ΚΛΙΜΑΚΑ SAFFIR-SIMPSON	Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου(km/h)
1	63-117	1	117-153	1	<125
2	118-157	2	154-177	2	125-170
3	157-194	3	210-249	3	170-225
4	>194	4	>249	4	225-280
				5	>280

#### 2.4.2 ΤΟΠΙΚΕΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ

- **Άνεμοι Foehn** (στην περιοχή των Βραχώδων Όρεων ονομάζονται άνεμοι **Chinook**) αναπτύσσονται κατάντη των κορυφογραμμών των βουνών. Ο ψυχρός αέρας καθώς ωθείται προς τα πάνω στην προσηνήμη πλευρά μιας πλαγιάς ενός βουνού προκαλεί υγροποίηση και κατακρήμνιση. Ο ξηρός αέρας που ρέει προς την κορυφή ζεσταίνεται καθώς αναγκάζεται να κατεβεί και είναι ιδιαίτερα ταραχώδης.
- Ένα παρόμοιο είδος ανέμου είναι ο **Bora**, ο οποίος εμφανίζεται κατάντη ενός οροπεδίου που χωρίζεται με μία απότομη πλαγιά από ένα ζεστό κάμπο.

- **Άνεμοι τύπου Jet** δημιουργούνται όπου η μορφολογία του εδάφους, όπως είναι τα φαράγγια για παράδειγμα, προκαλούν την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.
- **Καταιγίδες (Thunderstorms)** συμβαίνουν όταν βαριές σταγόνες βροχής, που σχηματίζονται από τη συμπύκνωση υδρατμών που περιέχονται στον ανερχόμενο θερμό, υγρό αέρα, ωθούν προς τα κάτω τον αέρα μέσω του οποίου πέφτουν, προκαλώντας καταιγίδα η οποία εξαπλώνεται στην επιφάνεια της γης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εμφάνιση της καταιγίδας είναι ο σχηματισμός ψηλών, με θερμότητα, σύννεφων που παράγονται από την ανοδική κίνηση του θερμού, υγρού αέρα. Η κίνηση μπορεί να ξεκινήσει από θερμική αστάθεια ή από την παρουσία πλαγιών βουνού ή ενός μετώπου, για αυτό το λόγο και οι καταιγίδες κατατάσσονται ανάλογα ως θερμικής συναγωγής, ορειογραφικές ή μετωπικές. Εάν η συμπύκνωση των υδρατμών που περιέχονται στον ανερχόμενο αέρα παράξει δυνατή κατακρήμνιση, δυνάμεις που ασκούνται από τη βροχή στον αέρα, μέσω του οποίου πέφτουν, συμβάλλουν στην έναρξη μίας ισχυρής ανεμοθύελλας (downdraft). Μέρος του νερού που πέφτει εξατμίζεται στην υποκείμενη ατμόσφαιρα που με αυτόν τον τρόπο ψύχεται και σαν αποτέλεσμα σταματάει η καταιγίδα. Η κρύα ανεμοθύελλα απλώνεται πάνω από το έδαφος με τεράστια δύναμη και παράγει θυελλώδεις ανέμους οι οποίοι είναι άκρως επικίνδυνοι και καταστροφικοί, όπως αναφέρεται και στο παρακάτω κεφάλαιο των καταστροφών. Αυτό το στάδιο της καταιγίδας με τους θυελλώδεις ανέμους διαρκεί συνήθως από 5 έως 30 λεπτά και ονομάζεται ώριμο στάδιο (mature stage). Καθώς η ενέργεια από το ανοδικό ρεύμα αέρα μειώνεται, η καταιγίδα διασπείρεται. Χαρακτηριστικό της καταιγίδας είναι η απότομη αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, που είναι γνωστή ως πρώτη ριπή (gust front or first gust), η οποία συνδέεται με το πέρασμα της ζώνης ασυνέχειας μεταξύ της κρύας ανεμοθύελλας (downdraft) και του περιβάλλοντος αέρα.





**Σχήμα 2.12.** Σχηματική απεικόνιση του ώριμου σταδίου της καταιγίδας και πραγματική εικόνα καταιγίδας στο ώριμο στάδιό της (πηγή διαδικτυο).

- **Ανεμοστρόβιλοι (Tornadoes).** Είναι ένα φαινόμενο υψηλής ταχύτητας ανέμων, το οποίο χαρακτηρίζεται από μία κατακόρυφη έλικα μεγάλης ταχύτητας ανέμου έκτασης μερικών εκατοντάδων μέτρων, με σχετικά σύντομη διάρκεια ζωής. Οι ανεμοστρόβιλοι είναι μικρής δίνης τύπου καταιγίδες και μπορούν να περιέχουν ανέμους, η ταχύτητα των οποίων είναι δύσκολο να μετρηθεί λόγω της έντασης τους, επειδή καταστρέφουν όποια ανεμόμετρα είναι κοντά στο σημείο από το οποίο διέρχονται. Από εκτιμήσεις που γίνονται με βάση τη ζημιά τους ή από δορυφορικά μέσα η ταχύτητά τους κυμαίνεται από 60-300 κόμβους. Στο κέντρο τους η πίεση πέφτει ξαφνικά, μερικές φορές κατά 200 μιλιμπας (περίπου 3lb/in<sup>2</sup>), το οποίο θα μπορούσε να κάνει ένα κτίριο με κλειστά παράθυρα, να εκραγεί προς τα έξω.

Στην Αμερική οι πιο επικίνδυνοι τύποι καταιγίδων είναι οι τυφώνες και οι δυνατές καταιγίδες που προκαλούν ανεμοστροβίλους και χαλάζι (National Storm Damage Center).

## 2.5 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ενέργεια που προκύπτει από ανανεώσιμες πηγές αγγίζει μόλις το 14% των παγκόσμιων απαιτήσεων ενέργειας αλλά αναμένεται στο μέλλον να διαδραματίσει πιο καθοριστικό ρόλο στον τομέα της ενέργειας. Αυτή τη στιγμή όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας η αιολική κατατάσσεται στη δεύτερη θέση πίσω από την υδροηλεκτρική όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευτικό στόχο να φτάσει τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας στο 20% μέχρι το 2020 το οποίο ισοδυναμεί στο 34% της ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να συνεισφέρει στο ένα τρίτο αυτής της παραγωγής. Η προερχόμενη από τον αέρα ενέργεια συνείσφερε για πρώτη φορά το 1% της παγκόσμιας ζήτησης το 2007 όταν η εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 94GW. Το 2008, 27GW επιπλέον ισχύος προστέθηκαν και η ισχύς αυξήθηκε κατά 29% στα σχεδόν 121GW. Έχει προταθεί η εγκατεστημένη ισχύς να φτάσει μέχρι το 2017 τα 700GW το οποίο είναι πολύ πιθανό να συμβεί με τους τωρινούς ρυθμούς ανάπτυξης. Ωστόσο, η αιολική ενέργεια όπως και οι άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ευαίσθητη σε οποιαδήποτε κλιματική αλλαγή, γιατί το «καύσιμο» που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από την παγκόσμια ενεργειακή ισορροπία και την προκύπτουσα ατμοσφαιρική κίνηση. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες εισέρχονται στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών και των αιολικών πάρκων υπό τον όρο «εξωτερικές συνθήκες». Η κατάσταση του ανέμου καθορίζει την πυκνότητα της ενέργειας στον άνεμο και επομένως την ισχύ που μπορεί να παραχθεί. Αυτό φαίνεται και από την παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (3)$$

όπου

$E$ =ενέργεια ( $W m^{-2}$ )

$\rho$ =πυκνότητα του αέρα ( $kg m^{-3}$ )

$U$ =ταχύτητα του ανέμου σε καθορισμένο ύψος από το έδαφος ( $ms^{-1}$ )

Αν υποθεθεί, όπως θεωρείται ότι ισχύει στην παγκοσμία βιβλιογραφία, ότι η χρονοσειρά της ταχύτητας του ανέμου ακολουθεί τη διπαραμετρική κατανομή της συνάρτησης Weibull όπως χρησιμοποιείται κοινώς και στα περισσότερα περιβάλλοντα υψηλών ανέμων, ισχύει για τη Weibull:

$$P(U) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{U}{A}\right)^k\right) \quad (4)$$

όπου

$A$  = είναι η παράμετρος κλίμακας της Weibull ( $m \text{ s}^{-1}$ )

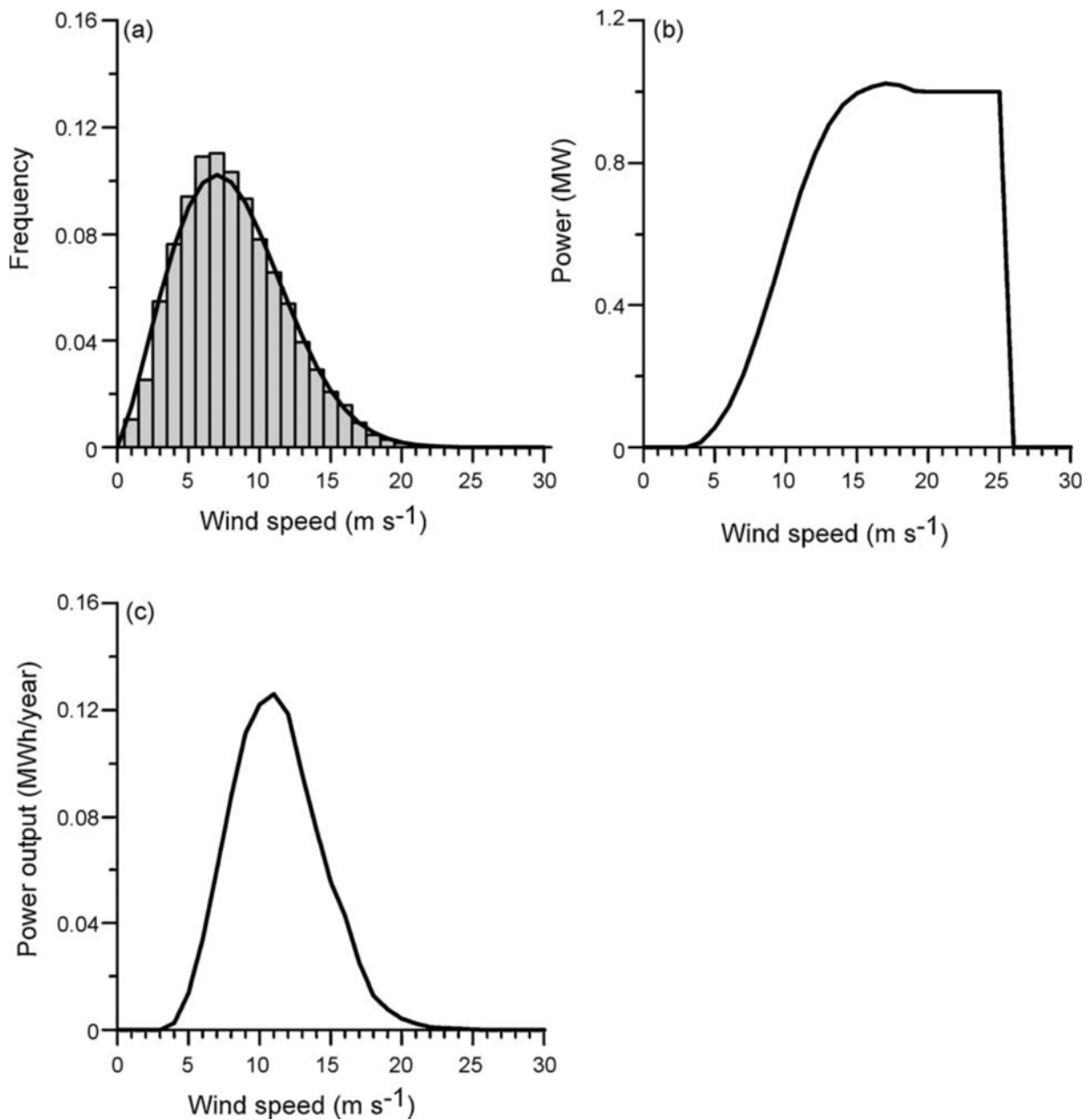
$k$  = είναι η παράμετρος σχήματος της Weibull

Η ενέργεια μπορεί να οριστεί από:

$$E = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \quad (5)$$

όπου  $\Gamma$  = είναι η συνάρτηση Γάμμα

Λαμβάνοντας υπόψη στον τύπο της ενέργειας του ανέμου η ταχύτητα είναι υψωμένη στον κύβο μια μικρή αλλαγή του κλίματος του ανέμου μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες στην παραγόμενη από τις ανεμογεννήτριες αιολική ενέργεια. Για παράδειγμα, εάν συμβεί μία αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου  $0,5 \text{ ms}^{-1}$ , δηλαδή έστω ότι μεταβάλλεται η ταχύτητα από  $5 \text{ ms}^{-1}$  σε  $5,5 \text{ ms}^{-1}$  (δηλαδή να υπάρξει μία μεταβολή της τάξης του 10%) η ενεργειακή πυκνότητα αυξάνεται περισσότερο από 30%. Είναι, επίσης, σαφές ότι το αιολικό δυναμικό στο ανώτερο ποσοστημόριο της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου, την ουρά της κατανομής η οποία είναι και το βασικό στοιχείο μελέτης της παρούσας διπλωματικής σταματάει καθώς οι ανεμογεννήτριες με σκοπό να προστατέψουν τα πτερύγιά τους σταματούν να λειτουργούν. Όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα αυτό ενισχύεται περαιτέρω από τη μη γραμμική σχέση μεταξύ περιστατικού ταχύτητας του ανέμου και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μία ανεμογεννήτρια, καμπύλη ισχύος αιολικής τουρμπίνας.



**Σχήμα 2.13.** (1) Κατανομή συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου με τα ιστογράμματα να προκύπτουν από μετρήσεις από ακτές της Δανίας για την περίοδο 1997-2003. Η μέση ταχύτητα του ανέμου στα 50 μέτρα ύψος στην περιοχή είναι 8.1 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Η γραμμή αναπαριστά τη προσαρμοσμένη κατανομή Weibull με παράμετρο κλίμακας  $A$  (αναφέρεται στην κεντρική τάση) 9.1 μέτρα ανά δευτερόλεπτο και την παράμετρο σχήματος  $k$  2.25. (2) Μία κλασική καμπύλη ισχύος για μία ανεμογεννήτρια με ισχύ 1MW. (3) Η προκύπτουσα ισχύς της ταχύτητας του ανέμου για την κατάσταση του αέρα του παραπάνω ιστογράμματος και την ανεμογεννήτρια ισχύος 1MW. (Pryor and Barthelmie, 2010)

Όπως προαναφέρθηκε η αιολική ενέργεια προκύπτει ουσιαστικά από την ηλιακή ενέργεια και χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα σε διάφορους τομείς της ζωής των ανθρώπων όπως στη ναυσιπλοία αλλά και για την παραγωγή ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια με τη στροφή σε περισσότερο οικολογικές μορφές ενέργειας η αιολική αποτελεί μαζί με την υδροηλεκτρική την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα όσον αφορά την εκμετάλλευσή της. Η αιολική ενέργεια προσλαμβάνεται από το περιβάλλον με τις ανεμογεννήτριες (Σχήμα 2.14.). Βασικότερο από αυτά είναι ότι η αιολική ενέργεια προσφέρει ανεξαρτησία από τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με αέριους ρύπους ενώ παράλληλα παρέχει προστασία έναντι της αστάθειας τιμών των ορυκτών καυσίμων. Δεύτερον, είναι ιδιαίτερα φιλική στο περιβάλλον με αμελητέες επιδράσεις στην πανίδα. Επιπλέον, μετά από αρκετά χρόνια χρήσης πλέον έχει αποκτηθεί τεχνογνωσία για να γίνεται γρηγορότερη και καλύτερη συναρμολόγηση και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών και καθίσταται έτσι η αιολική ενέργεια οικονομικά ανταγωνιστική. Τρίτον, έχει χαμηλό λειτουργικό κόστος και είναι ελεύθερη, άφθονη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Τέταρτον, βοηθάει στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας απώλειες μεταφοράς ενέργειας. Πέμπτον, ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία κάθε χώρας καθώς μπορεί η κάθε χώρα να εκμεταλλευτεί τα διαθέσιμα αιολικά δυναμικά της. Όσον αφορά την Ελλάδα έχουν γίνει αρκετές μελέτες τα τελευταία χρόνια όσον αφορά τα διαθέσιμα προς εκμετάλλευση και παραγωγή ενέργειας διαθέσιμα αιολικά δυναμικά. Έκτον, δημιουργεί θέσεις εργασίας στην περιφέρεια και βοηθάει παράλληλα και στο πρόβλημα της ανεργίας γιατί προσφέρει εργασία σε εξειδικευμένους επιστήμονες. Ακόμα, μέσω της αιολικής ενέργειας προσφέρεται ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας με μικρές απώλειες και τέλος η ενέργεια είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη αφού δεν είναι αναγκαίο να διοχετευθεί σε κάποιο κεντρικό δίκτυο διανομής πρώτα.



**Σχήμα 2.14.** Ανεμογεννήτριες στην Ικαρία (“Ανεμογεννήτριες στην Ικαρία,” n.d.).

Ωστόσο υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα όσον αφορά τη χρήση της αιολικής ενέργειας τα οποία πρέπει να αναφερθούν. Ο εκπεμπόμενος θόρυβος που προέρχεται από τα περιστρεφόμενα μηχανικά τμήματα και από την περιστροφή των πτερυγίων εκτιμάται σε περίπου 44 περίπου 44 db σε απόσταση 200 m για ταχύτητα ανέμου 8 m/s. Επομένως ο θόρυβος αποτελεί ένα πρόβλημα για τους κατοίκους των κοντινών περιοχών ή το οικοσύστημα γιατί προκαλεί ηχορύπανση. Αυτό όμως το πρόβλημα αντιμετωπίζεται γιατί πλέον ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται στην ανοιχτή θάλασσα όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη και δε δημιουργούνται αντιδράσεις λόγω του θορύβου. Δεύτερον, η οπτική όχληση είναι κάτι υποκειμενικό αλλά κάποιος που είναι ευνοϊκά διακείμενος απέναντι στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αποδέχεται οπτικά τις ανεμογεννήτριες. Δεδομένου ότι οι ανεμογεννήτριες είναι ορατές από απόσταση, πρέπει να γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσης τους στο τοπίο. Τρίτον, είναι η επίδραση στις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Το 99% της γης που φιλοξενεί ένα αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο για άλλες χρήσεις. Και αυτό το πρόβλημα λύνεται με την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στην ανοιχτή θάλασσα. Τέταρτον, το ποσοστό των πουλιών που σκοτώνονται ετησίως από πρόσκρουση σε ανεμογεννήτριες είναι ασήμαντο (0.5%) σχετικά με το αυτό που οφείλεται σε πρόσκρουση με οχήματα και τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (60%), παρόλα αυτά κάποιος το θεωρούν ως πρόβλημα. Πάντως θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη χωροθέτηση τυχόν προστατευόμενες περιοχές και να εξετάζεται η τοποθέτηση συστήματος υπερήχων. Πέμπτον, πρόβλημα αποτελεί η απρόβλεπτη διακύμανση ενέργειας που δίνουν οι αιολικές μηχανές. Λόγω της στοχαστικής υπόστασης του ανέμου και την ευαισθησία από τις αλληλοεξαρτήσεις με άλλους παράγοντες καθίσταται δύσκολη η πρόγνωση του ανέμου

και επομένως και ο υπολογισμός της αιολικής ενέργειας. Έτσι δε μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η ενέργεια που θα παραχθεί και επίσης δεν είναι σίγουρο ότι θα μπορέσει να καλυφθούν μέσω της αιολικής ενέργειας οι απαιτήσεις της ενέργειας σε περιπτώσεις αιχμής όπως είναι για παράδειγμα σε ζεστές μέρες του καλοκαιριού με τις αυξημένες και απότομες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό το πρόβλημα τείνει να αντιμετωπιστεί εν μέρει με τη χρήση της αιολικής ενέργειας σε υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Τέλος, παρόλο που η τεχνογνωσία είναι μεγάλη πλέον και υπάρχει εμπειρία στον τομέα της αιολικής ενέργειας το κόστος έρευνας του αιολικού δυναμικού και εγκατάστασης της μηχανής είναι ακόμα σχετικά ψηλό.

## 2.6 ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ

Ο άνεμος αποτελεί εάν εκμεταλλευτεί ένα ευεργετικό φαινόμενο για τον άνθρωπο καθώς είναι απαραίτητος για διάφορες λειτουργίες στη ζωή του. Πολλές φορές όμως αποτελεί ένα καταστροφικό φαινόμενο καθώς οι ισχυροί άνεμοι προκαλούν τεράστιες καταστροφές είτε εμφανίζονται μόνοι τους με τη μορφή ανεμοστρόβιλων είτε σε συνδυασμό με καταιγίδες. Οι πιο ισχυροί άνεμοι παρόλα αυτά είναι οι άνεμοι των τροπικών κυκλώνων καθώς στους τροπικούς κυκλώνες εμφανίζονται άνεμοι μεγάλης ταχύτητας, αν και όπως αναλύεται και παρακάτω δεν αποτελούν αυτοί τη βασική αιτία των καταστροφών και των απωλειών ζωών. Όσον αφορά τους καταστροφικούς ανέμους που εμφανίζονται στην ηπειρωτική χώρα, και όχι σε περιοχές που υπάρχει η εμφάνιση τυφώνων, μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την κίνηση που ακολουθούν οι άνεμοι από τους οποίους αποτελούνται με σκοπό να γίνει διάκριση των ζημιών που προκαλούν. Η πρώτη κατηγορία είναι οι άνεμοι των καταιγίδων που ονομάζονται και ευθείς άνεμοι ("straight-line" winds) και περιλαμβάνει οποιονδήποτε άνεμο μπορεί να εμφανιστεί σε μία καταιγίδα και χρησιμοποιείται κυρίως για να περιγράψει τους ανέμους που δεν έχουν περιστροφική κίνηση και να τους διαφοροποιήσει από τους ανεμοστρόβιλους. Οι άνεμοι αυτοί είναι αποτέλεσμα της εκροής που προκαλείται από την καθοδική κίνηση της καταιγίδας. Στην πρώτη κατηγορία, επομένως, κατατάσσονται οι ευθείς άνεμοι (straight winds), οι οποίοι ονομάζονται έτσι για να διαφοροποιηθεί η ζημιά που προκαλούν από τη ζημιά που προκαλείται από την άλλη μορφή των ανέμων, των ανεμοστρόβιλων (The National Severe Storms Laboratory). Οι ισχυροί άνεμοι των καταιγίδων μπορούν να έχουν προέλθει από πολλές διαφορετικές διαδικασίες. Οι πιο ισχυροί όμως από αυτούς που προκαλούν καταστροφές στο έδαφος είναι οι άνεμοι οι οποίοι είναι αποτέλεσμα της εκροής που παράγεται από το καθοδικό ρεύμα της καταιγίδας. Ως επιβλαβείς θεωρούνται οι άνεμοι αυτοί που η ταχύτητα τους ξεπερνάει τα 50-60 μίλια/ώρα (80-100 Χιλιόμετρα/ώρα). Οι άνεμοι αυτοί από στοιχεία των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής μπορούν να φτάσουν τα 100 μίλια/ώρα και να προκαλέσουν καταστροφές που εκτείνονται ακόμα και σε

εκατοντάδες μίλια. Στις 48 πιο χαμηλές πολιτείες της Αμερικής οι καταστροφές που προκαλούν είναι υπεύθυνες για τις μισές αναφορές από τα συνολικά έντονα επεισόδια και είναι πιο καταστροφικές από τις αντίστοιχες των ανεμοστρόβιλων.

### 2.6.1 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ ΑΠΟ ΑΚΡΑΙΟΥΣ ΑΝΕΜΟΥΣ

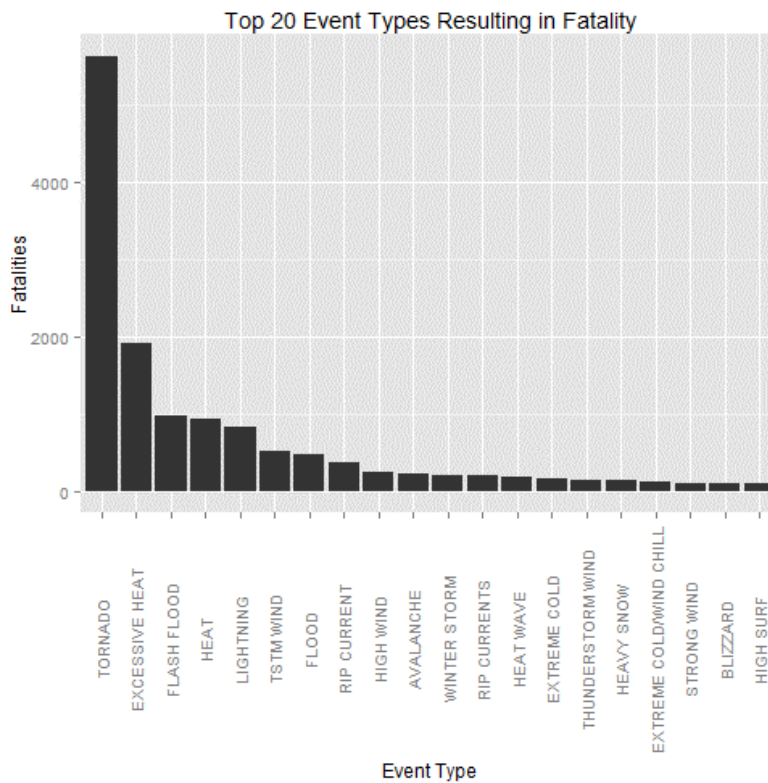
Στην εργασία του, ο Δημάκος (2014) συγκέντρωσε τα καταστροφικά φαινόμενα και δυστυχήματα που έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο εξαιτίας της έντονης ταχύτητας του ανέμου. Τα δεδομένα αναφέρονται σε καταστροφικά φαινόμενα που οφείλονται σε έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα και έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα μέχρι σήμερα. Αυτός τα συγκέντρωσε σε πίνακες ανάλογα με το 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. Καθώς στη διπλωματική εργασία τα γεγονότα δεν είναι ταξινομημένα με βάση την ταχύτητα του ανέμου, στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα γεγονότα που θεωρούνται ως κρισιμότερα με βάση τις απώλειες ζωών που προκλήθηκαν καθώς και την τιμή της ταχύτητας του ανέμου όπου αυτή υπάρχει και είναι αρκετά μεγάλη.



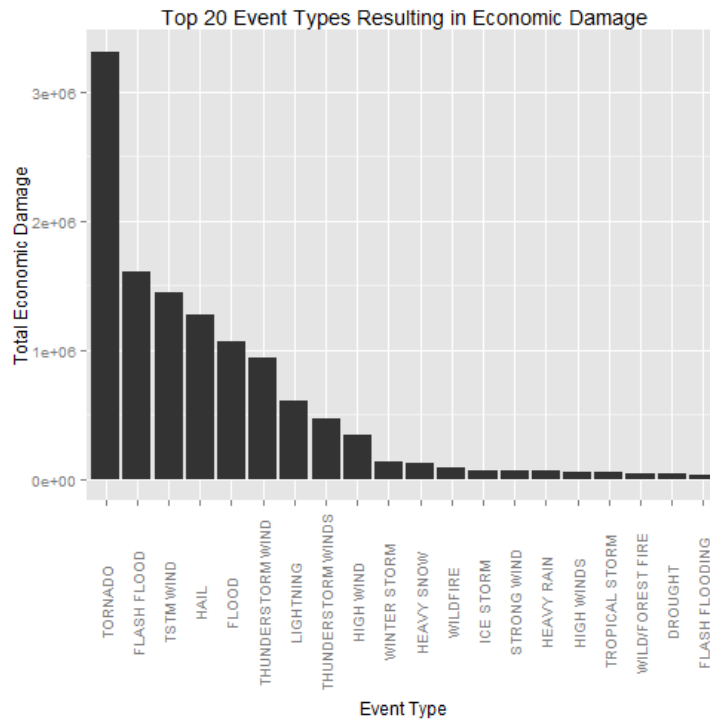
**Πίνακας 2.7.** Τα πιο καταστροφικά φαινόμενα που έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας του ανέμου (Δημάκος, 2014).

<b>Καταστροφικά Φαινόμενα στην Ελλάδα εξαιτίας του Ανέμου</b>						
<b>Έτος</b>	<b>Μήνας</b>	<b>Περιοχή</b>	<b>Γεωγραφικό Μήκος</b>	<b>Γεωγραφικό Πλάτος</b>	<b>Καταστροφικό Φαινόμενο</b>	<b>Θάνατοι</b>
2001	Ιανουάριος	Σαρωνικός	493761.50	4180113.99	Πτώση Ελικοπτέρου	4
2012	Ιανουάριος	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	144.8 km/h	
2008	Ιανουάριος	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	138.4 km/h	
2008	Ιανουάριος	Βόρεια Κρήτη	590588.49	3914501.46	100 km/h	
2012	Φεβρουάριος	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	127.1km/h	
1983	Φεβρουάριος	Κάβο Ντόρο	227913.77	4181286.89	Ανεμοθύελλα	28
1968	Φεβρουάριος	Χανιά	501586.88	3929849.11	Παλιρροϊκό Κύμα	6
1916	Μάρτιος	Μακεδονία	485384.82	4543366.20	Ανεμοθύελλα	10
2010	Μάρτιος	Ρίο	305883.40	4241772.12	100km/h	
2010	Μάρτιος	Πάτρα	301609.39	4235984.42	100km/h	
2003	Μάρτιος	Καλαμάτα	331009.48	4100196.43	100km/h	
1998	Μάρτιος	Ελληνικό	476506.75	4194753.56	120km/h	
2009	Μάρτιος	Ηλεία	267075.01	4213486.40	Ανεμοστρόβιλος	2
2013	Μάρτιος	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	140km/h	
1987	Απρίλιος	Αττική	470778.43	4211414.99	10-11 Beaufort	
1913	Μάιος	Κ. Ελλάδα	328537.52	4370954.84	Ναυάγιο	1
1989	Μάιος	Φλώρινα	280608.51	4517896.48	Ανεμοθύελλα	1
1983	Ιούλιος	Καβάλα	532224.91	4531365.33	Ανεμοθύελλα	7
2010	Νοέμβριος	Λίμνη Πλαστήρα	306404.47	4352039.95	130km/h	
2006	Νοέμβριος	Βόλος	409549.14	4358023.81	71km/h	
2011	Νοέμβριος	Κάβο Ντόρο	227491.37	4181286.89	119km/h	
1955	Νοέμβριος	Σαλαμίνα	455121.56	4196291.29	Ανεμοθύελλα	1
2008	Νοέμβριος	Παρνασσός	379912.55	4265830.07	180km/h	
2008	Δεκέμβριος	Χανιά	502972.71	3928493.95	110km/h	
1966	Δεκέμβριος	Μητρώο Π.	408001.23	2975234.37	Ναυάγιο	240
1969	Δεκέμβριος	Κερατέα	497994.91	4184272.42	Πτώση Αεροσκάφους	90
1979	Δεκέμβριος	Όλυμπος	360651.00	4504357.17	Ανεμοθύελλα	3 ορειβάτες
1901	Δεκέμβριος	Πήλιο	411714.33	4359016.40	105km/h	
1901	Δεκέμβριος	Παρνασσός	379912.55	4265830.07	148km/h	

Οι ανεμοστρόβιλοι και τα άλλα ακραία φαινόμενα που σχετίζονται με τον άνεμο, σύμφωνα με ανάλυση της εθνικής μετεωρολογικής υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (National Weather Service) που διεξήχθη με δεδομένα καταγίδας θεωρούνται ως η βασική αιτία τραυματισμού των ανθρώπων. Επιπλέον αυτά τα φαινόμενα θεωρούνται και η βασική αιτία οικονομικών καταστροφών παρόλο που και οι πλημμύρες θεωρούνται σημαντική αιτία. Οι παρακάτω πίνακες απεικονίζουν τα στοιχεία της μελέτης αυτής. Η μελέτη αυτή είναι αρκετά απλοποιημένη όσον αφορά την εμφάνιση των γεγονότων καθώς θεωρεί κάθε γεγονός ξεχωριστό και δε λαμβάνει υπόψη το συνδυασμό των γεγονότων. Όλα τα σχετιζόμενα με τη βροχή γεγονότα δημιουργούν ένα σημαντικό ανταγωνιστή εάν συνδυαστούν έναντι των σχετιζόμενων με τον άνεμο φαινόμενα. Οι δύο μελέτες παρόλα αυτά δείχνουν την υπεροχή του ανέμου και των προκαλούμενων από αυτόν ακραίων γεγονότων.



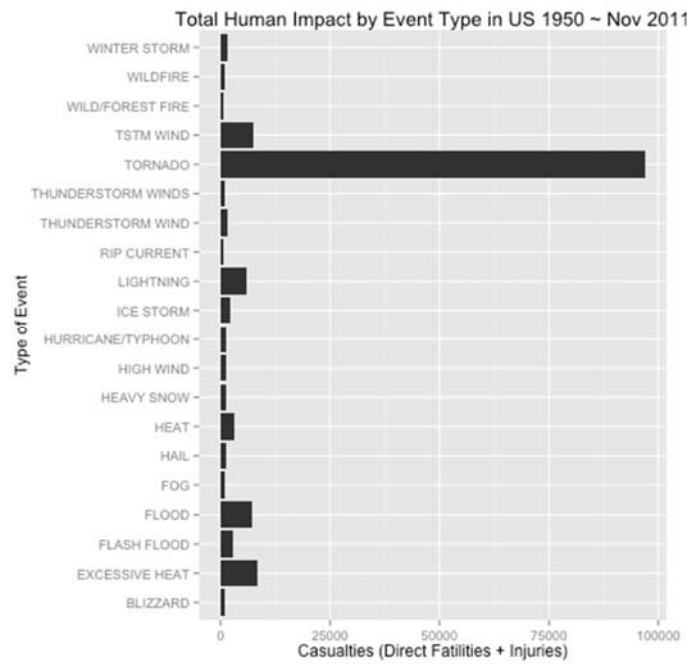
**Σχήμα 2.15.** Το σχήμα παρουσιάζει με τη μορφή ιστογράμματος τα 20 γεγονότα που προκαλούν τη μεγαλύτερη θνησιμότητα (“Tornados and Wind-Related Events a Significant Cause of Harm and Economic Damage,” n.d.).



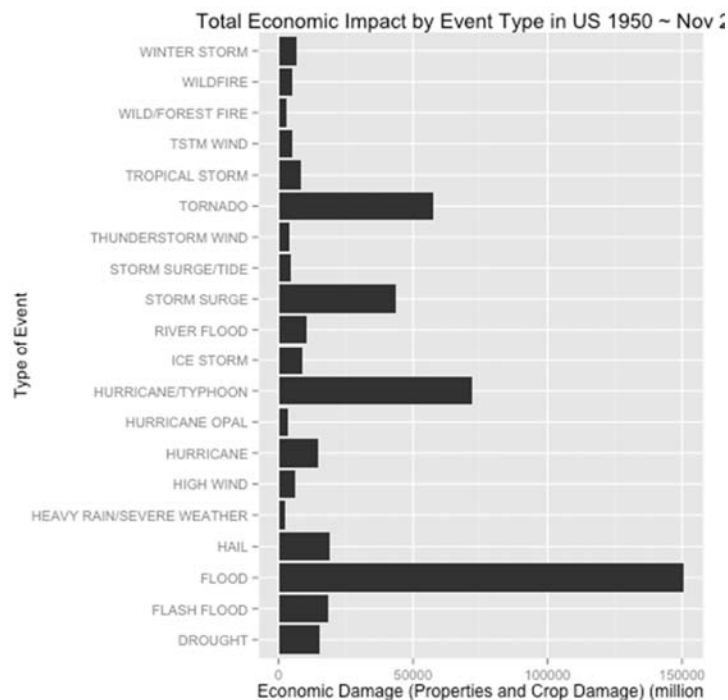
**Σχήμα 2.16.** Το σχήμα παρουσιάζει με τη μορφή ιστογράμματος τις συνολικές καταστροφές που προκλήθηκαν σε καλλιέργειες και σε άλλου είδους ιδιοκτησίες (σπίτια, αυτοκίνητα κ.τ.λ.) (“Tornados and Wind-Related Events a Significant Cause of Harm and Economic Damage,” n.d.).

Παρόμοια μελέτη που βασίστηκε σε δεδομένα της βάσης δεδομένων ακραίων καιρικών φαινομένων του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έδειξε ότι οι ανεμοστρόβιλοι είναι το πιο θανατηφόρο φαινόμενο στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με 96.979 απώλειες και ακολουθούν η υπερβολική ζέστη με 8.428 απώλειες και οι θυελλώδεις άνεμοι με 6.525 απώλειες. Οι απώλειες αναφέρονται συνολικά σε θανάτους και τραυματισμούς. Οι τραυματισμοί είναι 91.346 και οι θάνατοι 5.633. Όσον αφορά την αξία των καταστροφών που προκαλούνται από αυτά τα φαινόμενα το πιο επιζήμιο φαινόμενο είναι οι πλημμύρες με 150 δισεκατομμύρια δολάρια καταστροφές και ακολουθούν οι τυφώνες με 72 δισεκατομμύρια δολάρια και μετά οι ανεμοστρόβιλοι με 50 δισεκατομμύρια δολάρια.

Συνολική επιρροή στον άνθρωπο από τα ακραία φαινόμενα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής για την περίοδο 1950-Νοέμβριο 2011



**Σχήμα 2.17.** Συνολική επιρροή στον άνθρωπο από τα ακραία φαινόμενα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής για την περίοδο 1950-Νοέμβριο 2011 (“Analysis on Public Health and Economic Damage Caused by Severe Weather Events in the United States,” n.d.).



**Σχήμα 2.18.** Αξία σε δισεκατομμύρια δολάρια των καταστροφών που προκαλούνται από τα διάφορα είδη ακραίων φαινομένων (“Analysis on Public Health and Economic Damage Caused by Severe Weather Events in the United States,” n.d.).

Στην κατανομή των ζημιών στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής από καταστροφικά γεγονότα δισεκατομμυρίων δολαρίων σε όλη τη διάρκεια της περιόδου 1980-2014 ρεκόρ κυριαρχούν οι ζημιές λόγω τροπικών κυκλώνων. Στην περίοδο 1980-2014, οι τροπικοί κυκλώνες που έχουν χτυπήσει σε ηπειρωτικές περιοχές έχουν προκαλέσει τη μεγαλύτερη ζημιά (539 δισεκατομμυρίων \$) και έχουν επίσης το υψηλότερο μέσο κόστος εκδήλωσης (15,9 δισεκατομμύρια \$ ανά περίπτωση). Στη συνέχεια ακολουθούν η ξηρασία (206 δισεκατομμύρια \$), οι σφοδρές καταιγίδες (155 δισεκατομμύρια \$) και οι πλημμύρες (88 δισεκατομμύρια \$) έχουν επίσης προκαλέσει σοβαρές ζημιές με βάση τον κατάλογο των εκδηλώσεων των ακραίων γεγονότων με ζημιές δισεκατομμυρίων δολαρίων. Είναι ενδιαφέρον ότι η σφοδρή καταιγίδες είναι υπεύθυνες για τον υψηλότερο αριθμό των καταστροφικών γεγονότων (70), αλλά το μέσο κόστος ανά εκδήλωση είναι από τα χαμηλότερα (2,2 δισεκατομμύρια), αλλά εξακολουθεί να είναι σημαντικό. Οι τροπικοί κυκλώνες και ξηρασία αποτελούν τα φαινόμενα με τη δεύτερη και την τρίτη πιο συχνή εκδήλωση (34 και 22) αντίστοιχα. Αναλυτικά φαίνονται τα στοιχεία αυτά στον Πίνακα 2.8.

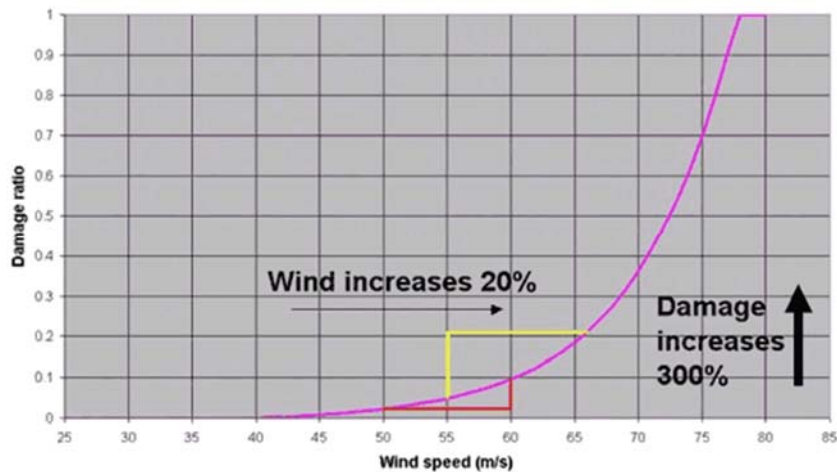
**Πίνακας 2.8.** Ο πίνακας παρουσιάζει τις ζημιές των διαφόρων ακραίων καταστροφικών φαινομένων στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής για την περίοδο 1980-2014 (["Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: Table of Events | National Centers for Environmental Information (NCEI)," n.d.]).

Τύπος καταστροφικού φαινομένου	Αριθμός Γεγονότων	Ποσοστό Εμφάνισης (%)	Συνολικές Ζημιές από καταστροφές (σε δισεκατομμύρια δολάρια \$)	Ποσοστό στις Συνολικές Καταστροφές (%)	Μέσο Κόστος Ζημιών ανά Γεγονός (σε δισεκατομμύρια δολάρια \$)
Τροπικοί Κυκλώνες	34	19.1	539	50.0	15.9
Ξηρασία	22	12.4	206	19.1	9.4
Σφοδρές Καταιγίδες	70	39.3	155	14.4	2.2
Πλημμύρες	20	11.2	88	8.2	4.4
Χιονοθύελλες	13	7.3	37	3.4	2.8
Πυρκαγιές	12	6.7	26	2.4	2.2
Παγετός	7	3.9	25	2.3	3.6

Φαίνεται λοιπόν ξεκάθαρα η υπεροχή των τροπικών κυκλώνων στην πρόκληση ζημιών και οικονομικών καταστροφών μεγαλύτερων από τα άλλα ακραία καιρικά φαινόμενα. Το επόμενο ερώτημα που θα μπορούσε να τεθεί είναι κατά πόσο αυξάνονται οι αναμενόμενες καταστροφές από την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και αν η σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και των καταστροφών είναι γραμμική. Επομένως οι ζημιές που προκαλούνται από έναν τυφώνα μικρής κλίμακας 75μιλίων/ώρα (120χιλιόμετρα/ώρα) είναι οι μισές από αυτές που προκαλούνται από έναν τυφώνα μεγάλης κλίμακας και ταχύτητας 150μιλίων/ώρα (240χιλιόμετρα/ώρα); Η απάντηση είναι όχι τουλάχιστον όσον αφορά στοιχεία για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Οι καταστροφές και οι ζημιές δεν αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της ταχύτητας, αλλά εκθετικά με την αύξηση της ταχύτητας. Ένας τυφώνας με ταχύτητα 150μίλια/ώρα, που είναι κατηγορίας 4 στην κλίμακα Saffir-Simpson, είναι δυνατόν να προκαλέσει ζημιές 250 φορές μεγαλύτερες από από έναν τυφώνα κατηγορίας 1 της κλίμακας Saffir-Simpson. Οι Pielke και Landsea (Pielke and Landsea, 1998), σε μελέτη τους ανέλυσαν τις ζημιές που προκλήθηκαν από τροπικές καταιγίδες και τυφώνες στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής λαμβάνοντας υπόψη τον πληθωρισμό, την αλλαγή στον πλούτου και στον παράκτιο πληθυσμό.

**Πίνακας 2.9.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της μελέτης των Pielke και Landsea (1998) για τις ζημιές που προκαλεί κάθε κατηγορία τυφώνα. (πηγή Central Pacific Hurricane Centre).

Ένταση τυφώνα	Περιπτώσεις Μελέτης	Μέση Ζημιά (σε \$)	Επικείμενη ζημιά σε σχέση με κατηγορίας 1 τυφώνα της κλίμακας Saffir-Simpson
Tropical/Subtropical Storm	118	less than \$1,000,000	0
Hurricane Category 1	45	\$33,000,000	1
Hurricane Category 2	29	\$336,000,000	10
Hurricane Category 3	40	\$1,412,000,000	50
Hurricane Category 4	10	\$8,224,000,000	250
Hurricane Category 5	2	\$5,973,000,000	500



**Σχήμα 2.19.** Ο πίνακας απεικονίζει πως αυξάνεται η αναλογία ζημιών όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου των κυκλώνων (πηγή διαδίκτυο).

Ένα ακόμα ενδιαφέρον συμπέρασμα της μελέτης τους είναι ότι παρόλο που οι μεγάλης έντασης τυφώνες κατηγορίας 3,4,5 αποτελούν το 21% των συνολικών τυφώνων που πλήττουν τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, προκαλούν το 83% των συνολικών καταστροφών.

Οι 5 πιο δαπανηροί τυφώνες στην ιστορία των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής φαίνονται στον Πίνακα 2.10.

**Πίνακας 2.10.** Στον πίνακα αναφέρονται οι 5 τυφώνες που έπληξαν τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και είχαν το μεγαλύτερο κόστος (“Wikipedia, the free encyclopedia,” 2015).

Οι 5 πιο δαπανηροί τυφώνες στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής			
Τυφώνας	Έτος	Κατηγορία στην κλίμακα Saffir-Simpson	Κόστος (σε δισεκατομμύρια δολάρια)
Hurricane Katrina	2005	3	108
Hurricane Sandy	2012	*	71.4
Hurricane Ike	2008	2	29.5
Hurricane Andrew	1992	5	26.5
Hurricane Wilma	2005	3	20.6

Οι 5 πιο θανατηφόροι τυφώνες στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής φαίνονται στον Πίνακας 2.11.

**Πίνακας 2.11.** Στον πίνακα αναφέρονται οι 5 πιο θανατηφόροι τυφώνες που έπληξαν τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Αξιοσημείωτο είναι ότι κανένας τους δεν είναι κατηγορίας 5 στην κλίμακα Saffir-Simpson. Επομένως οι μεγάλες ταχύτητες του ανέμου δεν είναι η βασική αιτία απώλειας ζωών αλλά το κύμα θύελλας που προκαλείται και οι πλημμύρες (“Wikipedia, the free encyclopedia,” 2015).

Οι 5 πιο θανατηφόροι τυφώνες στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής			
Τυφώνας	Έτος	Κατηγορία στην κλίμακα Saffir-Simpson	Θάνατοι (σε χιλιάδες άτομα)
Great Galveston Hurricane	1900	4	8000-12000
Okeechobee Hurricane	1928	4	2500-3000
Hurricane Katrina	2005	3	1500+
Louisiana Hurricane	1893	4	1100-1400
S. Carolina / Georgia	1893	3	1000-2000

Ο μέγιστος σταθερός άνεμος που συνδέεται με τον τροπικό κυκλώνα είναι ένας κοινός δείκτης της έντασης της καταιγίδας. Μέσα σε έναν πλήρως σχηματισμένο τροπικό κυκλώνα, βρίσκεται εντός του τοιχώματος του ματιού του κυκλώνα (eyewall) σε απόσταση που ορίζεται ως η ακτίνα του μέγιστου ανέμου (Radius of Maximum Wind). Σε αντίθεση με τις ριπές του ανέμου, η αξία του μέγιστου σταθερού ανέμου καθορίζεται μέσω δειγματοληψίας και αναγωγής των αποτελεσμάτων της δειγματοληψίας σε μία περίοδο χρόνου. Η μέτρηση του ανέμου έχει τυποποιηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο ώστε να αντανακλά τους ανέμους που πνέουν στα 10 μέτρα (33 πόδια) από την επιφάνεια της Γης και ο μέγιστος συνεχής άνεμος αντιπροσωπεύει τον υψηλότερο μέσο άνεμο είτε ενός λεπτού, αυτό αντιπροσωπεύει στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και χρησιμοποιείται και στο σχεδιασμό των κατασκευών τους, είτε των δέκα λεπτών, αυτός χρησιμοποιείται στην Ευρώπη σε πλήρη εναρμόνιση με



τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό, και οπουδήποτε μέσα στον τροπικό κυκλώνα. Η διαφοροποίηση αυτή είναι σημαντική καθώς ο μέγιστος συνεχής άνεμος του ενός λεπτού είναι 14% μεγαλύτερος από τον μέγιστο συνεχή άνεμο δεκαλέπτου για την ίδια χρονική περίοδο. Οι επιφανειακοί άνεμοι είναι εξαιρετικά μεταβλητοί λόγω της τριβής μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της Γης, και ιδιαίτερα κοντά στους λόφους και τα βουνά πάνω από την ξηρά. Στους ωκεανούς ο μέγιστος συνεχής άνεμος (maximum sustained wind) μέσα σε έναν τροπικό κυκλώνα καθορίζεται από δορυφορικές εικόνες. Επίγεια μέσα, πλοία, παρατηρήσεις από αεροσκάφη αναγνώρισης και απεικονίσεις από ραντάρ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση αυτής της τιμής, η οποία κατατάσσει τον κυκλώνα σε κάποια κατηγορία σύμφωνα με την κλίμακα Saffir-Simpson και δίνει μία εκτίμηση της έντασης και των καταστροφών που μπορεί να προκληθούν.

Ένας τρόπος εκτίμησης του μέγιστου συνεχή ανέμου στους τροπικούς κυκλώνες, ο οποίος και χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια από τα μέσα του 1960 και τη χρήση του πρώτου δορυφόρου είναι μέσω δορυφόρου και χρήση της τεχνικής Dvorak η οποία με ανάγνωση των δορυφορικών εικόνων και αντιστοίχησή τους με διάφορα μοτίβα προσδιορίζει σε πραγματικό χρόνο τη δύναμη ενός τροπικού κυκλώνα. Στις περισσότερες τροπικές λεκάνες αυτή είναι η βασική μέθοδος για τον προσδιορισμό του συνεχή ανέμου των κυκλώνων. Η απόσταση μεταξύ του ματιού του κυκλώνα και των τοιχωμάτων του ματιού και η διαφορά θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί ο μέγιστος συνεχής άνεμος και η πίεση.

Οι 5 τυφώνες με τη μεγαλύτερη ταχύτητα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής φαίνονται στον Πίνακα 2.12.

**Πίνακας 2.12.** Στον πίνακα φαίνονται οι 5 τυφώνες με τις μεγαλύτερες ταχύτητες που έχουν αναφερθεί στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Οι ταχύτητες αυτές είναι οι ταχύτητες υπολογισμένες μέσω δορυφόρων ή προσεγγιστικά ενώ δεν υπάρχουν δεδομένα για τη μέγιστη συνεχή ταχύτητα τους καθώς καταστρέφονται τα μηχανήματα που μετρούν την ταχύτητα του ανέμου κατά τη διέλευση των τυφώνων από τα σημεία (“Wikipedia, the free encyclopedia,” 2015).

Οι 5 τυφώνες με τη μεγαλύτερη ταχύτητα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής

Τυφώνας	Έτος	Κατηγορία στην κλίμακα Saffir-Simpson	Ταχύτητα Ανέμου (σε μίλια/ώρα και σε χιλιόμετρα/ώρα)
Hurricane Camille	1969	5	190
Hurricane Andrew	1992	5	167
Labor Day Hurricane	1935	5	161
Indianola Hurricane	1886	4	155
Hurricane Charley	2004	4	150

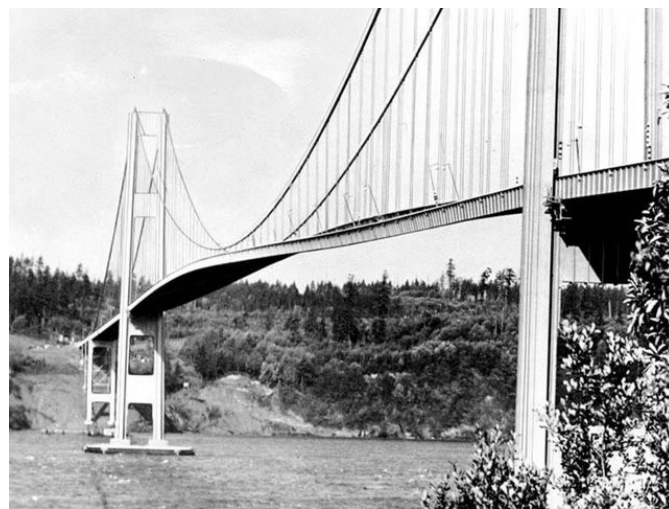
## 2.7 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ

Οι ακραίες περιβαλλοντικές δράσεις είναι από τους βασικότερους παράγοντες προβλημάτων στις κατασκευές και για αυτό το λόγο οι κώδικες των κατασκευών των χωρών συμπεριλαμβάνουν διατάξεις για τη διαστασιολόγησή τους και την προστασία τους από αυτές. Οι κατασκευές ανάλογα με τη σημασία τους και την τοποθεσία τους κατατάσσονται σε κατηγορίες για την προσεκτικότερη διαστασιολόγησή τους. Κάποια κτίρια όπως είναι για παράδειγμα τα νοσοκομεία, αλλά και γέφυρες, αυτοκινητόδρομοι, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας πρέπει να σχεδιάζονται με μεγάλη προσοχή ώστε να παραμένουν λειτουργικά κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες ακραίων περιβαλλοντικών δράσεων, όπως είναι για παράδειγμα σεισμοί, πλημμύρες, χιόνι, αέρας. Βέβαια σε αρκετές περιοχές του κόσμου τα φαινόμενα αυτά είναι περισσότερο ακραία γιατί υπάρχει η εμφάνιση τυφώνων, ανεμοστρόβιλων και άλλων τέτοιων φαινομένων. Υπήρξαν και αρκετές καταστροφές που έκαναν επιτακτικότερη αυτή την ανάγκη για καλύτερο σχεδιασμό των κατασκευών, δείχνοντας ότι σε κάθε κατασκευαστικό κώδικα που αφορά τη σχεδίαση κατασκευών για αντοχή στον άνεμο η ταχύτητα σχεδιασμού του ανέμου αποτελεί βασικό στοιχείο. Όσον αφορά καταστροφές κατασκευών από ακραίους ανέμους από τις πιο γνωστές είναι η κατάρρευση της γέφυρας Τάυ (Σχήμα 2.20) στη Σκωτία στις 28 Δεκεμβρίου 1879. Η καταστροφή θεωρείται ότι οφείλεται σε βίαιη καταιγίδα (άνεμοι με ταχύτητα 10-11 στην κλίμακα Μποφόρ) με ανέμους που φυσούσαν σε ορθή γωνία σε σχέση με τη γέφυρα. Η ταχύτητα του ανέμου μετρήθηκε εκείνη την ημέρα στη Γλασκόβη 71 μίλια/ώρα (114 χιλιόμετρα/ώρα) (μέση τιμή μίας ώρας) και στο Αμπερντίν αλλά όχι στο Νταντί. Επομένως δεν υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις για την πραγματική ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή. Μία σύγχρονη ερμηνεία πάνω στις διαθέσιμες πληροφορίες εικάζουν ότι οι άνεμοι είχαν ριπές έως 80 μίλια/ώρα (129 χιλιόμετρα/ώρα). Η γέφυρα είχε σχεδιαστεί έναντι δυνατών ανέμων αλλά ήρθαν άνεμοι ταχύτητας μεγαλύτερης του σχεδιασμού και έτσι κατέρρευσε.

Μία ακόμα γνωστή κατάρρευση γέφυρας που συνέβη εξαιτίας δυνατών ανέμων και της κακής κατασκευής είναι η κατάρρευση της γέφυρας Τακόμα (Σχήμα 2.21) στην Ουάσιγκτον των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, στις 7 Νοεμβρίου 1940. Η κατάρρευση της γέφυρας αυτής συνέβη όταν έπνεαν στην περιοχή άνεμοι ταχύτητας 40 μιλίων/ώρα (64 χιλιόμετρα/ώρα) και η εξωτερική περιοδική συχνότητα που προερχόταν από τον άνεμο βρήκε τη φυσική συχνότητα της κατασκευής. Ωστόσο η βασική αιτία ήταν πρόβλημα αεροδυναμικής της γέφυρας που είχαν εμφανιστεί από τη φάση της κατασκευής.



**Σχήμα 2.20.** Η αρχική γέφυρα Τάου πριν την κατάρρευση (“Wikipedia, the free encyclopedia,” 2015).



**Σχήμα 2.21.** Η γέφυρα Τακόμα πριν την κατάρρευσή της (“Wikipedia, the free encyclopedia,” 2015).

Επομένως η σωστή πρόγνωση των ταχυτήτων του ανέμου και ιδιαίτερα των ακραίων τιμών του είναι αναγκαία για τις κατασκευές. Η ταχύτητα χρησιμοποιείται σε όλους τους κώδικες των κατασκευών για τον υπολογισμό της πίεσης του ανέμου πάνω στις κατασκευές. Στον κώδικα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται η ριπή του ανέμου των 3 δευτερολέπτων για τον υπολογισμό των φορτίων μέσα από τρεις αναθεωρημένους ανεμολογικούς χάρτες για τρεις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς. Στον κώδικα της Αυστραλίας ομοίως χρησιμοποιείται η ταχύτητα της ριπής του ανέμου των 3 δευτερολέπτων. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και η Αυστραλία έχουν ενσωματώσει στον κώδικα των κατασκευών τους στους ανεμολογικούς τους χάρτες μετά την τελευταία αναθεώρηση τους (ASCE 7-10) και ακραίες ταχύτητες ανέμου που μπορούν να προέρχονται από τους τροπικούς κυκλώνες. Για παράδειγμα σε περιοχές της Αμερικής που πλήττονται από τυφώνες όπως είναι η Χαβάη σχεδιάζονται οι κατασκευές με διαφορετικές ταχύτητες, πιο μεγάλες, από άλλες που δεν εμφανίζονται τυφώνες. Στον ευρωκώδικα χρησιμοποιείται η μέση ταχύτητα 10 λεπτών με πιθανότητα υπέρβασης 50 χρόνων, όπως συμβαίνει και

στους κανονισμούς της Κίνας, Ινδίας και Ντουμπάι. Πιο συγκεκριμένα για το Ντουμπάι η βασική ταχύτητα μέσου χρόνου 10 λεπτών θεωρείται ότι είναι 30μέτρα/δευτερόλεπτο (108χιλιόμετρα/ώρα) που αντιστοιχεί με τις μετατροπές σε 45μέτρα/δευτερόλεπτο (160χιλιόμετρα/ώρα) για μέσο χρόνο 3 δευτερολέπτων. Η ίδια ταχύτητα χρησιμοποιείται και στον κώδικα ISO και για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε η σχέση ανάμεσα στις διάφορες ταχύτητας αναφοράς:

$$1.05V_{ref}^{1h} = V_{ref}^{10min} = 0.84V_{ref}^{1min} = 0.67V_{ref}^{3sec} \quad (6)$$

Η μέση τιμή του 10-λέπτου εκφράζει τη μέση τιμή του ανέμου για 10 λεπτά και αποτελεί δείγμα του συνεχή ανέμου που πνέει σε μία περιοχή. Εάν συγκριθούν οι μέσες ταχύτητες 2-λεπτών και 10-λεπτών του ανέμου συνεχώς ταυτόχρονα, η μέση ταχύτητα 10-λεπτου θα δώσει μια ομαλότερη γραμμή με μικρότερη διακύμανση, ενώ η 2-λεπτου θα είναι πιο μεταβλητή, με υψηλότερες κορυφές και χαμηλότερες στιγμές νηνεμίας. Και οι δύο είναι ενδεικτικές της δύναμης του ανέμου σε μια δεδομένη στιγμή. Η μέση ταχύτητα 10-λεπτου είναι η καλύτερη ένδειξη του συνολικού, μακροπρόθεσμου μέσου ανέμου, ενώ η 2-λεπτου είναι η καλύτερη ένδειξη για τις μικρότερης κλίμακας διακυμάνσεις του ανέμου, περιλαμβανομένων των κορυφών και της νηνεμίας που συμβαίνουν.

Σχετικά με τις μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου για τη χρησιμοποίησή τους σε κατασκευαστικούς κώδικες και την εξαγωγή των μέγιστων ταχυτήτων του ανέμου, ιδανικότερη θα ήταν η συνεχής μέτρηση της μέσης ταχύτητας 10 λεπτών του ανέμου, αλλά αυτό είναι λίγο σπάνιο. Υπάρχουν 4 τύποι δεδομένων του ανέμου, η μέση τιμή 10-λέπτου που μετριέται σε κάποιο χρονικό διάστημα πριν την ώρα, η 10-λεπτη συνεχής μέση, η ωριαία μέση και η συνεχώς μετρούμενη μέγιστη ταχύτητα των ριπών του ανέμου. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο Ευρωκώδικας χρησιμοποιεί τη μέση ταχύτητα 10-λέπτου. Όπως εύκολα φαίνεται η μέση τιμή 10-λέπτου που μετριέται σε μία περίοδο 10 λεπτών πριν την ώρα δεν είναι πραγματικό μέγιστο μέσο. Επιπλέον, ανάλογα με τον αριθμό των μετρήσεων ανά ημέρα που πραγματοποιούνται σε κάθε σταθμό, είναι δυνατόν να συμβαίνει μία μέτρηση κάθε 3 ώρες αμελούνται οι ενδιάμεσες τιμές. Δεδομένα που προκύπτουν από 10λεπτες συνεχείς μετρήσεις είναι το ιδανικό αλλά αυτού του είδους οι μετρήσεις είναι σχετικά πρόσφατες και δεν υπάρχει μεγάλο μήκος δεδομένων. Η μέση ωριαία τιμή είναι η πραγματική μέγιστη τιμή για περίοδο μίας ώρας, όμως μετά η περίοδος θα πρέπει να προσαρμοστεί σε αυτή των μέσων δέκα λεπτών. Τέλος, η ταχύτητα των ριπών του ανέμου που μετριέται συνεχώς είναι πραγματικό μέγιστο.

Οι κώδικες των κατασκευών συνήθως υιοθετούν την κατανομή Gumbel, εκτός από μερικές περιπτώσεις που προτιμάται η κατανομή Fréchet. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση του κώδικά του 1972 Αμερικάνικου Κώδικα των Κατασκευών, όπου η κατανομή Fréchet

χρησιμοποιείται για τις ακραίες ταχύτητες του ανέμου από κάθε κατεύθυνση σε περιοχές που δεν εμφανίζονται τυφώνες

## 2.8 ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Η ανάλυση των στατιστικών στοιχείων της ταχύτητας του ανέμου είναι το πρώτο βήμα προς τον καθορισμό των φορτίων σχεδιασμού του ανέμου στις κατασκευές. Αν και υπάρχουν καθιερωμένες διαδικασίες για το σκοπό αυτό, παραμένει ένα κρίσιμο σημείο λόγω του ότι το φορτίο του ανέμου εξαρτάται με το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμα και ένα μικρό λάθος στην πρόβλεψη των τελευταίων οδηγεί σε σημαντική υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση της τιμής του φορτίου, με συνέπεια είτε τον υποσχεδιασμό είτε το υπερβολικό κόστος της κατασκευής αφού θα σχεδιαστεί για μεγαλύτερα φορτία.

Σε πρακτικές καταστάσεις σχεδιασμού, μπορεί κανείς να επιλέξει ανάμεσα στη χρήση ταχυτήτων ανέμου σχεδιασμού που θα ληφθούν από Κώδικες Σχεδιασμού, ή να πραγματοποιήσει στατιστικές αναλύσεις από διαθέσιμες ανεμολογικές μετρήσεις κατά προτίμηση στο σημείο της κατασκευής και όχι από άλλες μετρήσεις σε κοντινές περιοχές. Η πρώτη προσέγγιση κάνει αρκετά συχνά υπερεκτίμηση του φορτίου σχεδιασμού για διάφορους λόγους. Μεταξύ αυτών είναι η συχνά όχι καλή οριοθέτηση των ακραίων χαρτών ανέμου που διατηρούν οι υπηρεσίες, η έλλειψη τιμών κατεύθυνσης του ανέμου και ο μη υπολογισμός της μορφολογίας του εδάφους σε φαινόμενα επιτάχυνσης ή εξασθένησης του ανέμου. Από την άλλη πλευρά, ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου σχεδιασμού με βάση τα δεδομένα που καταγράφονται δίνει δυνητικά πολύ πιο ακριβείς εκτιμήσεις, αλλά απαιτεί εμπειρία και, φυσικά, την ύπαρξη αξιόπιστων μετρήσεων. Τόσο για τους σκοπούς του καθορισμού καλύτερων χαρτών ακραίου ανέμου και την ενσωμάτωσή τους σε κατασκευαστικούς κώδικες, καθώς και για την ανάλυση του κλίματος του ανέμου σε ένα συγκεκριμένο σημείο, κάποιες υποθέσεις που γίνονται συνήθως, βασίζονται στην ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων του ανέμου.

Ένα ρεύμα αέρα που κινείται με ταχύτητα  $V$ , έχει κινητική ενέργεια  $K$  ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα μάζας, που ορίζεται ως

$$K = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (7)$$

Σε ένα κλειστό ρεύμα αέρα, η συνολική ενέργεια παραμένει σταθερή σε όλα τα σημεία αν αμεληθούν οι απώλειες, και αυτό σημειώνεται από την εξίσωση Bernoulli

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (8)$$

όπου  $p_1, p_2$  είναι οι στατικές πιέσεις σε δύο σημεία του ρεύματος του αέρα,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $V_1, V_2$  οι αντίστοιχες ταχύτητες του αέρα. Όταν μία κατασκευή βρίσκεται σε ένα ρεύμα αέρα, η ταχύτητα του αέρα σταματάει στην προσήνεμη πλευρά, επιταχύνει στις άκρες της κατασκευής και δημιουργεί δίνες στην υπήνεμη πλευρά. Η πίεση στην κατασκευή

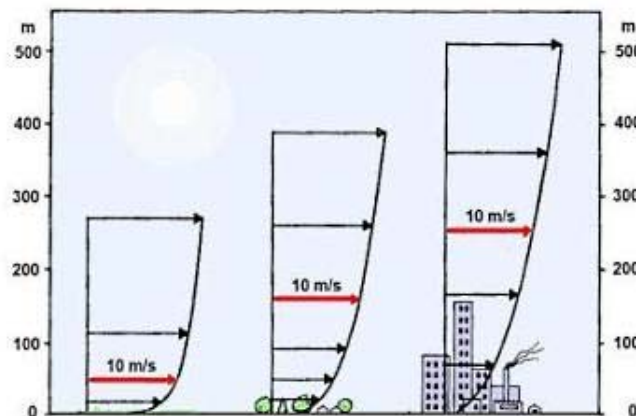
είναι επομένως θετική στην προσήνεμη πλευρά και αρνητική (υποπίεση) οπουδήποτε αλλού.

Σε όλες τις περιπτώσεις η δύναμη του ανέμου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου, και για τον κατασκευαστικό τομέα ισχύει

$$\text{Wind Force} = CV^2 \quad (9)$$

Η δεύτερη επίδραση που έχει ο αέρας στις κατασκευές είναι δυναμική και αυτό σημαίνει ότι με τη συνεχή ροή του αέρα σε μία κατασκευή αυτή θα αρχίσει να ταλαντώνεται.

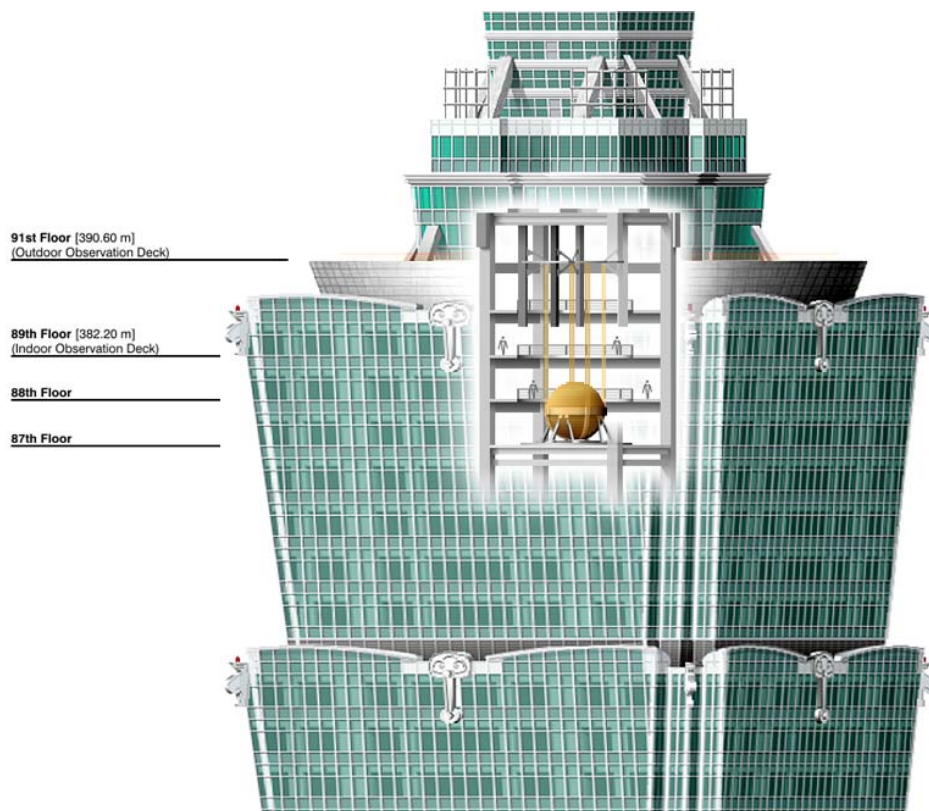
Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με το ύψος που κινείται όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στα υψηλά κτίρια των πόλεων είναι μεγάλη και επομένως κρίνεται αναγκαία η προστασία τους από την ταχύτητα του ανέμου και τις ταλαντώσεις που προκαλούνται από τους ανέμους.



**Σχήμα 2.22.** Αύξηση της ταχύτητας σε σχέση με το ύψος σε διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά (πηγή διαδίκτυο).

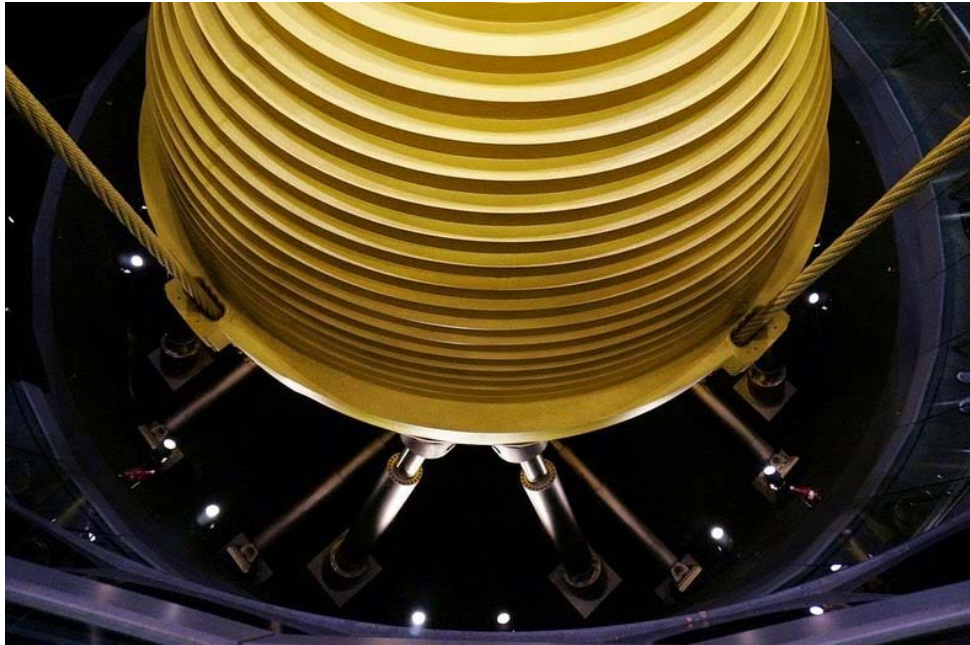
Παλαιότερα η προστασία επιτυγχανόταν με τη χρήση ισχυρής θεμελίωσης και σώματος της κατασκευής. Επειδή όμως ένα υψηλό κτίριο ταλαντώνεται και με ασθενείς ανέμους, με αποτέλεσμα τα τελευταία επίπεδα να βρίσκονται σε συνεχή κίνηση, μία νέα τεχνολογία αναπτύχθηκε για την απόσβεση των ταλαντώσεων με τη χρήση αποσβεστήρων μάζας (Tuned mass Dampers). Ενδεικτικά αναφέρονται οι αποσβεστήρες του κτιρίου Ταϊρεϊ 101, το οποίο έπρεπε να προστατευθεί από ανέμους ταχύτητας 216 χιλιομέτρων την ώρα που πνέουν στην περιοχή.

Στο Σχήμα 2.23 και Σχήμα 2.24, Σχήμα 2.23 φαίνεται ο αποσβεστήρας (πηγή Wikipedia.org).



**Σχήμα 2.23.** Ο αποσβεστήρας ανέμου στο κτίριο Taipei 101 (“The 728-Ton Tuned Mass Damper of Taipei 101 | Amusing Planet,” n.d.).





**Σχήμα 2.24.** Ο αποσβεστήρας ανέμου στο κτίριο Taipei 101 (“The 728-Ton Tuned Mass Damper of Taipei 101 | Amusing Planet,” n.d.).

### 3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ (EXTREME VALUE THEORY)

---

Η κλασική θεωρία των Ακραίων Τιμών στην οποία επιλέγονται οι μέγιστες τιμές σε κάποια χρονική περίοδο (συνήθως η χρονική περίοδος είναι ένα έτος και η μέθοδος ονομάζεται *annual maxima*) και ύστερα προσαρμόζονται σε ασυμπτωτικές κατανομές, δε χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία αλλά αναφέρεται με σκοπό παρουσιαστεί μία ολοκληρωμένη βιβλιογραφία πάνω στη μελέτη των ακραίων τιμών. Στη διπλωματική εργασία γίνεται ανάλυση των ακραίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου με τη μέθοδο άνω κατωφλίου (Peak Over Threshold). Η θεωρία των Ακραίων Τιμών (EVT) είναι ένας κλάδος της στατιστικής που έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη και μελέτη στοχαστικών μοντέλων με σκοπό την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την εμφάνιση πολύ μεγάλων ή πολύ μικρών τιμών, δηλαδή ακραίων και σπάνιων γεγονότων. Τα γεγονότα αυτά απέχουν πολύ από τη μέση τιμή των παρατηρήσεων που μελετώνται, σε τυχαία πειράματα, σε αντίθεση με την κλασική στατιστική την οποία ενδιαφέρει η μέση συμπεριφορά της στοχαστικής διαδικασίας, δηλαδή τιμές οι οποίες βρίσκονται κοντά στη μέση τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Οι μέθοδοι των ακραίων τιμών είναι στατιστικές μέθοδοι που αναλύουν, όπως είναι εμφανές τις ακραίες τιμές μίας διεργασίας.

Η θεωρία των ακραίων τιμών μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη:

1. Το πιθανοθεωρητικό μέρος, που αφορά τη μελέτη της στοχαστικής συμπεριφοράς ακραίων παρατηρήσεων
2. Το στατιστικό μέρος, που αποτελείται από μοντέλα ερμηνείας, εκτιμήσεων και προβλέψεων ακραίων συμβάντων με βάση πραγματικά δεδομένα (Boutsikas, 2008; Νεραντζάκη, 2012).

Η θεωρία των Ακραίων Τιμών βρίσκει εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς της καθημερινότητας. Χρησιμοποιείται ευρέως από τους υδρολόγους και τους υδραυλικούς μηχανικούς για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με υδρολογικές μεταβλητές, όπως πλημμύρες ή ξηρασία, με σκοπό τον καλύτερο σχεδιασμό μεγάλων υδραυλικών έργων όπως φράγματα, ταμιευτήρες, υδροηλεκτρικά έργα, αντιπλημμυρικά έργα, την προστασία από μεγάλες πλημμύρες που έχουν ως αποτέλεσμα απώλειες ζώων και καταστροφές περιουσιών και ακόμα τον υπολογισμό της συχνότητας εμφάνισης των ακραίων αυτών γεγονότων που είναι εξίσου σημαντική με το μέγεθος των γεγονότων αυτών.

Χρησιμοποιείται ακόμα στη Μετεωρολογία για την εκτίμηση ακραίων καιρικών συνθηκών που επηρεάζουν τη ζωή του ανθρώπου όπως είναι ακραία φαινόμενα βροχόπτωσης,

θερμοκρασίας, χιονόπτωσης, ανέμου και τη συχνότητα εμφάνισης τους. Ο βασικός σκοπός αυτής της ανάλυσης των ακραίων για τον τομέα της μετεωρολογίας είναι οι πιο ακριβείς προβλέψεις.

Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή της Θεωρίας των Ακραίων τιμών είναι στην αντοχή των υλικών για την ανάλυση της επιρροής του μεγέθους. Σε πολλά προβλήματα που πρέπει να ελεγχθούν αντοχές μεγάλων κατασκευών, δημιουργούνται εργαστηριακά μοντέλα από τα οποία εξάγονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών συμπεράσματα για τις αντοχές των πραγματικών κατασκευών. Η Θεωρία των Ακραίων τιμών είναι πολύ χρήσιμη στην ανάλυση της επιρροής του μεγέθους και στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Εάν η αντοχή μίας κατασκευής καθορίζεται ή επηρεάζεται από την αντοχή του πιο αδύναμου κομματιού της στο οποίο μπορεί να διαιρεθεί, τότε το πιο αδύναμο μικρό κομμάτι της καθορίζει την αντοχή ολόκληρης της κατασκευής. Επομένως, στατιστικά τα μεγάλα κομμάτια είναι πιο αδύναμα από τα πιο μικρά. Πέρα από την ανάλυση της επιρροής του μεγέθους η Θεωρία Ακραίων τιμών βρίσκει εφαρμογή στην αξιοπιστία συστημάτων, δηλαδή στη μελέτη καταστροφικών βλαβών ή αποτυχιών μηχανημάτων ή εξαρτημάτων. Μελετώνται δηλαδή αποτυχίες που γίνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα από την έναρξη λειτουργίας τους, πολύ πριν το μέσο χρόνο λειτουργίας ή ζωής τους.

Εφαρμογή έχει ακόμα στο σχεδιασμό μεγάλων αυτοκινητόδρομων τόσο για το μέγεθός τους όσο και για το κόστος κατασκευής τους αναλόγως με τη χρήση τους όσο και με τη συχνότητα δημιουργίας μπουτιλιαρίσματος.

Ευρεία εφαρμογή έχει ακόμα στα οικονομικά, σε απαιτήσεις πολύ μεγάλων αποζημιώσεων, ή σε πολύ μεγάλες ζημιές σε χαρτοφυλάκια που περιέχουν τίτλους των οποίων η αξία μπορεί να επηρεάζεται από ακραία ή γενικότερα σπάνια συμβάντα.

Οι εφαρμογές είναι αρκετές. Μία τελευταία που αξίζει να αναφερθεί καθώς η μελέτη αυτή εστιάζει και σε αυτό το κομμάτι, είναι η εφαρμογή της στις κατασκευαστικές διατάξεις. Οι σύγχρονοι κώδικες όπως έχει αναφερθεί πάλι παρέχουν πληροφορίες για τους ακραίους ανέμους σε σχέση με την περίοδο επαναφοράς τους και τα φορτία που προκαλούν πάνω στις κατασκευές. Οι άνεμοι που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των κατασκευών, είναι εκτιμήσεις για τους πιθανούς ακραίους ανέμους που μπορεί να συμβούν στην περιοχή της κατασκευής σε κάποια περίοδο επαναφοράς. Προφανώς, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και το κόστος κατασκευής. Τα φορτία ανεμολογικών πιέσεων από φαινόμενα όπως ο άνεμος χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση πιθανών μέγιστων φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της ζωής της. Έτσι μία υποεκτίμηση των φορτίων σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα στην κατασκευή ή ακόμα και κατάρρευσή της, αλλά από την άλλη μία υπερεκτίμηση οδηγεί σε υψηλό κόστος κατασκευής. Είναι αναγκαία επομένως η γνώση των στατιστικών

χαρακτηριστικών των ακραίων φορτίων. Το ίδιο ισχύει και για τα σεισμικά φορτία που μπορεί να ασκηθούν σε μία κατασκευή τα οποία παρουσιάζουν ομοιότητα στην εμφάνιση και στην επιρροή που έχουν πάνω στις κατασκευές με αυτά από τον άνεμο. Για την εκτίμηση της επιρροής των φαινομένων αυτών σε κατασκευές πραγματοποιούνται εργαστηριακά πειράματα με μοντέλα κατασκευών πανομοιότυπα με τις πραγματικές που υπόκεινται σε φορτία που λαμβάνονται από ανεμολογικούς και σεισμικούς χάρτες. Οι χάρτες που παρέχουν εκτιμήσεις των τιμών των φορτίων έχουν δημιουργηθεί από το συνδυασμό πραγματικών μετρήσεων και πιθανοτικών μοντέλων τα οποία φυσικά χρησιμοποιούν και τη Θεωρία των Ακραίων Τιμών.

Για να βρεθεί η οριακή κατανομή των μεγίστων (και ελαχίστων) υπάρχουν δύο τάξεις κατανομών ακραίων τιμών. Η πρώτη ονομάζεται Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών με τρεις παραμέτρους και εισήχθη από τον Jenkinson (Jenkinson, 1955) και περιλαμβάνει το θεώρημα Fischer-Tippett, για τη σύγκλιση των μεγίστων τιμών, για να προσδιορίσει τις κατανομές συχνότητας των μεγαλύτερων τιμών μετεωρολογικών δεδομένων όταν είναι άγνωστη η οριακή μορφή της κατανομής ακραίων τιμών. Η δεύτερη ονομάζεται Γενικευμένη Κατανομή Pareto, απεδείχθη από τους Balkema και de Haan (Balkema and Haan, 1974) και από τον Pickands (James Pickands III, 1975). Περιλαμβάνει το θεώρημα Balkema και de Haan (1974). Απέδειξαν ότι η οριακή έκφραση για τις διαβαθμισμένες υπερβάσεις της τυχαίας μεταβλητής  $X$  πάνω από ένα υψηλό κατώφλι  $u$  μπορεί να προσεγγιστεί από τη Γενικευμένη Κατανομή Pareto (Νεραντζάκη, 2012).

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ

Σύμφωνα με τη Θεωρία Ακραίων Τιμών είναι γνωστό ότι για δεδομένο αριθμό  $n$  ανεξάρτητων ταυτοτικά κατανεμημένων τυχαίων μεταβλητών, η μεγαλύτερη από αυτές

$Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$  ακολουθεί συνάρτηση πιθανότητας

$$H_n(x) = [F(x)]^n \quad (10)$$

Αφού

$$\begin{aligned} H_n(x) &= P(X \leq x) = P[\max(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \leq x] \\ &= P(Y_1, Y_2, \dots, Y_n \leq x) = [F(x)]^n \end{aligned} \quad (11)$$

Όπου  $F(x) = P(Y_1 \leq x)$  είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των  $Y_i$  και αναφέρεται συνήθως ως μητρική κατανομή. Εάν το  $n$  δεν είναι σταθερό, αλλά μπορεί να θεωρηθεί ως πραγματοποίηση μίας τυχαίας μεταβλητής με κατανομή Poisson και μέση τιμή  $\nu$  τότε η κατανομή της μεταβλητής  $X$  (Cunnane, 1988; Todorovic, 1978) γίνεται σύμφωνα με τον Koutsoyiannis (2004),

$$H'_\nu(x) = \exp\{-\nu [1 - F(x)]\} \quad (12)$$

Όμως :

$$\begin{aligned} \ln[F(x)]^n &= n \ln\{1 - [1 - F(x)]\} = n\{-[1 - F(x)] - [1 - F(x)]^2 - \dots\} \\ &\approx -n[1 - F(x)] \end{aligned} \quad (13)$$

κάνοντας χρήση του αναπτύγματος Taylor όπου  $\ln(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots$  και θέτοντας όπου  $x$  το  $-[1 - F(x)]$ . Άρα ισχύει ότι για μεγάλα  $n$ , ή μεγάλα  $F(x)$ ,  $H_n(x) \approx H'_n(x)$ . Αριθμητική έρευνα δείχνει ότι ακόμα και για σχετικά μικρά  $n$  η διαφορά μεταξύ  $H_n(x)$  και  $H'_n(x)$  δεν είναι σημαντική.

Στις υδρολογικές εφαρμογές που αφορούν την κατανομή των ετήσιων μέγιστων βροχής ή πλημμύρας, μπορεί να υποθεθεί ότι ο αριθμός  $Y_i$  (π.χ. ο αριθμός των μεγίστων κατακρημνίσεων ή των παροχών πλημμύρας) δεν είναι σταθερός, άρα το μοντέλο Poisson μεταξύ των  $H_n(x)$  και  $H'_n(x)$ , μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εξίσωση (12) είναι κατάλληλο μοντέλο για κάθε υδρολογική εφαρμογή. Όμως οι εξισώσεις (10) και (10) των οποίων η αξιολόγηση απαιτεί να είναι γνωστή η μητρική κατανομή, δε χρησιμοποιούνται στην υδρολογική στατιστική. Αντί για αυτές, στον τομέα αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί ασυμπτωτικές ή οριακές κατανομές ακραίων τιμών, οι οποίες λαμβάνονται από τις παραπάνω εξισώσεις όταν το  $n$  τείνει στο άπειρο. Ουσιαστικά δε βασίζεται στην  $F$ , αλλά προσεγγίζεται η κατανομή για μεγάλο  $n$ , ανεξαρτήτως της  $F$  (Νεραντζάκη, 2012).

Στη μελέτη των μεγίστων μίας τυχαίας μεταβλητής, η θεωρία Ακραίων Τιμών παίζει τον ίδιο θεμελιώδη ρόλο που παίζει το κεντρικό οριακό θεώρημα στη μελέτη αθροισμάτων τυχαίων μεταβλητών. Και στις δύο περιπτώσεις τα θεωρήματα λένε σε ποιες κατανομές συγκλίνουν.

Γενικά υπάρχουν δύο τρόποι για την εξαγωγή των μεγίστων από πραγματικά δεδομένα. Ο πρώτος παίρνει τη μέγιστη τιμή από κάθε περίοδο, η οποία ονομάζεται εποχή. Στα ανεμολογικά δεδομένα η κάθε εποχή οριζόταν παλαιότερα ίση με ένα έτος και έτσι εξάγονταν τα ετήσια μέγιστα (annual maxima) από τα οποία δημιουργούνταν και οι χρονοσειρές ετήσιων μεγίστων (annual maximum series) προς ανάλυση.

Έστω  $M_n$  το σύνολο των μεγίστων ορθά κανονικοποιημένων τιμών  $X_i$  που προκύπτουν με την πρώτη μέθοδο από τις μέγιστες τιμές σε διακεκριμένες εποχές  $M_n = \max \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , με  $n \rightarrow \infty$ , όπου  $n$  το μέγεθος του υποδείγματος (block).

Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει την επιλογή όλων των τιμών εκείνων που υπερβαίνουν ένα επιλεγμένο κατώτερο όριο και ονομάζεται Ανάλυση Άνω Κατωφλίου (Peak Over Threshold Analysis). Η μέθοδος των ετήσιων μεγίστων είναι η πιο κλασική μέθοδος για ανάλυση δεδομένων με εποχικότητα όπως είναι για παράδειγμα οι υδρολογικές μεταβλητές. Ωστόσο όπως αναλύεται και αναλυτικότερα παρακάτω η δεύτερη μέθοδος έχει

περισσότερα πλεονεκτήματα και χρησιμοποιείται ευρέως πλέον. Για τη δεύτερη μέθοδο ισχύει:

$\{X_i - u | X_i > u\}$ , όπου  $u$  το κατώτερο όριο

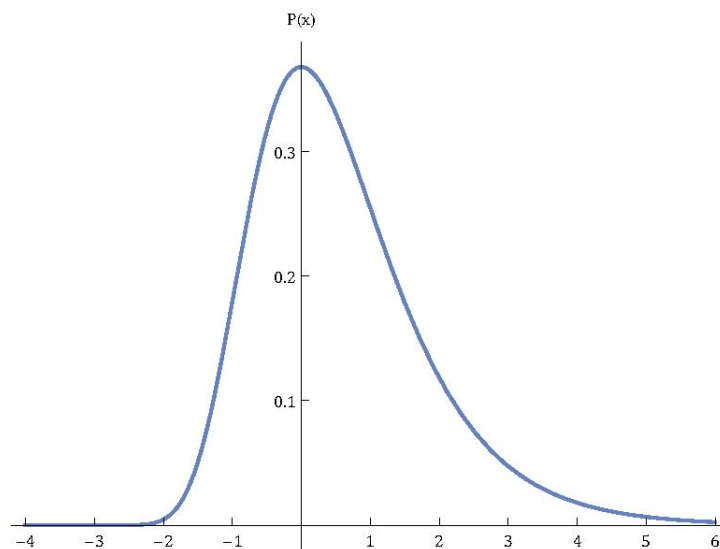
Η επιλογή των μεγίστων της ταχύτητας του ανέμου στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε με τη μέθοδο του άνω κατωφλίου (Peak Over Threshold).

## 3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ

Ο οριακός νόμος για τα μέγιστα, έστω  $M_n$  το σύνολο των μεγίστων ορθά κανονικοποιημένων τιμών του δείγματος, όπως επιλέχτηκαν από κάθε εποχή και ονομάστηκε παραπάνω δίνεται από το θεώρημα Fischer-Tippett (1928) και Gnedenko (1943). Σύμφωνα με το θεώρημα αυτό έστω τυχαία μεταβλητή  $Y$  (ή, αντίστοιχα, η κατανομή της  $F$ ) ανήκει στο πεδίο έλξης μίας κατανομής ακροτάτων  $H$  εάν υπάρχουν ακολουθίες  $c_n > 0$ ,  $d_n \in \mathbb{R}$  και  $\frac{M_n - d_n}{c_n} \xrightarrow{d} H$  και συμβολίζεται με  $Y$  ή  $F \in \text{MDA}(H)$ . Με άλλα λόγια, εάν η κατανομή των μεγίστων του δείγματος μίας δεδομένης κατανομής συγκλίνει σε έναν από τους τρεις τύπους, τότε ανήκει στο πεδίο έλξης των  $\Lambda(x)$ ,  $\Psi_\alpha(x)$ ,  $\Phi_\alpha(x)$ .

1. Τύπος 1. Κατανομή τύπου Gumbel με συνάρτηση

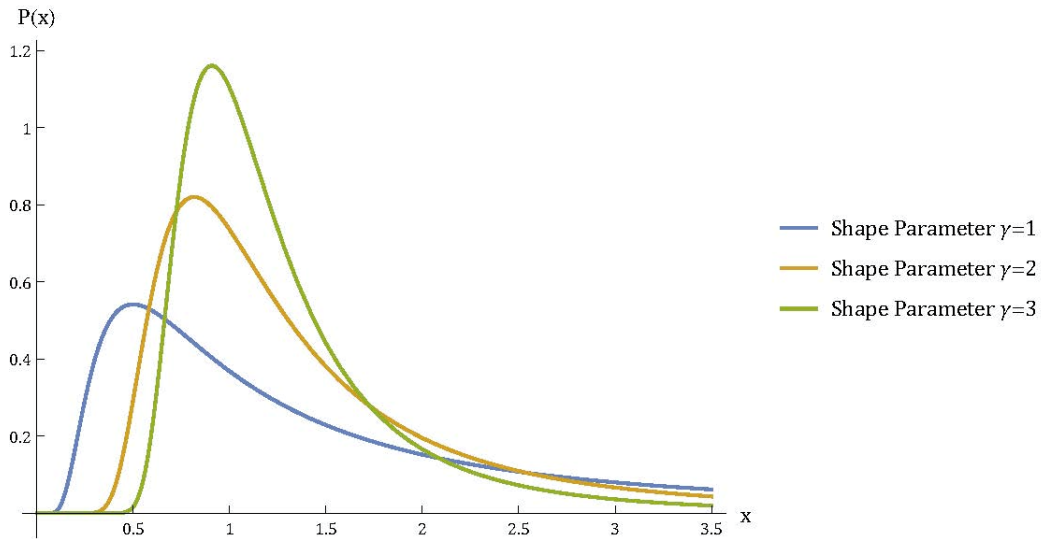
$$\Lambda(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{x-a}{\beta}\right)\right)\right), x \in \mathbb{R} \quad (14)$$



**Σχήμα 3.1.** Διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας κατανομής τύπου Gumbel με παράμετρο θέσης  $\alpha=0$  και παράμετρο κλίμακας  $\beta=1$ .

## 2. Τύπος 2. Κατανομή τύπου Fréchet με συνάρτηση

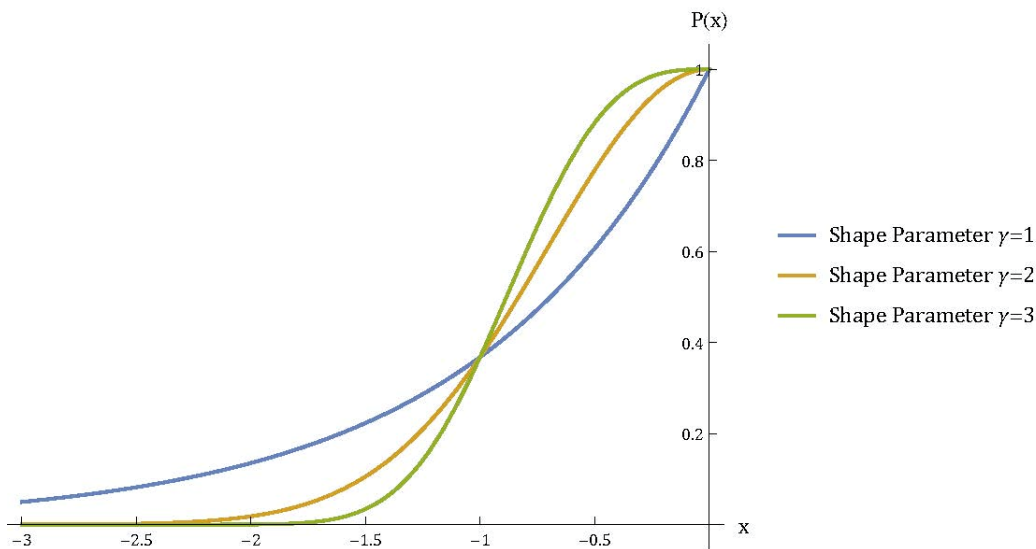
$$\Phi_{\alpha}(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\left(\frac{x-a}{\beta}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right), x \geq a \quad (15)$$



**Σχήμα3.2.** Διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας κατανομής τύπου Fréchet για διάφορες τιμές της παραμέτρου σχήματος  $\gamma$

## 3. Τύπος 3. Κατανομή Τύπου Weibull με συνάρτηση

$$\Psi_{\alpha}(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\left(-\frac{x-a}{\beta}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right), x \leq a \quad (16)$$



**Σχήμα3.3.** Διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας κατανομής τύπου Weibull για διάφορες τιμές της παραμέτρου σχήματος  $\gamma$

Οι κατανομές  $\Phi_\alpha, \Psi_\alpha, \Lambda$  καλούνται τυπικές κατανομές ακροτάτων, ενώ κατανομές που είναι του ίδιου τύπου με αυτές καλούνται κατανομές ακροτάτων.

Παρατηρείται ότι η κατανομή Fréchet έχει πολυωνυμικά φθίνουσα ουρά και επομένως και επομένως ταιριάζει καλύτερα σε κατανομές με βαριές ουρές. Η εκθετικά φθίνουσα ουρά της κατανομής Gumbel χαρακτηρίζει λεπτές ουρές. Τέλος, η κατανομή Weibull είναι η ασυμπτωτική ουρά κατανομών με άνω όριο.

### 3.3 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ

Οι Von Mises (1936) και Jenkinson (1955), ανέπτυξαν μία συμπυκνωμένη θεωρία κατανομών ακραίων τιμών σύμφωνα με την οποία και οι τρεις ασύμπτωτες μπορούν να περιγραφούν από μία οικογένεια κατανομών που καλείται ΓΑΤ-Γενικευμένη κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV- Generalized Extreme Value Distribution) και περιγράφεται από τη σχέση:

$$H(x) = \exp\left(-\left(1 + \gamma\left(\frac{x-a}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\gamma}}\right)\right), x > \frac{a-\beta}{\gamma}, \gamma > 0 \quad (17)$$

όπου  $\alpha, \beta > 0$  και  $\gamma > 0$  είναι παράμετροι θέσης, κλίμακας και σχήματος αντίστοιχα. Το διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής φαίνεται παρακάτω.

Ο Leadbetter, (Leadbetter, 1974) έδειξε ότι αυτό ισχύει όχι μόνο για τα μέγιστα ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών, αλλά και για εξαρτημένες τυχαίες μεταβλητές, με την



προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει μακρόχρονη εξάρτηση των υπερβάσεων υψηλών επιπέδων (Νεραντζάκη, 2012).

Όταν το  $\gamma > 0$ , η  $H(x)$  αντιπροσωπεύει την κατανομή μεγίστων τύπου II. Σε αυτή την περίπτωση, η μεταβλητή είναι κάτω φραγμένη και μη άνω φραγμένη. Ειδική περίπτωση ισχύει όταν το κατώτατο όριο γίνει μηδέν ( $\alpha = 1/\gamma$ ). Αυτή η ειδική δι-παραμετρική κατανομή έχει την απλοποιημένη μορφή:

$$H(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right), x \geq a \quad (18)$$

Η τελευταία είναι η κατανομή Fréchet (βλέπε Σχέση 15)

Η οριακή περίπτωση  $\gamma = 0$  αντιπροσωπεύει την κατανομή μεγίστου τύπου I ή κατανομή Gumbel (βλέπε Σχέση 14). Έτσι η εξίσωση GEV παίρνει τη μορφή

$$H(x) = \exp\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right), x \in \mathbb{R} \quad (19)$$

που είναι μη φραγμένη άνω και κάτω ( $-\infty < x < +\infty$ ).

Τέλος, όταν  $\gamma < 0$ , η  $H(x)$  αντιπροσωπεύει τον τύπο III κατανομής μεγίστων ή αντίστροφη Weibull (βλέπε Σχέση 16) που έχει τη μορφή:

$$H(x) = \exp\left(-\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right), x < \alpha \quad (20)$$

Όμως ο τύπος αυτός δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον και νόημα στη μετεωρολογία, καθώς αναφέρεται σε τυχαίες μεταβλητές άνω φραγμένες. Αν και έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες για την εφαρμογή σε ακραίες ταχύτητες του ανέμου πιστεύεται ότι ο άνεμος είναι ανεξέλεγκτος και δε μπορεί να τεθεί κάποιο άνω όριο καθώς είναι πιθανό να εμφανιστεί κάποια στιγμή μεγαλύτερη ταχύτητα από τις ήδη παρατηρημένες. Θα μπορούσε πιθανότατα να χρησιμοποιηθεί σε μελέτες όπου μελετώνται οι πιθανότητες εμφάνισης ακραίων ελαχίστων, όπως για παράδειγμα σε μελέτες ξηρασίας, όπου επειδή είναι άνω φραγμένη θεωρείται λογική επιλογή (Koutsoyiannis, 2004).

Οι Jenkinson (1955) και von Mises (1954) πρότειναν την ακόλουθη έκφραση της Γενικευμένης Εξίσωσης των Ακραίων Τιμών με μία παράμετρο για την απεικόνιση των τριών οριακών αυτών κατανομών.

$$H_{\gamma}(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left(1+\gamma x\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right), \gamma \neq 0 \\ \exp(-\exp(-x)), \gamma = 0 \end{cases} \quad (21)$$

με  $x$  τέτοιο ώστε  $1 + \gamma x > 0$ . Για  $\gamma = \alpha^{-1}$  προκύπτει η κατανομή Fréchet, για  $\gamma = -\alpha^{-1}$  προκύπτει η κατανομή Weibull και για την οριακή περίπτωση που  $\gamma = 0$  προκύπτει η κατανομή Gumbel.

### 3.4 ΠΕΔΙΑ ΕΛΞΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ

Ισχύει επομένως ότι η οριακή κατανομή ενός κανονικοποιημένου μεγίστου  $\frac{M_n - d_n}{c_n}$  των  $X_i$  έχει τον ίδιο τύπο με μία από τις  $\Lambda(x)$ ,  $\Psi_\alpha(x)$ ,  $\Phi_\alpha(x)$ , δηλαδή σε κάθε κατανομή  $F$  των  $X_i$ , θα αντιστοιχεί μία μοναδική οριακή κατανομή, μία από τις  $\Lambda(x)$ ,  $\Psi_\alpha(x)$ ,  $\Phi_\alpha(x)$  (αρκεί το  $\frac{M_n - d_n}{c_n}$  να συγκλίνει). Το ερώτημα που δημιουργείται τώρα είναι σε ποιες κατανομές  $F$  αντιστοιχεί η  $\Phi_\alpha$ , σε ποιες η  $\Psi_\alpha$ , και σε ποιες η  $\Lambda$ .

Μία τυχαία μεταβλητή  $X$  (ή αντίστοιχα η κατανομή της,  $F$ ) ανήκει στην περιοχή έλξης μίας κατανομής ακροτάτων  $G$  αν υπάρχουν ακολουθίες  $c_n > 0$ ,  $d_n \in \mathbb{R}$  έτσι ώστε η  $\frac{M_n - d_n}{c_n} \xrightarrow{d} G$  (συμβολικά,  $X$  ή  $F \in \text{MDA}(G)$ ).

Μία θετική συνάρτηση  $h$  στο  $(0, \infty)$  καλείται ομαλής κύμανσης (regularly varying) στο  $\infty$  με δείκτη  $\alpha$  και συμβολίζεται με  $h \in \mathbb{R}_\alpha$ , αν για κάθε  $x > 0$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{h(tx)}{h(x)} = t^\alpha, t \geq 0 \quad (22)$$

Η ομαλή κύμανση έχει την έννοια ότι η κατανομή προσομοιάζει με συνάρτηση δύναμης κοντά στο άπειρο, δηλαδή η ουρά της κατανομής είναι βαριά.

Αν  $\alpha = 0$  τότε καλείται βραδείας κύμανσης (slowly varying)

Αν  $\alpha = -\infty \Leftrightarrow t^\alpha = \begin{cases} \infty, & \text{αν } t \in (0, 1) \\ 0, & \text{αν } t \in (1, \infty) \end{cases}$  καλείται ταχείας κύμανσης (rapidly varying)

Ενδεικτικά,

Συναρτήσεις βραδείας κύμανσης: οι σταθερές συναρτήσεις, οι συναρτήσεις που συγκλίνουν σε μία σταθερά (στο  $\infty$ ) και συναρτήσεις που μεταβάλλονται πολύ αργά στο  $\infty$  όπως η λογαριθμική συνάρτηση κ.ο.κ.

Συναρτήσεις ομαλής κύμανσης είναι για παράδειγμα οι συναρτήσεις  $x^\alpha$ ,  $x^\alpha \ln(1+x)$  κ.ο.κ.

Συναρτήσεις ταχείας κύμανσης είναι για παράδειγμα οι εκθετικές συναρτήσεις  $e^{-x}$ .

Κάθε συνάρτηση  $h \in \mathbb{R}_\alpha$ ,  $\alpha \in \mathbb{R}$  μπορεί να γραφεί ως

$$h(x) = x^\alpha L(x) \quad (23)$$

όπου  $L$  συνάρτηση βραδείας κύμανσης ή  $L \in \mathcal{R}_0$  (Embrechts et al., 1997; Νεραντζάκη, 2012).

Δύο συναρτήσεις κατανομής  $F, G$  μπορούν να έχουν διαφορετική μορφή στο  $\mathbb{R}$  αλλά η δεξιά ουρά τους να έχει την ίδια συμπεριφορά. Δύο τέτοιες κατανομές ονομάζονται ισοδύναμης ουράς (tail equivalent). Δύο συναρτήσεις κατανομής  $F, G$  έχουν ισοδύναμη ουρά αν  $x_F = x_G$  και, για κάποιο  $c > 0$ ,

$$\lim_{x \rightarrow x_F} \frac{\bar{F}(x)}{G(x)} = c \quad (24)$$

Αν δύο συναρτήσεις κατανομής έχουν ισοδύναμη ουρά, τότε ανήκουν στην περιοχή έλξης μίας κατανομής ακροτάτων (με τις ίδιες ακολουθίες  $c_n, d_n$ ).

### 3.4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΛΞΗΣ ΤΗΣ $\Phi_\alpha$ (Fréchet)

Για τη  $\bar{\Phi}_\alpha(x) = 1 - e^{-x^{-a}}$ ,  $a > 0$ , ισχύει ότι

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\bar{\Phi}_\alpha(tx)}{\bar{\Phi}_\alpha(x)} &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1 - \exp(-(tx)^{-a})}{1 - \exp(-x^{-a})} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(-a(tx)^{-a-1}t) \exp(-(tx)^{-a})}{(-a(x)^{-a-1}t) \exp(-x^{-a})} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{t^{-a} \exp(-(tx)^{-a})}{\exp(-x^{-a})} = t^{-a} \end{aligned} \quad (25)$$

Και επομένως  $\bar{\Phi}_\alpha \in \mathcal{R}_{-a}$  (ομαλής κύμανσης με δείκτη  $-a$ ).

Οι κατανομές που οδηγούν στο όριο τύπου Fréchet για  $\gamma > 0$  χαρακτηρίζονται ως ομαλά κυμαινόμενες. Γενικά ισχύει ότι μία συνάρτηση κατανομής  $F$  ανήκει στο μέγιστο πεδίο έλξης (MDA) της Γενικευμένης Ακραίων Τιμών με  $\gamma > 0$  αν και μόνο αν η συνάρτηση ουράς  $\bar{F}$  είναι ομαλά κυμαινόμενη. Κατά Gnedenko

$$F \in \text{MDA}(\bar{\Phi}_\alpha) \Leftrightarrow x^{-\frac{1}{\gamma}} L(x) \quad (26)$$

για κάποια συνάρτηση  $L$  αργά κυμαινόμενη στο άπειρο (που είναι ισοδύναμη με τη σχέση 23). Αυτό σημαίνει ότι οι κατανομές που δημιουργούν τον τύπο Fréchet είναι κατανομές με ουρές που είναι συναρτήσεις ομαλά κυμαινόμενες με αρνητικό δείκτη διακύμανσης. Ουσιαστικά οι ουρές τους φθίνουν σα συνάρτηση δύναμης και ο ρυθμός με τον οποίο φθίνουν είναι ο γνωστός δείκτης ουράς της κατανομής.

Κατανομές που συγκλίνουν στη Fréchet είναι η Cauchy, Student t, Loggamma, F, Burr και stable (σταθερή για  $a < 2$ ). Οι κατανομές αυτές παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στη Θεωρία Ακραίων Τιμών καθώς έχουν χονδρές ουρές και υψηλές ροπές που απειρίζονται (McNeil et al., 2005; Νεραντζάκη, 2012).

### 3.4.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΛΞΗΣ ΤΗΣ WEIBULL

Η περίπτωση  $\gamma < 0$  περιέχει κατανομές που έχουν πεπερασμένο δεξί ακραίο σημείο  $z < +\infty$ , και για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον για τις υδρολογικές μεταβλητές (Νεραντζάκη, 2012). Περιλαμβάνει την ομοιόμορφη και τη Βήτα κατανομή. Ισχύει ότι

$$F \in \text{MDA}(\Psi_\alpha) \Leftrightarrow x_F < \infty \text{ και } \bar{F}(x_F - x^{-1}) = x^{\frac{1}{\alpha}} L(x) \quad (27)$$

για κάποια συνάρτηση  $L$  αργά κυμαινόμενη στο άπειρο.

### 3.4.3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΛΞΗΣ ΤΗΣ GUMBEL

Η περίπτωση του  $\gamma = 0$  είναι πιο περίπλοκη. Αν και υπάρχουν και εδώ αναγκαίες και επαρκείς συνθήκες, σπάνια χρησιμοποιούνται στην πράξη. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται κατανομές όπως η Εκθετική και αν υποθεθεί ότι η τάξη Fréchet περιέχει οριακούς νόμους για τα μέγιστα του δείγματος κατανομών των οποίων οι ουρές είναι ουσιαστικά τύπου δύναμης, τότε η τάξη Gumbel περιέχει οριακούς νόμους για τα μέγιστα του δείγματος κατανομών των οποίων οι ουρές φθίνουν εκθετικά (McNeil et al., 2005; Νεραντζάκη, 2012).

Μπορεί να αποδειχθεί ότι σε αυτό το πεδίο έλξης υπάρχουν κατανομές με βαριές ουρές των οποίων όλες οι ροπές είναι πεπερασμένες (όπως για παράδειγμα η Λογαριθμοκανονική κατανομή), αλλά και κατανομές ελαφρών ουρών (όπως η Κανονική, η Εκθετική ή η Γάμμα κατανομή, ή ακόμα και κατανομές οι οποίες είναι φραγμένες στα δεξιά). Άλλες κατανομές σε αυτή την κατηγορία είναι η  $X^2$ , η τυπική Weibull (διαφορετική από τη Weibull της GEV), οι Benktander τύπου I και II και η ίδια η Gumbel.

## 3.5 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ PARETO

Η προσομοίωση μόνο των μεγίστων μπορεί να είναι ανεπαρκής σε περιπτώσεις που δε διατίθενται μεγάλες χρονοσειρές με πολλά δεδομένα. Έτσι σαν επέκταση της αρχικής ιδέας της προσομοίωσης των μεγίστων προέκυψε σαν ιδέα η χρησιμοποίηση όχι μόνο των ετησίων μεγίστων αλλά και άλλων μεγαλύτερης τάξης στατιστικών χαρακτηριστικών κάθε έτος. Προέκυψαν έτσι κάποιες οριακές κατανομές σαν άμεση επέκταση της Γενικευμένης εξίσωσης των Ακραίων Τιμών (Gomes, 1984; Leadbetter et al., 1983; Smith, 1986; Tawn, 1990; Weissman, 1978).

Έτσι προέκυψε και η ιδέα της χρησιμοποίησης και άλλων τιμών εκτός των ετησίων μεγίστων που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε από τη θεωρία των Ακραίων τιμών στην προσομοίωση της ουράς μίας άγνωστης κατανομής. Η μέθοδος της ανάλυσης του άνω κατωφλίου (Peak Over Threshold analysis) αναπτύχθηκε από τους υδρολόγους στη δεκαετία του 1970 και βασίζεται στην προσαρμογή ενός στοχαστικού μοντέλου είτε στις τιμές που υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο όριο (κατώφλι) είτε στις μέγιστες κορυφές πάνω από ένα κατώφλι.

Βάσει των αποτελεσμάτων των Balkema και de Haan (1974) και του Pickands (1975), είναι γνωστό ότι αν η κατανομή των  $Y_i$  βρίσκεται στο μέγιστο πεδίο έλξης της Γενικευμένης Κατανομής Ακραίων Τιμών, τότε η κατανομή των υπερβάσεων έχει παρόμοια οριακή εκπροσώπηση. Η στενή σχέση μεταξύ της κατανομής μεγίστου  $H(x)$  και της ουράς της μητρικής κατανομής  $F(x)$  επιτρέπει τον προσδιορισμό της δεύτερης, εάν είναι γνωστή η πρώτη. Η ουρά της  $F(x)$  μπορεί να εκπροσωπηθεί από την κατανομή της  $X$  με τη δέσμευση να είναι μεγαλύτερη από ορισμένο όριο  $u$ , για παράδειγμα  $G_u(x) = F(x|x > u)$ , για την οποία ισχύει

$$1 - G_u(u) = \frac{1 - F(x)}{1 - F(u)}, x \geq u \quad (28)$$

Εάν επιλεγεί  $u$  τέτοιο ώστε η πιθανότητα υπέρβασης  $1-F(u)$  να ισούται με  $1/\nu$ , δηλαδή τον αντίστροφο του μέσου αριθμού των γεγονότων σε ένα χρόνο και αν  $G(x)$  η υπό συνθήκη κατανομή για αυτή τη συγκεκριμένη τιμή, τότε

$$1 - G(x) = \nu[1 - F(x)] \quad (29)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (28) και (29) προκύπτει η εξίσωση

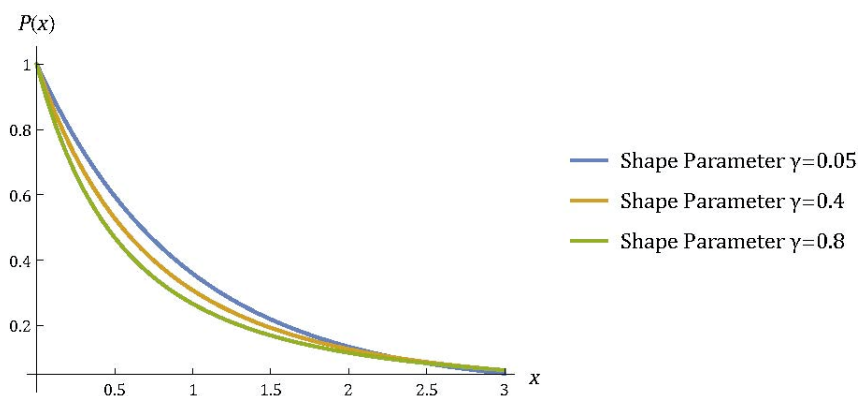
$$G(x) = 1 = \ln H'_\nu(x) \quad (30)$$

Εάν δίνεται η  $H'_\nu(x)$  από την οριακή κατανομή  $H(x)$  στην εξίσωση 12, τότε

1. Για  $\gamma > 0$  συνεπάγεται

$$G(x) = 1 - \left(1 + \gamma \left(\frac{x - a}{\beta}\right)\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (31)$$

όπου  $x \geq a$  όταν  $\gamma \geq 0$  και  $a \leq x \leq a - \beta/\gamma$  όταν  $\gamma < 0$ , που είναι η Γενικευμένη Κατανομή Pareto.



**Σχήμα 3.4.** Γενικευμένη Κατανομή Pareto

2. Ομοίως για  $\gamma = 0$

$$G(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x-a}{\beta}\right) \quad (32)$$

που είναι η εκθετική κατανομή

3. Στην περίπτωση που  $\gamma = 1$  η κατανομή  $G$  είναι η ομοιόμορφη κατανομή

$$U[0, \beta] \quad (33)$$

Η Γενικευμένη Κατανομή Pareto προκύπτει επομένως ως οριακή κατανομή για υπερβάσεις ενός κατωφλίου αν και μόνο αν η μητρική κατανομή βρίσκεται στο πεδίο έλξης της Γενικευμένης Κατανομής Ακραιών Τιμών (GEV) (Νεραντζάκη, 2012).

## 3.6 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΒΑΣΕΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΟΥΡΑΣ

### 3.6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ένα κριτήριο βάσει του οποίου χαρακτηρίζεται μία ουρά ως χονδρή η παχιά, ή βαριά, ή μακριά είναι η τέταρτη κεντρική ροπή. Έστω  $X$  τυχαία μεταβλητή και  $\mu_x$  και  $\sigma_x$  η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα, τότε η κατανομή  $X$  έχει χοντρή ουρά όταν

$$C_k = E\left(\left(\frac{X - \mu_x}{\sigma_x}\right)^4\right) > 3 \quad (34)$$

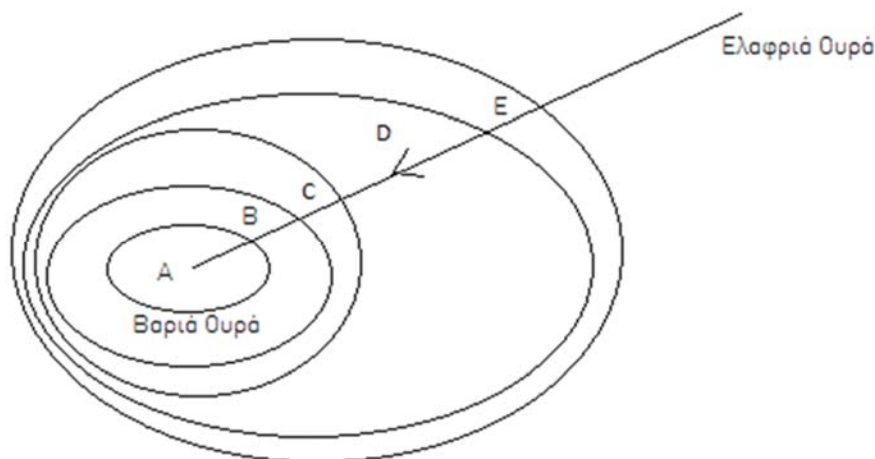
Η  $(C_k - 3)$  είναι γνωστή ως επιπλέον κύρτωση λόγω του ότι η τέταρτη κεντρική ροπή (κύρτωση) της Κανονικής Κατανομής είναι ίση με 3. Η κατάταξη όμως με τη Σχέση (34) είναι ασαφής και δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κατανομές με άπειρη τέταρτη ροπή. Όταν δύο μεταβλητές έχουν άπειρη τέταρτη ροπή, τότε δε μπορεί να γίνει καμία διάκριση μεταξύ των κατανομών τους με βάση την κύρτωση (El Adlouni et al., 2008).

Οι κατανομές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την ασυμπτωτική συμπεριφορά της ουράς τους σε δύο γενικές τάξεις, την τάξη των υποεκθετικών, με πυκνότητες πιθανότητας που τείνουν στο μηδέν πιο αργά από την πυκνότητα πιθανότητας της Εκθετικής και την τάξη των υπερεκθετικών, με πυκνότητες πιθανότητας που τείνουν στο μηδέν ταχύτερα από την εκθετική ((Klüppelberg, 1988; Νεραντζάκη, 2012)).

### 3.6.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΚΑΤΑ WERNER ΚΑΙ UPPER

Αναλυτικότερα αυτές οι ταξινομήσεις παρουσιάζονται στη Νεραντζάκη (2014), El Adlouni et al. (2008), Ouarda et al. (1994) (El Adlouni et al., 2007; Ouarda et al., 1998). Εδώ παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια στοιχεία πάνω σε μελέτες για ταξινόμηση κατανομών με βάση τις δεξιές ουρές τους. Οι Werner και Upper (2002) (Werner and Upper, 2002)

πρότειναν μία διάκριση για τις ουρές σε πέντε τάξεις κατανομών. Οι τάξεις των κατανομών εμπεριέχονται η μία μέσα στην άλλη ( $A \subset B \subset C \subset D \subset E$ ) όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 3.5.



**Σχήμα 3.5.** Κατάταξη χονδρών ουρών κατά Werner και Upper (2002) (El Adlouni et al., 2008).

Η κατάταξη των κατανομών σε πέντε τάξεις είναι:

**E:** κατανομές με μη ύπαρξη εκθετικών ροπών. Σε αυτή την τάξη περιλαμβάνονται κατανομές που έχουν πιο χονδρή ουρά από την Κανονική Κατανομή, η οποία έχει πολύ λεπτή ουρά και μειώνεται πιο γρήγορα από εκθετικά. Η Κανονική κατανομή δεν περιλαμβάνεται σε αυτή την κατηγορία.

**D:** υποεκθετικές κατανομές. Αυτή η τάξη περιλαμβάνει τις υποεκθετικές κατανομές των οποίων η ουρά μειώνεται πιο αργά από εκείνων των εκθετικών.

**C:** ομαλά κυμαινόμενες κατανομές. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τις κατανομές οι οποίες αποτελούν υποκατηγορία των υποεκθετικών. Οι πιθανότητες ουράς μειώνονται σύμφωνα με μία συνάρτηση δύναμης και επομένως συμπεριφέρονται σαν αυτές του τύπου Pareto. Είναι κατανομές ομαλής κύμανσης και η παράμετρος  $\alpha$  ( $G(x)=t^{-\alpha}$ ) ονομάζεται δείκτης ουράς και αποτελεί μέτρο του πάχους της ουράς.

**B:** κατανομές με ουρές Pareto. Η τάξη αυτή περιλαμβάνει τις κατανομές που έχουν ουρές ακριβώς τύπου Pareto.

**A:** κατανομές σταθεράς  $\alpha$ . Η τάξη αυτή περιέχει σταθερές κατανομές. Οι σταθερές κατανομές έχουν ουρά Pareto με  $\alpha < 2$ , που σημαίνει ότι έχουν άπειρη διακύμανση και επομένως πολύ χονδρές ουρές. Παρόλο που υπάρχει αυτός ο περιορισμός της διακύμανσης, οι κατανομές της τάξης A είναι μεγάλης σημασίας, λόγω του ότι αποτελούν μία Γενίκευση

του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος (Gnedenko, 1943) (Coles, 2001). Το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, που αναφέρει ότι το άθροισμα μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων και ισόνομων μεταβλητών από μία κατανομή με πεπερασμένη διακύμανση θα τείνει να είναι κανονικά κατανομημένο, δε μπορεί να εφαρμοστεί για κάποιες μεταβλητές με άπειρη διακύμανση (για παράδειγμα μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν φυσικές καταστροφές. Για το λόγο αυτό ο Fama (1965) και ο Mandelbrot (2003) πρότειναν τη σταθερή κατανομή σαν εναλλακτικό μοντέλο. Οι σταθερές κατανομές υποστηρίζονται από το γενικευμένο Κεντρικό Οριακό Θεώρημα που αναφέρει ότι οι σταθεροί νόμοι είναι οι μόνες πιθανές οριακές κατανομές για ορθώς κανονικοποιημένα αθροίσματα ανεξάρτητων και ισόνομων τυχαίων μεταβλητών. Εφόσον οι σταθερές κατανομές μπορούν να φιλοξενήσουν τις χονδρές ουρές και την ασυμμετρία συχνά ταιριάζουν πολύ καλά στα εμπειρικά δεδομένα και είναι χρήσιμα μοντέλα για ακραία γεγονότα.

Οι τάξεις B, C είναι σημαντικές επειδή συνδέονται με την κλασική Θεωρία Ακραίων Τιμών. Σύμφωνα με το Θεώρημα Fischer-Tippet για τη σύγκλιση των κατανομών των ορθά κανονικοποιημένων μεγίστων στις τρεις οριακές κατανομές Θεωρίας των Ακραίων Τιμών δημιουργείται ήδη μία κατηγοριοποίηση των κατανομών, με βάση την ουρά τους, ανάλογα με το πεδίο έλξης της κατανομής στην οποία βρίσκονται. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις κατανομές που ανήκουν στο πεδίο έλξης της Gumbel και περιέχει κατανομές με μέτριας βαρύτητας ουρές (medium tails). Η δεύτερη κατηγορία είναι η κατηγορία με κατανομές βαριάς ουράς και περιέχει τις κατανομές που συγκλίνουν στο πεδίο έλξης της κατανομής Fréchet. Η τρίτη κατηγορία είναι η κατηγορία με κοντές ουρές οι οποίες είναι άνω φραγμένες και περιέχει τις κατανομές που ανήκουν στο πεδίο έλξης της Weibull. Από τις τρεις αυτές κατηγορίες πιο σημαντική στη μελέτη των χονδρών ουρών είναι η δεύτερη κατηγορία που περιέχει κατανομές που ανήκουν στο πεδίο έλξης της Fréchet. Οι κατανομές αυτής της κατηγορίας έχουν ουρές ομαλής κύμανσης, δηλαδή ανήκουν στην τάξη C κατά Werner και Upperg. Σημαντικό επίσης είναι ότι η βαρύτητα μίας ουράς είναι αντιστρόφως ανάλογη του συντελεστή της ουράς  $\gamma$ . Η τάξη B περιέχει κυρίως τη Γενικευμένη Κατανομή Pareto (GPD), η οποία χρησιμοποιείται σαν οριακή κατανομή στην προσαρμογή των μεγίστων ή των υπερβάσεων τους που προκύπτουν από τη μέθοδο των υπερβάσεων του άνω κατωφλίου (POT).

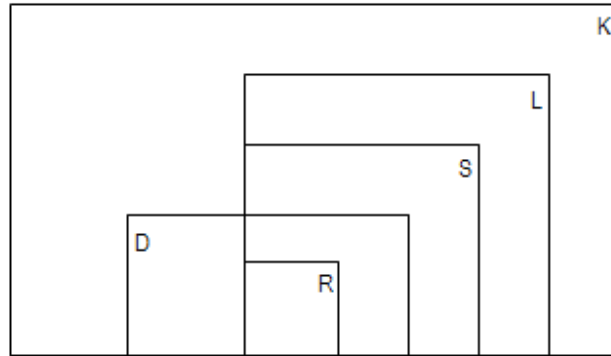
### 3.6.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΚΑΤΑ EMBRECHTS ET AL.

Ένας άλλος τρόπος κατάταξης των κατανομών βάσει της ουράς τους είναι αυτός που προτάθηκε από τους Embrechts; Klüppelberg; Mikosch (Embrechts et al., 1997) και προτείνει την ύπαρξη πάλι πέντε κατηγοριών κατανομών όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 3.6.

1. Γενική τάξη K



2. Τάξη βραδείας κύμανσης κατανομών L (των οποίων οι ουρές χαρακτηρίζονται ως μακριές)
3. Την τάξη των υποεκθετικών κατανομών S (ταχείας κύμανσης) που ταυτίζεται με την τάξη D της κατάταξης κατά Werner και Upprer (2002)
4. Την τάξη D των κυρίως μεταβαλλόμενων κατανομών
5. Την τάξη των κατανομών ομαλής κύμανσης R



**Σχήμα3.6.** Ενδεικτικό σχήμα κατάταξης βαριών ουρών κατά Embrechts et al. (1997). (Πηγή Embrechts et al., 1997)

### 3.6.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΒΑΣΕΙ ΟUARDA ET AL.

Οι Ouarda et al. (1994) παρουσίασαν μία κατηγοριοποίηση κατανομών που συνήθως χρησιμοποιείται στην υδρολογία και βασίζεται στην ασυμπτωτική συμπεριφορά της κατανομής πυκνότητας πιθανότητας. Για δεδομένη περίοδο επαναφοράς  $T$  αρκετά μεγάλη, ισχύει η επόμενη ισοδυναμία (Gumbel, 1958; Ouarda et al., 1994)

$$T \underset{x_T \rightarrow \infty}{\sim} \left( \frac{1}{f(x_T)} \right)' = - \frac{f'(x_T)}{f^2(x_T)} \quad (35)$$

Πράγματι για μεγάλη περίοδο επαναφοράς  $T$ , η συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης  $\bar{F}(x_T) = 1 - F(x_T) = \frac{1}{T}$  και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας τείνουν στο μηδέν. Με χρήση του κανόνα de L'Hospital για μεγάλες  $T$  ισχύει:  $\lim_{x_T \rightarrow \infty} \frac{f(x_T)}{1-F(x_T)} \simeq \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f'(x_T)}{f(x_T)} \implies$

$$\frac{1}{1-F(x_T)} \underset{x_T \rightarrow \infty}{\sim} - \frac{f'(x_T)}{f^2(x_T)} = \left( \frac{1}{f(x_T)} \right)'$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την ισοδυναμία, η ασυμπτωτική συμπεριφορά των κατανομών που χρησιμοποιούνται συχνά στην υδρολογία και κατά επέκταση και σε άλλα μετεωρολογικά φαινόμενα για κλιματικές μεταβλητές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Από τον πίνακα αυτό προκύπτουν τέσσερις ομάδες με βάση αυτή την κατάταξη.

1. Η πρώτη περιέχει κατανομές των οποίων η ουρά είναι συνάρτηση δύναμης περιόδου επαναφοράς ( $x \approx T^P$ ).
2. Η δεύτερη περιέχει τη Λογαριθμοκανονική κατανομή, της οποίας η ουρά έχει συμπεριφορά παρόμοια με αυτήν της κατανομής τύπου δύναμης.
3. Η ουρά των κατανομών της τρίτης ομάδας είναι δυναμική συνάρτηση του λογαρίθμου της περιόδου επαναφοράς ( $x \approx (\ln T)^P$ ) και όλες σχεδόν οι κατανομές αυτής της ομάδας ανήκουν στην τάξη D των υποεκθετικών κατανομών.
4. Η τελευταία ομάδα περιέχει κατανομές άνω φραγμένες (upper bounded support).

Η κατάταξη αυτή από Ouarda et al. (1994) είναι ισοδύναμη με την προαναφερθείσα Werner και Upper (2002). Οι κατανομές που ανήκουν στην πρώτη ομάδα του έχουν δυναμικού τύπου ουρά και αντιστοιχούν γενικά στην τάξη C των κατανομών ομαλής κύμανσης (όπου περιλαμβάνεται και η γενικευμένη κατανομή Pareto με  $\alpha > 0$  και  $k < 0$ ). Όμως για ειδικές τιμές παραμέτρων, αυτές οι κατανομές της τάξης C ανήκουν στην ομάδα των υποεκθετικών κατανομών (ομάδα III). Εφόσον οι τάξεις περιέχονται η μία μέσα στην άλλη, η τάξη των κατανομών που ανήκουν στην τάξη C2 και όχι στην τάξη C1 και είναι  $C1 \subset C2$  θα συμβολίζονται με  $C2 \setminus C1$ . Για παράδειγμα η τάξη των υποεκθετικών κατανομών που δεν είναι ομαλής κύμανσης συμβολίζεται  $D \setminus C$ . Συνδυάζοντας αυτές τις δύο κατατάξεις, οι κατανομές που χρησιμοποιούνται στην υδρολογία μπορούν να διαταχθούν σύμφωνα με τις ουρές τους (Πίνακας 3.2).

**Πίνακας 3.1.** Ταξινόμηση κατανομών βάσει ασυμπτωτικής συμπεριφοράς κατά Ouarda et al.,1994

Ομάδα	Χαρακτηριστικά	Κατανομή	Παράμετροι
<b>I: <math>x \approx T^p</math></b>			
Τάξη C	$P=1/\alpha$	Log-Pearson 3 ( $\alpha, \lambda, m$ )	$\alpha > 0, \lambda > 0, m \in \mathbb{R}$
Τάξη C	$P=1/\alpha$	Log-logistic ( $\alpha, \lambda$ )	$\alpha > 0, \lambda > 0$
Τάξη C	$P=-1/s\lambda$	Γενικευμένη Γάμμα ( $s, \alpha, \lambda$ )	$s < 0, \alpha > 0, \lambda > 0$
Τάξη C	$P=1/\lambda$	Αντίστροφη Γάμμα ( $\alpha, \lambda$ )	$\alpha > 0, \lambda > 0$
Τάξη C	$P=-1/k$	Fréchet ( $\alpha, k, u$ )	$\alpha > 0, k > 0, u \in \mathbb{R}$
Τάξη B	$P=-1/k$	Γενικευμένη Pareto ( $\alpha, k$ )	$\alpha > 0, k \in \mathbb{R}$
Τάξη C	$1/2\nu$	Halphen B <sup>-1</sup> ( $\alpha, \nu, m$ )	$\alpha \in \mathbb{R}, \nu > 0, m > 0$
<b>II: <math>x \approx \exp[(\ln T)^{1/2}]</math></b>			
-		Λογαριθμοκανονική 2 ( $\mu, \sigma$ )	$\sigma > 0, \mu \in \mathbb{R}$
-		Λογαριθμοκανονική 3 ( $\mu, \sigma, m$ )	$m \in \mathbb{R}, \sigma > 0, \mu \in \mathbb{R}$
<b>III: <math>x \approx (\ln T)^p</math></b>			
Τάξη D	$P=1$	Pearson τύπου 3 ( $\alpha, \lambda, m$ )	$\alpha > 0, \lambda > 0, m \in \mathbb{R}$
Τάξη D		Γάμμα ( $\alpha, \lambda$ )	$\alpha > 0, \lambda > 0$
Τάξη E		Εκθετική ( $\alpha, m$ )	$\alpha > 0, m \in \mathbb{R}$
Τάξη D		Halphen A ( $\alpha, \nu, m$ )	$\alpha > 0, \nu \in \mathbb{R}, m > 0$
Τάξη D		Log-F ( $\lambda, \beta$ )	$\beta > 0, \lambda > 0$
Τάξη D		Gumbel ( $\alpha, u$ )	$\alpha > 0, u \in \mathbb{R}$
Τάξη D	$P=1/2$	Halphen B ( $\alpha, \nu, m$ )	$\alpha \in \mathbb{R}, \nu > 0, m > 0$
Τάξη D	$P=1/s$	Γενικευμένη Γάμμα ( $s, \alpha, \lambda$ )	$s > 0, \alpha > 0, \lambda > 0$
<b>IV: <math>x \leq P</math></b>			
(Άνω φραγμένες)	$P=m$	Pearson 3 ( $\alpha, \lambda, m$ )	$\alpha < 0, \lambda > 0, m \in \mathbb{R}$
	$P=0$	Γάμμα ( $\alpha, \lambda$ )	$\alpha < 0, \lambda > 0$
	$P=\exp[m/\ln_a(e)]$	Log-Pearson 3 ( $\alpha, \lambda, m$ )	$\beta < 0, \gamma > 0, \kappa \in \mathbb{R}$
	$P=1$	Log-logistic ( $\alpha, \lambda$ )	$\alpha < 0, \lambda > 0$
	$P=u + a/k$	Αντίστροφη Weibull ( $\alpha, k, u$ )	$\alpha > 0, k < 0, u \in \mathbb{R}$
	$P=a/k$	Γενικευμένη Pareto ( $\alpha, k$ )	$\alpha > 0, k > 0$

**Πίνακας 3.2.** Ταξινόμηση κατανομών συχνά χρησιμοποιούμενων στην Υδρολογία βάσει της συμπεριφοράς της ουράς. Η βαρύτητα της ουράς αυξάνεται από πάνω προς τα κάτω (Νεραντζάκη, 2012)

Ταξινόμηση	Κατανομές
Λεπτές Ουρές	Κανονική
Τάξη E\D	Εκθετική
Τάξη D\C	Gumbel, Halphen τύπου A, Γάμμα, Halphen τύπου B, Pearson τύπου B
Ομάδα II	Λογαριθμοκανονική
Τάξη C\B	Fréchet, Halphen B, Αντίστροφη Γάμμα, Λογαριθμική Pearson τύπου 3
Τάξη B\A	Pareto
Τάξη A	Σταθερές Κατανομές

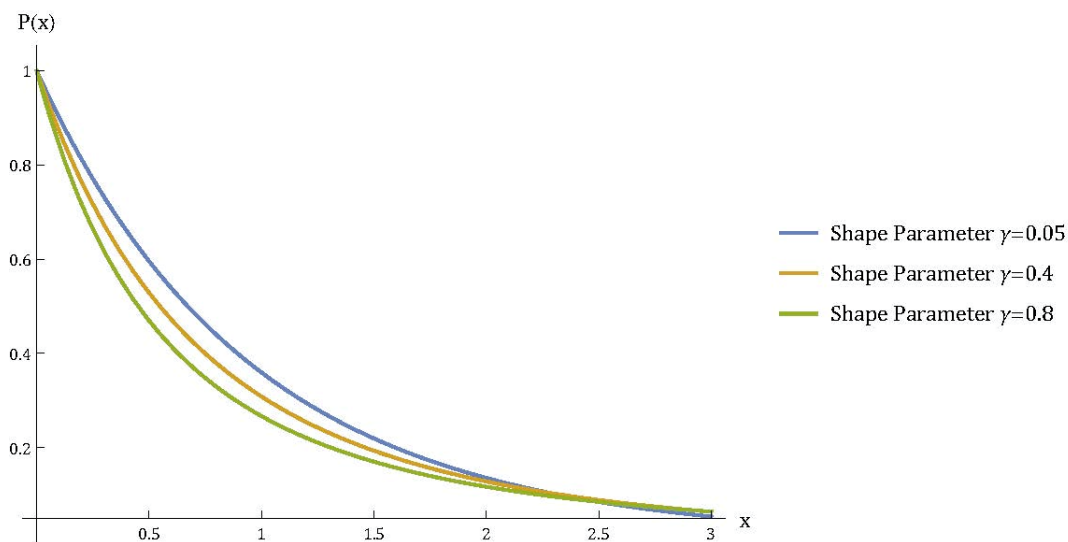
## 4 ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ

### 4.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ PARETO ΤΥΠΟΥ II

Η διπαραμετρική κατανομή Pareto τύπου II (είναι γνωστή και ως κατανομή Lomax) έχει παράμετρο κλίμακας  $\beta$  και σχήματος  $\gamma$  και έχει εφαρμογή στην οικονομία και τη μοντελοποίηση. Ανήκει στην ομάδα I, στην τάξη B\A.

**Πίνακας 4.1.** Τυπολόγιο κατανομής Pareto

Χαρακτηριστικά	Εξίσωση
Περιορισμοί	$\beta, \gamma > 0, x > 0$
Πυκνότητα Πιθανότητας	$f(x; \beta, \gamma) = \frac{1}{\beta} \left(1 + \gamma \frac{x}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\gamma} - 1}$
Συνάρτηση Κατανομής	$F(x; \beta, \gamma) = 1 - \left(1 + \gamma \frac{x}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\gamma}}$
Ποσοστημόριο	$\frac{\beta(1-q)^{-\gamma}}{\gamma}$
Ουρά	$\bar{F}(x; \beta, \gamma) = \left(1 + \gamma \frac{x}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\gamma}}$



**Σχήμα 4.1.** Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Pareto τύπου II για διάφορες τιμές της παραμέτρου σχήματος  $\gamma$ . Η παράμετρος κλίμακας είναι  $\beta=1$ .

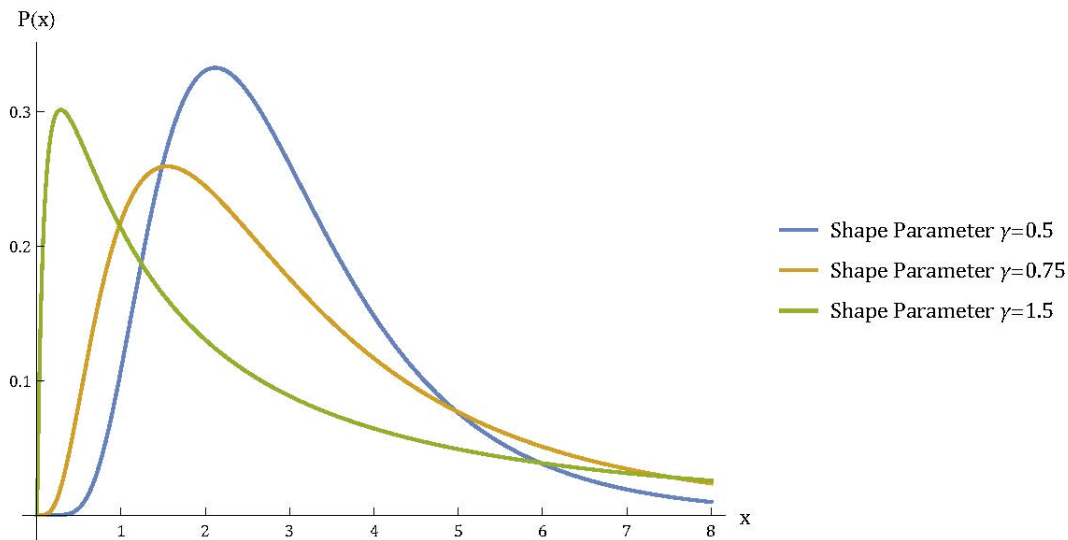
## 4.2 ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Η Λογαριθμοκανονική κατανομή δύο παραμέτρων προκύπτει από την κανονική κατανομή και το μετασχηματισμό  $y = \ln x \Leftrightarrow x = e^y$ . Επομένως η μεταβλητή  $X$  ακολουθεί Λογαριθμοκανονική κατανομή δύο παραμέτρων αν η  $Y$  ακολουθεί κανονική κατανομή  $N(\mu, \sigma)$ . Εμφανίζεται πολύ συχνά στη στοχαστική χρηματοοικονομική ανάλυση και ανήκει στην ομάδα II. Εδώ, έχοντας θεωρήσει την παράμετρο θέσης ίση με μηδέν, η κατανομή είναι διπαραμετρική και συμβολίζεται με  $\beta$  η παράμετρος κλίμακας που είναι η μέση τιμή και με  $\gamma$  η παράμετρος σχήματος που είναι τυπική απόκλιση (Σχήμα 4.2). Ως άμεση συνέπεια του παραπάνω μετασχηματισμού, η μεταβλητή  $x$  είναι θετική. Η Λογαριθμοκανονική κατανομή έχει πάντα θετική ασυμμετρία. Έτσι, το σχήμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας είναι πάντα κωδωνοειδές και θετικά ασύμμετρο. Αυτές οι βασικές ιδιότητες της Λογαριθμοκανονικής κατανομής είναι συμβατές με τις παρατηρημένες ιδιότητες της ταχύτητας του ανέμου.

**Πίνακας 4.2.** Τυπολόγιο Λογαριθμοκανονικής κατανομής

Χαρακτηριστικά	Εξίσωση
Περιορισμοί	$\beta, \gamma > 0, x > 0$
Πυκνότητα Πιθανότητας	$f(x; \beta, \gamma) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\gamma x} \exp\left(-\ln^2\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right)$
Συνάρτηση Κατανομής	$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln x - \beta}{\sqrt{2}\gamma}\right)$
Ποσοστημόριο	$x_q = \exp\left(\beta + \sqrt{2}\gamma \operatorname{erf}^{-1}(-1 + 2q)\right)$
Ουρά	$\bar{F}(x; \beta, \gamma) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\ln\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right)$

Όπου  $\operatorname{erfc}$  συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος που ορίζεται ως  $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ .



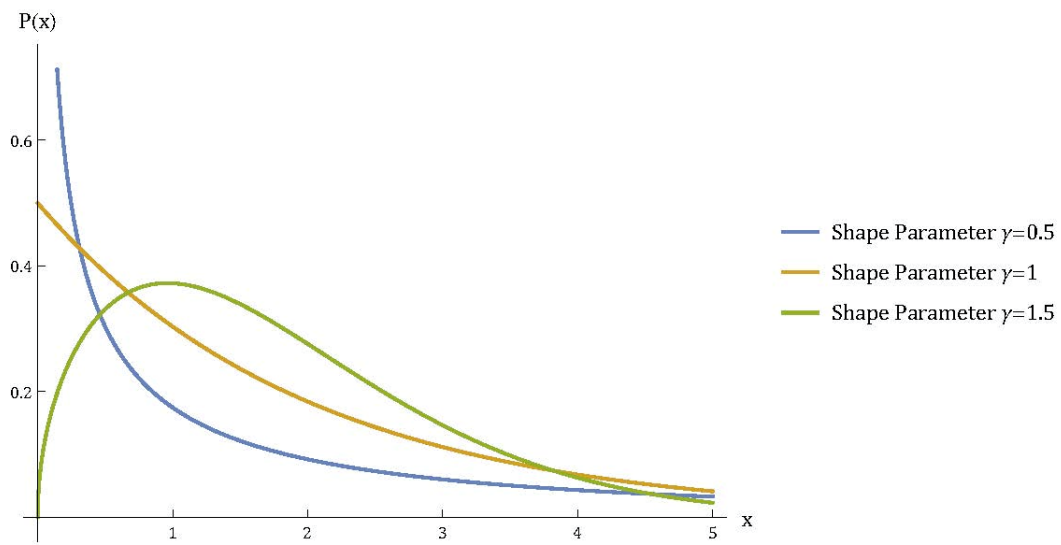
**Σχήμα 4.2.** Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Λογαριθμοκανονικής κατανομής για διάφορες τιμές της παραμέτρου σχήματος  $\gamma$  (τυπική απόκλιση). Η παράμετρος κλίμακας είναι  $\beta=1$  (μέση τιμή).

### 4.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL

Η κατανομή Weibull μπορεί να θεωρηθεί ως γενίκευση της Εκθετικής κατανομής και παρεμβάλλεται μεταξύ της Εκθετικής κατανομής και της κατανομής Rayleigh. Είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στην ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου και πρόκειται για κατανομή ελαχίστων.

**Πίνακας 4.3.** Τυπολόγιο κατανομής Weibull

Χαρακτηριστικά	Εξίσωση
Περιορισμοί	$\beta, \gamma > 0, x > 0$
Πυκνότητα Πιθανότητας	$f(x; \beta, \gamma) = \frac{\gamma x^{-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma\right)}{\beta^\gamma}$
Συνάρτηση Κατανομής	$F(x; \beta, \gamma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma\right)$
Ποσοστημόριο	$x_q = \beta(-\log(1 - q))^{\frac{1}{\gamma}}, 0 < q < 1$
Ουρά	$\bar{F}(x; \beta, \gamma) = \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma\right)$



**Σχήμα 4.3.** Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομής Weibull για διάφορες τιμές της παραμέτρου σχήματος  $\gamma$ . Η παράμετρος κλίμακας είναι  $\beta=2$ .



## 5 ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΟΥΡΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η προσαρμογή τριών κατανομών στο σύνολο των δεδομένων και σε εμπειρικά δεδομένα ουράς. Πιο συγκεκριμένα, οι κατανομές και οι ουρές τους που εφαρμόζονται είναι η κατανομή Pareto II (ή αλλιώς ονομάζεται και Lomax), η Λογαριθμοκανονική και η Weibull των οποίων η ασυμπτωτική συμπεριφορά μπορεί να είναι παρόμοια με πολλών άλλων κατανομών. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε η Weibull ως η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στην περιγραφή της ταχύτητας του ανέμου και ως γενίκευση της Εκθετικής κατανομής, η Pareto με ουρά τύπου δύναμης, και η Λογαριθμοκανονική με ενδιάμεσης βαρύτητας ουρά αφού ανήκει στο πεδίο έλξης της Gumbel, με ουρές που τείνουν στο μηδέν πιο σύντομα από τις ουρές τύπου δύναμης. Η Pareto και η Λογαριθμοκανονική ανήκουν στην τάξη των υποεκθετικών κατανομών άρα θεωρούνται κατανομές με βαριές ουρές με την Pareto να έχει την πιο βαριά ουρά. Η Weibull ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου σχήματος μπορεί να ανήκει στην τάξη των υποεκθετικών ή των υπερεκθετικών, σε κάθε περίπτωση όμως η ουρά της είναι πιο ελαφριά από αυτές των Pareto και της Λογαριθμοκανονικής (Papalexίου et al., 2013)

### 5.1 ΟΥΡΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

Η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου είναι μεικτού τύπου κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι αποτελείται από ένα διακριτό μέρος που περιγράφει την πιθανότητα μηδενικού ανέμου, δηλαδή να μη φυσάει άνεμος και ένα συνεχές μέρος που εκφράζει τη μη μηδενική ταχύτητα του ανέμου. Η δεξιά ουρά της κατανομής του ανέμου ελέγχει τη συχνότητα και το μέγεθος των ακραίων γεγονότων.

Έστω μεταβλητή  $X$  η ταχύτητα του ανέμου και η μη μηδενική ταχύτητα  $X|X > 0$ , τότε η συνάρτηση υπέρβασης πιθανότητας της μη μηδενικής ταχύτητας του ανέμου ορίζεται ως

$$P(X > x|X > 0) = \bar{F}_{X|X>0}(x) = 1 - F_{X|X>0}(x) \quad (36)$$

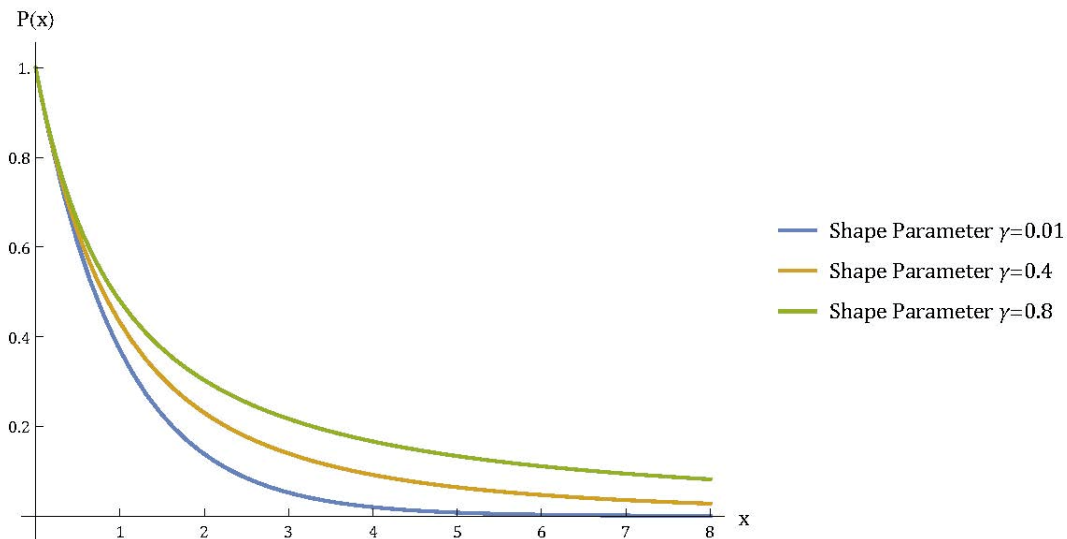
όπου  $F_{X|X>0}(x)$  είναι κάθε κατανομή πιθανότητας που έχει επιλεγεί για να περιγράψει τη μη μηδενική ταχύτητα του ανέμου. Η σχέση (36) αποτελεί τη συνάρτηση ουράς της πιθανοτικής κατανομής της ταχύτητας του ανέμου.

### 5.2 ΟΥΡΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ PARETO ΤΥΠΟΥ II

Η κατανομή Pareto τύπου II είναι η απλούστερη κατανομή τύπου δύναμης που ορίζεται στο  $[0, +\infty)$ . Η ουρά της δίνεται από τον τύπο

$$\bar{F}(x) = \left(1 + \gamma \frac{x}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (37)$$

και ορίζεται από την παράμετρο κλίμακας  $\beta > 0$  και την παράμετρο σχήματος  $\gamma \geq 0$  που ελέγχει την ασυμπτωτική συμπεριφορά της ουράς (Σχήμα 5.1). Συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η τιμή του  $\gamma$ , η ουρά γίνεται πιο βαριά, συνεπώς οι ακραίες τιμές θεωρείται ότι συμβαίνουν πιο συχνά. Για  $\gamma = 0$  η ουρά εκφυλίζεται σε εκθετική ενώ για  $\gamma \geq 0.5$  η κατανομή έχει άπειρη διακύμανση. Πολλές κατανομές δυναμικού τύπου έχουν ισοδύναμες ουρές, δηλαδή παρουσιάζουν ασυμπτωτική συμπεριφορά παρόμοια με αυτή της κατανομής Pareto τύπου II στην οποία ισχύει  $x^{-1/\gamma}$ . Τέτοιες κατανομές είναι οι Burr τύπου XII (Tadikamalla, 1980), η διπαραμετρική και τριπαραμετρική Κάππα (Mielke, 1973), η Log-Logistic (Ahmad et al., 1988) και η γενικευμένη Βήτα του δεύτερου είδους (Mielke Jr & Johnson, 1974) (Papalexiou et al., 2013).



**Σχήμα 5.1.** Συνάρτηση ουράς κατανομής Pareto τύπου II για διάφορες τιμές της παραμέτρου σχήματος  $\gamma$ . Η παράμετρος κλίμακας  $\beta=1$ . Όσο μεγαλώνει η τιμή της παραμέτρου σχήματος χοντραίνει και η ουρά της κατανομής.

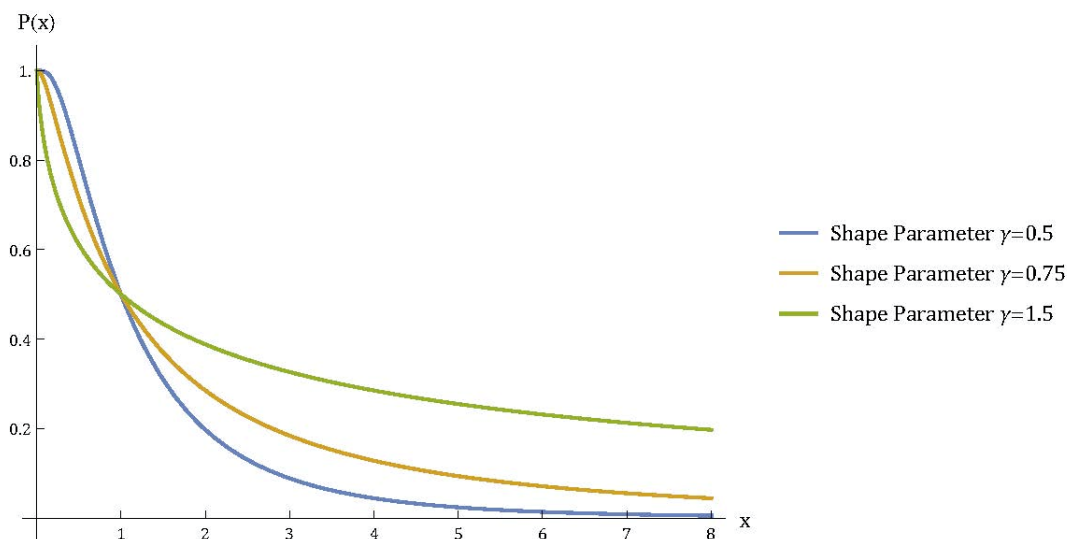
### 5.3 ΟΥΡΑ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

Η Λογαριθμοκανονική έχει συνάρτηση ουράς που δίνεται από τη σχέση

$$\bar{F}(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \ln \left( \frac{x}{\beta} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right) \quad (38)$$

όπου  $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ , με  $\beta \in \mathbb{R}$  και  $\gamma > 0$ . Η παράμετρος  $\gamma$  ελέγχει το σχήμα και τη συμπεριφορά της ουράς (Σχήμα 5.2). Η Λογαριθμοκανονική κατανομή έχει βαριά ουρά

(ανήκει στην οικογένεια των υποεκθετικών κατανομών) και θεωρείται ότι μπορεί να προσεγγίσει δυναμικού τύπου κατανομές για μεγάλο ποσοστό του σώματος της κατανομής (Mitzenmacher, 2003; Νεραντζάκη, 2012).



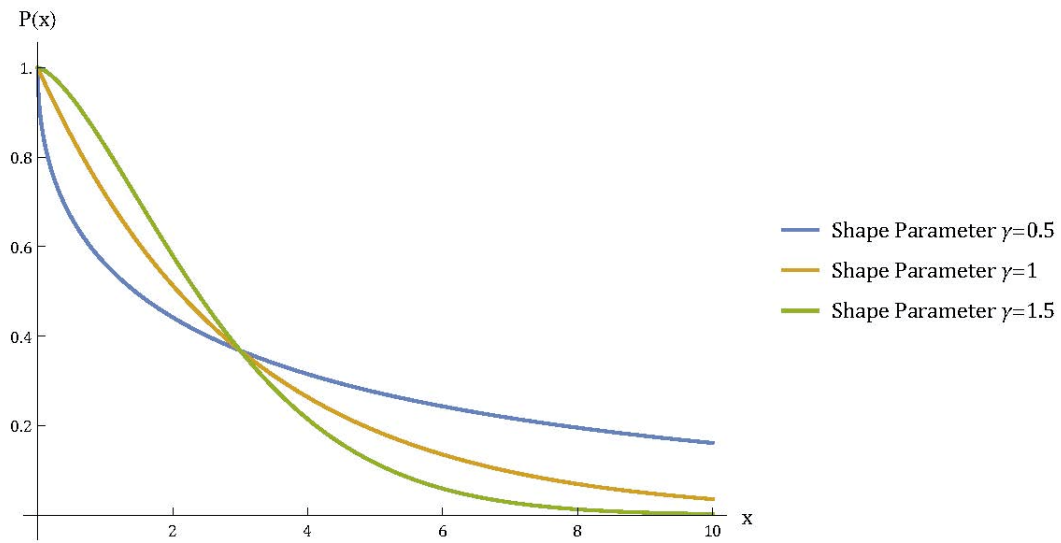
**Σχήμα 5.2.** Συνάρτηση ουράς της Λογαριθμοκανονικής κατανομής για διάφορες τιμές της παραμέτρου σχήματος  $\gamma$ . Η παράμετρος κλίμακας  $\beta=1$ . Όσο μεγαλώνει η τιμή της παραμέτρου σχήματος χοντραίνει και η ουρά της κατανομής.

## 5.4 ΟΥΡΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ WEIBULL

Η κατανομή Weibull, που είναι γενίκευση της Εκθετικής κατανομής είναι η πιο χρησιμοποιούμενη κατανομή όσον αφορά την ταχύτητα του ανέμου και η συνάρτηση της ουράς της είναι

$$\bar{F}(x) = \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma\right) \quad (39)$$

Η παράμετρος  $\beta > 0$  είναι η παράμετρος κλίμακας, ενώ η παράμετρος σχήματος  $\gamma > 0$  ορίζει και πάλι την ασυμπτωτική συμπεριφορά της ουράς (Σχήμα 5.3). Για  $\gamma < 1$  η κατανομή ανήκει στην οικογένεια των υποεκθετικών, με ουρά βαρύτερη από αυτή της Εκθετικής, ενώ για  $\gamma > 1$  η κατανομή χαρακτηρίζεται ως υπερεκθετική με ουρά λεπτότερη από της Εκθετικής. Πολλές ουρές θεωρείται ότι έχουν ισοδύναμη ουρά με της Weibull για συγκεκριμένη τιμή της παραμέτρου  $\gamma$ , όπως η Εκθετική, η Γενικευμένη Εκθετική, η Λογιστική και η Κανονική.



**Σχήμα 5.3.** Συνάρτηση ουράς κατανομής Weibull για διάφορες τιμές της παραμέτρου σχήματος  $\gamma$ . Η παράμετρος κλίμακας είναι  $\beta=3$ . Όσο μεγαλώνει η τιμή της παραμέτρου σχήματος μικραίνει το πάχος της ουρά της κατανομής.

## 6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΑΝΕΜΩΝ - ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙ

---

Η ταχύτητα του ανέμου που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των φορτίων που ασκούνται στις κατασκευές λαμβάνεται από ανεμολογικούς χάρτες. Στο Ηνωμένο Βασίλειο για παράδειγμα, μετριέται η μέση ταχύτητα της 1-ώρας, από την οποία στη συνέχεια εξάγεται η μηνιαία μέγιστη, από την οποία προκύπτει η ετήσια μέγιστη η οποία χρησιμοποιείται στη δημιουργία ανεμολογικών χαρτών της βασικής ταχύτητας του ανέμου. Αυτή η βασική ταχύτητα των χαρτών έχει ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 2% (περίοδο επαναφοράς 50 χρόνων). Σε πολλές περιπτώσεις όμως, λόγω των λίγων χρόνων καταγραφών των δεδομένων οι μετρήσεις προσαρμόζονται σε πιθανοτικές κατανομές για να εκτιμηθούν ακραίες συμπεριφορές της ταχύτητας του ανέμου και μεγάλες περίοδοι επαναφοράς από τις ουρές των κατανομών και να προκύψουν ακριβέστεροι ανεμολογικοί χάρτες. Επομένως, η εκτίμηση των φορτίων ανέμου στις κατασκευές απαιτεί γνώση των ισχυρότερων ανέμων καθώς επίσης και πιο ακριβείς εκτιμήσεις των περιόδων επαναφοράς, μέσω της χρήσης των κατανομών πιθανότητας, που αναμένονται κατά τη διάρκεια της προσδοκώμενης ζωής των κατασκευών.

Σε μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, ο Davenport ήταν από τους πρώτους ερευνητές που εφάρμοσε τη θεωρία των πιθανοτήτων και της στατιστικής για τον προσδιορισμό της ταχύτητας σχεδιασμού του ανέμου. Μία ευρέως χρησιμοποιημένη κατανομή για την περιγραφή της ταχύτητας του ανέμου είναι η Weibull. Οι Stewart και Essenwanger μελέτησαν την κατανομή συχνοτήτων της ταχύτητας του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης με τη χρήση της κατανομής Weibull διαφόρων παραμέτρων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το τριπαραμετρικό μοντέλο είναι καλύτερο από το μοντέλο των δύο παραμέτρων στην εκτίμηση των ακραίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου. Οι Deaves και Lines παρουσίασαν μία βελτιωμένη μέθοδο προσαρμογής των δεδομένων της ταχύτητας του ανέμου στη διπαραμετρική κατανομή Weibull και έδειξαν ότι μπορεί να προσαρμοστεί σε όλο το εύρος των δεδομένων της ταχύτητας του ανέμου με την προϋπόθεση ότι η ανάλυση του ανεμομέτρου είναι επαρκής και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα οι μέσες τιμές 10 λεπτών της ταχύτητας του ανέμου. Οι Ulgen και Hepbasli εξέτασαν τις δύο παραμέτρους της κατανομής Weibull της συνάρτησης κατανομής της ταχύτητας του ανέμου, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου της Σμύρνης και συνέκριναν τις κατανομές Weibull και Rayleigh. Η κατανομή Weibull βρέθηκε να είναι πιο ακριβής με τη μέθοδο προσαρμογής της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και επομένως πιο κατάλληλη για την αναπαράσταση της πραγματικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας

των δεδομένων της ταχύτητας του ανέμου για τη Σμύρνη. Υπάρχουν πολλές μελέτες που προσαρμόζουν την κατανομή Weibull δύο παραμέτρων σε δεδομένα ταχύτητας του ανέμου. Οι περισσότερες από τις μελέτες αυτές την παρουσίαζαν ως το κατάλληλο μοντέλο για τον προσδιορισμό της κατανομής των πιθανοτήτων της ταχύτητας του ανέμου και εκτίμηση των ακραίων τιμών της.

Για ταχύτητες του ανέμου μεγαλύτερης κλίμακας από ταχύτητες που εκφράζουν τις ριπές του ανέμου, και αποτελούν κλίμακες δευτερολέπτων, δηλαδή μέσες ταχύτητες 2-λέπτου ή 10-λέπτου, η πιο χρησιμοποιούμενη κατανομή είναι η Weibull δύο παραμέτρων. Μερικές φορές η κατανομή Rayleigh προσφέρει ακριβή προσαρμογή στο δείγμα καθώς είναι και ειδική περίπτωση της Weibull, αλλά το ότι έχει μόνο μία παράμετρο την κάνει πιο ευέλικτη. Παρόλο που οι κατανομές αυτές χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή των ταχυτήτων του ανέμου ευρέως, πολλοί μελετητές υποστηρίζουν ότι καθοριστικός παράγοντας είναι και η περιοχή στην οποία γίνονται οι μετρήσεις και ότι σε κάποιες περιοχές οι κατανομές αυτές θα προσαρμόζονται καλύτερα από άλλες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μελέτη πραγματοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα και φαίνεται πως η ταχύτητα του ανέμου δεν προσαρμόζεται καλά στην κατανομή Weibull τόσο στα συνολικά δεδομένα όσο και στις ουρές των δεδομένων, όπου η Λογαριθμοκανονική κατανομή δύο παραμέτρων δίνει καλύτερη προσαρμογή, όπως αναλύεται και στην παρακάτω ανάλυση.

Στο σχεδιασμό υπεράκτιων αιολικών πάρκων, οι βραχυπρόθεσμοι άνεμοι διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων για χρήση από τους μηχανικούς, όπως για παράδειγμα είναι η παραγωγή ενέργειας, ακραία φορτία του ανέμου, και φορτία του ανέμου για το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Λόγω έλλειψης χρονοσειρών της ταχύτητας του ανέμου μεγάλου μήκους, οι κατανομές πιθανοτήτων λειτουργούν ως το βασικό εργαλείο για την εκτίμηση των κατασκευαστικών αυτών παραμέτρων. Οι Morgan et al., (Morgan et al., 2011) σε μελέτη που πραγματοποίησαν, χρησιμοποίησαν χρονοσειρές από τις μέσες ταχύτητες 10 λεπτών από 178 σημαντήρες στον ωκεανό με μετρήσεις διάρκειας από ένα μήνα έως 20 χρόνια και έδειξαν ότι η κατανομή Weibull που είναι η πιο αποδεκτή δίνει τη χειρότερη προσαρμογή συγκρινόμενη με άλλες πιο σύνθετες κατανομές όσον αφορά τη γενικότερη προσαρμογή στο σώμα της κατανομής, τη μέση παραγωγή ενέργειας και την εκτίμηση των ακραίων ταχυτήτων του ανέμου. Η Weibull προσαρμόζεται καλύτερα σε όλη την κατανομή σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλη διπαραμετρική κατανομή αλλά χειρότερα σε σχέση με τη Weibull με δύο κορυφές, την Κάππα και τη Wakeby, με τη Weibull των δύο κορυφών να προσαρμόζεται καλύτερα από όλες. Οι κατανομές Κάππα και Wakeby προσαρμόζονται καλύτερα στην ουρά των δεδομένων (ακραίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου) από τη Weibull των δύο κορυφών αλλά υπερεκτιμούν τη συχνότητα χαμηλότερης ταχύτητας ανέμων. Επειδή η μέση ισχύς του στροβίλου καθορίζεται από τους υψηλούς ανέμους, οι Κάππα και Wakeby την εκτιμούν καλύτερα, με

την Κάππα να είναι καλύτερη και να είναι λιγότερο μεροληπτική. Σημαντικό αποτέλεσμα της μελέτης τους που επιβεβαιώνεται και στην παρούσα μελέτη είναι ότι η Λογαριθμοκανονική κατανομή δύο παραμέτρων δίνει καλές εκτιμήσεις στους ακραίους ανέμους, αλλά με σημαντικό σφάλμα.

Η στατιστική ανάλυση των ακραίων ανέμων πραγματοποιείται παραδοσιακά με την επεξεργασία των ετησίων μέγιστων με την Θεωρία των Ακραίων Τιμών. Η θεωρία αυτή βασίζεται σε τρεις ασυμπτωτικές κατανομές: τη Gumbel, τη Fréchet και την Αντίστροφη Weibull, οι οποίες είναι γνωστές ως Type I, Type II και Type III Κατανομές των Ακραίων Τιμών, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Η Γενική Κατανομή των Ακραίων Τιμών (GEV) (Jenkinson, 1955) συνδυάζει και τις τρεις αυτές κατανομές σε μία μαθηματική μορφή, στην οποία ο παράγοντας του σχήματος καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ουράς, και υποδεικνύει ποια από τις τρεις Κατανομές των Ακραίων προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Συγκεκριμένα, όταν ο παράγοντας σχήματος τείνει στο μηδέν η Γενική Κατανομή των Ακραίων Τιμών τείνει στην κατανομή Gumbel. Με αύξουσες θετικές τιμές της παραμέτρου σχήματος, η Γενική Κατανομή των Ακραίων Τιμών τείνει στην κατανομή Fréchet. Τέλος με συνεχώς αύξουσες αρνητικές τιμές της παραμέτρου σχήματος, η Γενική Κατανομή των Ακραίων Τιμών τείνει στην Αντίστροφη Weibull. Η Gumbel και η Fréchet χαρακτηρίζονται από μία ασυμπτωτική δεξιά ουρά, ενώ η Αντίστροφη Weibull είναι φραγμένη δεξιά. Από τη στιγμή που οι άνεμοι δε μπορούν να φτάσουν στο άπειρο οι δύο πρώτες κατανομές δεν είναι φυσικά αποδεκτές (Gomes και Vickery, 1977; Simiu και Heckert, 1996). Για μεγάλες τιμές της περιόδου επαναφοράς η κατανομή Fréchet μπορεί να οδηγήσει σε εξωπραγματικές εκτιμήσεις της ταχύτητας οι οποίες δεν είναι λειτουργικές για κατασκευαστικούς σκοπούς (Simiu et al., 1978). Από την άλλη πλευρά αν και είναι περιορισμένη στα δεξιά η ταχύτητα του ανέμου δεν έχει φυσικό όριο που απαιτείται από την κατανομή Weibull. Έτσι, η επιλογή γίνεται περισσότερο με την ικανότητα της κατανομής να προσαρμόσει τα πειραματικά δεδομένα, ανεξαρτήτως της φυσικής υπόστασης της ταχύτητας του ανέμου. Αρχικά οι Simiu et al., (1978) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η κατανομή Gumbel είναι το πιο κατάλληλο μοντέλο για την πρόγνωση των ακραίων ανέμων. Λίγα χρόνια αργότερα όμως, οι Simiu και Heckert, (1996) συμπέραναν ότι η υιοθέτηση του μοντέλου Gumbel είναι πιθανό να οδηγήσει σε μη ρεαλιστική εκτίμηση της αξιοπιστίας της κατασκευής υπό φορτία του ανέμου, που χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά αποτυχίας (Ellingwood et al., 1980). Αυτό προκύπτει εν μέρει τουλάχιστον από τη χρήση κατανομών με άπειρη δεξιά ουρά, και θεώρησαν ότι ένα λογικό αναλυτικό μοντέλο πρέπει να έχει πεπερασμένη δεξιά ουρά. Έτσι οι Simiu και Heckert, (1996) και Simiu et al. (2002), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου προσεγγίζονται καλύτερα από την τύπου III (Αντίστροφη Weibull) κατανομή των ακραίων τιμών σε σύγκριση με την Κανονική, τη διπλά Εκθετική, τη Λογαριθμοκανονική, τη Gumbel, τη Fréchet και Weibull. Οι Simiu et al., (2000) επίσης μελέτησαν την προσαρμογή των ακραίων τιμών της δυναμικής πίεσης στην

κατανομή Gumbel η οποία η υπό προϋποθέσεις θα μπορούσε να δώσει εκτιμήσεις για τα ακραία φορτία (για παράδειγμα εάν δεν υπάρχουν αεροελαστικά φαινόμενα) του ανέμου που δέχονται οι κατασκευές, η δυναμική πίεση ορίζεται ως το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου. Σύμφωνα με την άποψη του Cook (1982), εάν οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου προκύπτουν από την κατανομή Rayleigh οι ακραίες τιμές των δυναμικών πιέσεων συγκλίνουν στην κατανομή Gumbel, σε έρευνα που πραγματοποίησε με τη μέθοδο των ανεξάρτητων καταιγίδων. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους έδειξαν ότι για τις ετήσιες μέγιστες τιμές τόσο της ταχύτητας όσο και των τετραγώνων της ταχύτητας η Αντίστροφη Weibull έχει καλύτερη προσαρμογή. Στα ίδια αποτελέσματα κινήθηκαν και άλλοι επιστήμονες. Οι Holmes και Moriarty (Holmes and Moriarty, 1999), ήταν από τους πρώτους που πραγματοποίησαν μελέτη που αφορούσε την προσαρμογή των μέγιστων τιμών της ταχύτητας του ανέμου που προέκυψαν με τη μέθοδο της ανάλυσης του άνω κατωφλίου (Peaks Over Threshold analysis) στη Γενικευμένη κατανομή Pareto. Νωρίτερα και ο Lechner (James A. Lechner, 1992), αλλά και οι Simiu και Heckert είχαν προσεγγίσει τα μέγιστα με τη Γενικευμένη κατανομή Pareto, ενώ η ιδιαιτερότητα της μελέτης των Holmes και Moriarty είναι ότι επέλεξαν μέγιστα από συγκεκριμένο τύπο καταιγίδας και όχι γενικά μέγιστα. Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα της μελέτης τους η Γενικευμένη κατανομή Pareto πλεονεκτεί έναντι της κλασικής μεθόδου της Γενικευμένης κατανομής των Ακραίων τιμών λόγω του ότι μπορεί να κάνει χρήση όλων των μέγιστων τιμών που μπορεί να προκύψουν σε μία καταιγίδα ενδιαφέροντος και όχι μόνο της ετήσιας μέγιστης, όπως επίσης δεν είναι και απαραίτητο να υπάρχουν όλες οι ετήσιες τιμές για να διεξαχθεί η μελέτη. Οι κατανομές τύπου I (Gumbel) και τύπου II (Fréchet) των κατανομών των ακραίων τιμών είναι συντηρητικές για τα γεωφυσικά φαινόμενα, επειδή προβλέπουν τεράστιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου όσο μεγαλώνει η περίοδος επαναφοράς. Ο τύπος III (Reverse Weibull) της κατανομής των ακραίων τιμών ( $k > 0$ ) είναι πιο κατάλληλο μοντέλο για τις ακραίες ταχύτητες ανέμου όταν χρησιμοποιείται συνδυαστικά με τη Γενικευμένη κατανομή Pareto. Τα μέγιστα που προκύπτουν από τη μέθοδο υπέρβασης του άνω κατωφλίου μπορούν να προσαρμοστούν με τη Γενικευμένη κατανομή Pareto για να προσδιοριστεί ο συντελεστής σχήματος  $k$  και στη συνέχεια να προσαρμοστεί ο τύπος III της κατανομής των ακραίων τιμών. Το διαχωρισμό των δεδομένων ανάλογα με την καταιγίδα προέλευσης είχε προτείνει νωρίτερα ο Simiu καθώς επίσης και την προσαρμογή συνολικά των δεδομένων, μετά το διαχωρισμό, σε σύνθετες κατανομές. Το τελευταίο έκανε ο Augustin, 2012 όπου προσάρμοσε πέντε σύνθετες κατανομές στις ετήσιες μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και βρήκε ότι το 87% των δειγμάτων προσαρμόστηκαν καλύτερα σε μία σύνθετη κατανομή.

Οι Galambos και Macri (1999), εναντιώθηκαν στη χρήση φραγμένης άνω κατανομής για την περιγραφή των ακραίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου και στη μέθοδο με την οποία προέκυψαν αυτά τα αποτελέσματα και έδειξαν ότι η Gumbel δίνει καλύτερα αποτελέσματα.



Την ίδια άποψη είχε και ο Cook (1985), που επισήμανε ότι η Gumbel είναι πιο κατάλληλη από τις άλλες δύο κατανομές των ακραίων τιμών. Από την άλλη πλευρά, ο Harris (2004) επισημαίνει την ύπαρξη δεξιά φραγμένης μητρικής κατανομής που οδηγεί σε ασύμπτωτη Τύπου I, εξαλείφοντας έτσι τον περιορισμό ότι οι μέγιστες τιμές ενός φυσικού φαινομένου πρέπει να περιγράφονται απαραίτητα από την Αντίστροφη κατανομή Weibull. Ο ίδιος (2006) μελέτησε και την πιθανή χρήση της Γενικευμένης Κατανομής των Ακραίων Τιμών για την περιγραφή των ακραίων ταχυτήτων του ανέμου και κατέληξε ότι δημιουργεί ασάφεια στον καθορισμό των φορτίων του ανέμου, και δε θα πρέπει να θεωρείται επομένως ως εναλλακτική της κατανομής Gumbel.

Οι Ying et al., 2006 μελέτησαν τις ακραίες τιμές των δυναμικών πιέσεων που προέκυψαν από τις μέσες ταχύτητες 2-λέπτου με τη μέθοδο, r-LOS του Cole, 30 σταθμών στο Οντάριο του Καναδά και απέδειξαν ότι η κατανομή Gumbel αποδίδει καλύτερα τις ακραίες τιμές από τις άλλες κατανομές ακραίων. Έτσι υποστήριξαν την άποψη του Cook ο οποίος σύμφωνα με τη μέθοδο των ανεξάρτητων καταιγίδων πρότεινε το ίδιο.

Οι Chiodi et al. (Chiodi and Ricciardelli, 2014), μελέτησε την καταλληλότητα των τριών κατανομών στην ανάλυση των μέγιστων τιμών του ανέμου με χρήση της Γενικευμένης Κατανομής των Ακραίων Τιμών. Απέδειξε ότι η κατανομή Gumbel είναι συντηρητική στην εκτίμηση της ταχύτητας σχεδιασμού, ενώ η κατανομή Weibull είναι επικίνδυνη. Βρήκε ότι η Gumbel στις περισσότερες περιπτώσεις υπερεκτιμάει την ταχύτητα σχεδιασμού σε μικρά ποσοστά παρόλα αυτά.

Ένα ζήτημα που τίθεται στην εφαρμογή της κλασικής θεωρίας των Ακραίων τιμών είναι η χρήση μόνο των ετησίων μέγιστων και την απώλεια σημαντικής πληροφορίας (International Organisation for Standardisation (2009)). Έτσι πέρα από τις άλλες μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των μέγιστων τιμών της ταχύτητας του ανέμου που αναφέρονται πιο πάνω, προτάθηκε η χρήση των  $n$  ετήσιων μέγιστων (Lagomarsino et al., 1992) ή των μηνιαίων μέγιστων (Simiu et al., 1982; Grigoriu, 1984). Αυτές οι εκτιμήσεις βασίζονται σε ένα εμπειρικό μοντέλο που υποθέτει ότι οι πρώτες  $n$  ετήσιες ή μηνιαίες μέγιστες τιμές είναι ανεξάρτητες και εποχικές (Grigoriu, 1984). Και άλλες μέθοδοι έχουν προταθεί (βλέπε Chiodi and Ricciardelli, 2014).

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το βασικό μειονέκτημα της κλασικής μεθόδου της Γενικευμένης κατανομής των Ακραίων Τιμών είναι ότι επιλέγει μόνο μία τιμή ανά εποχή, η οποία συνήθως ισούται με ένα έτος (annual maxima). Αυτό μειώνει τα διαθέσιμα στοιχεία για ανάλυση, δημιουργώντας την αναγκαιότητα του μεγάλου μήκους του αρχικού δείγματος από το οποίο επιλέγονται τα εποχιακά μέγιστα. Ο Cook (1985) θεώρησε ότι χρειάζονται τουλάχιστον 20 χρόνια δεδομένων για αξιόπιστα αποτελέσματα (δηλαδή για ανάλυση των ακραίων τιμών 20 χρόνων με αυτή τη μέθοδο) και ότι δεν εξάγονται σωστά αποτελέσματα

για κάτω από 10 χρόνια με αυτή τη μέθοδο. Έτσι για να αυξηθούν τα δεδομένα προς ανάλυση, με την προϋπόθεση της ύπαρξης μικρού μήκους δεδομένων, αναπτύχθηκαν εναλλακτικές προσεγγίσεις:

- Η γενική ιδέα της χρήσης ενός μόνο μέγιστου ανά εποχή επεκτάθηκε στο να συμπεριλαμβάνονται οι  $r$ -μεγαλύτερες τιμές ( $r$ -largest values).
- Η μέθοδος των ανεξάρτητων καταιγίδων (Method of Independent Storms-MIS) χρησιμοποιεί μία νηνεμία, ή περίοδο ταχυτήτων του ανέμου κάτω από ένα επιλεγμένο κατώφλι (σχετικά χαμηλό), για να ξεχωρίσει τις καταιγίδες. Στη συνέχεια επιλέγεται το μέγιστο ακραίο από κάθε καταιγίδα. Μετά από επιπλέον προεπεξεργασία το δείγμα με τα συγκεντρωμένα μέγιστα από κάθε καταιγίδα προσαρμόζεται στη Γενικευμένη Κατανομή των Ακραίων Τιμών (GEV).
- Η μέθοδος Ανάλυσης μεγίστων του άνω κατωφλίου (Peak-over-threshold (POT) maxima), που εξάγονται από χρονοσειρά και σχηματίζουν μία χρονοσειρά ακραίων τιμών πάνω από ένα επιλεγμένο (σχετικά υψηλό) κατώφλι και χρησιμοποιούνται με τη Γενικευμένη Κατανομή Pareto.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης της κατανομής GEV με ετήσια μέγιστα είναι ότι απαιτούνται λίγες αποφάσεις κατά τον υπολογισμό των παραμέτρων της κατανομής ποσοστημορίων. Με τις άλλες μεθόδους αποφάσεις σχετικά με τις μέγιστες τιμές ή τις τιμές των κατωφλίων έχουν αντίκτυπο στις εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων. Δεύτερον, για να εφαρμοστεί με επιτυχία η θεωρία ακραίων τιμών, οι ακραίες τιμές θα πρέπει να είναι ανεξάρτητες και ταυτόσημα κατανεμημένες. Για την GEV με βάση τα ετήσια μέγιστα, αυτό είναι πιθανό να ισχύει, εκτός εάν τα μέγιστα για δύο χρόνια έχουν συνταχθεί από μία ενιαία καταιγίδα από τα τέλη Δεκεμβρίου έως αρχές Ιανουαρίου. Ωστόσο στις άλλες μεθόδους αν δε ληφθούν μέτρα για τη διατήρηση της ανεξαρτησίας των τιμών είναι πολύ πιθανό να εξαχθούν εξαρτημένες μέγιστες τιμές. Σε αυτό θα βοηθούσε η επιλογή ενός διαστήματος για να λαμβάνονται μέγιστα. Η μέθοδος των ανεξάρτητων καταιγίδων δημιουργεί ένα σύνολο από ανεξάρτητες καταιγίδες και στη συνέχεια επιλέγονται τα μέγιστα, με αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται προβλήματα εξαρτημένων τιμών. (Για περισσότερες λεπτομέρειες στις μεθόδους βλέπε Brabson and Palutikof, 2000).

Όπως φαίνεται από τη βιβλιογραφία πολλές κατανομές δίνουν καλά αποτελέσματα στην προσαρμογή της ταχύτητας του ανέμου και της ουράς της και για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η καλύτερη η εκτίμηση των παραμέτρων από τους μηχανικούς για πιο συγκεκριμένα αποτελέσματα.

## 7 ΑΝΑΛΥΣΗ

---

### 7.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η μελέτη που πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την εξέταση των ακραίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου σε παγκόσμια κλίμακα. Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν τη μέση 2-λεπτη ταχύτητα του ανέμου και αποκτήθηκαν από την Εθνική Υπηρεσία Κλιματικών Δεδομένων της Αμερικής (National Climatic Data Center), που τελεί υπό την αιγίδα της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανογραφικής και Ατμοσφαιρικής Διοίκησης των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (National Oceanic and Atmospheric Administration, συντομία NOAA). Η υπηρεσία αυτή συγκεντρώνει κλιματικά δεδομένα από τις εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες κάθε χώρας, για παράδειγμα στην Ελλάδα είναι η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY), και έχει δημιουργήσει μία παγκόσμια βάση κλιματικών δεδομένων Climate Data Online (CDO) η οποία είναι προσβάσιμη από τον καθένα και μπορεί να παρέχει δεδομένα για διάφορες κλιματικές μεταβλητές, όπως είναι για παράδειγμα η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η μέτρηση ηλιοφάνειας (Sunshine Observation), η διεύθυνση του ανέμου (wind direction), η ταχύτητα του ανέμου (wind observation) και αρκετές άλλες κλιματικές μεταβλητές. Η υπηρεσία αυτή παρέχει διαφόρων τύπων δεδομένα. Ανάμεσα στα δεδομένα που παρέχονται είναι δεδομένα πρόγνωσης από διάφορα μοντέλα, δεδομένα από δορυφορικές μετρήσεις, δεδομένα από επιφανειακές μετρήσεις που αποτελούν και το βασικό τύπο δεδομένων που παρέχονται. Τα πιο απλά αυτά από αυτά αφορούν τις ωριαίες μετρήσεις κάθε μεταβλητής και μπορεί να περιέχουν μία μέτρηση στην ώρα ή ακόμα και παραπάνω μετρήσεις σε μία ώρα, οι οποίες έχουν προκύψει από μετρήσεις σε μικρότερα χρονικά βήματα. Με βάση τις ωριαίες μετρήσεις διατίθενται και άλλα δεδομένα που αφορούν μέσες ημερήσιες και μηνιαίες τιμές αλλά και ακραίες τιμές για διάφορες μεταβλητές, όπως για τη θερμοκρασία, τη βροχόπτωση και τη χιονόπτωση για διάφορους σταθμούς ανά τον κόσμο αλλά κυρίως για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

Για την παρούσα διπλωματική αποκτήθηκαν δεδομένα από τη βάση δεδομένων Climate Data Online (CDO) που αφορούσαν επιφανειακές μέσες 2-λεπτες μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου (wind observation) από όλο τον κόσμο. Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου πραγματοποιούνται όπως περιγράφηκε και σε άλλο κεφάλαιο, μία φορά λίγο πριν την ώρα που αναφέρονται. Βασικό κριτήριο επιλογής των σταθμών προς μελέτη ήταν τα χρόνια των καταγραφών τους. Στη βάση δεδομένων περιέχονται πάνω από 10000 σταθμοί από όλο τον κόσμο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν πάνω από 5000 σταθμοί, επιλέχθηκαν 2552 με βάση τα χρόνια των καταγραφών τους και τελικά αναλύθηκαν οι 1864 μετά την εφαρμογή κριτηρίου για τα χρόνια των μετρήσεων καθώς υπήρχαν πολλές κενές

ώρες, ώρες δηλαδή στις οποίες δεν είχε πραγματοποιηθεί μέτρηση. Σε πολλούς σταθμούς, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω επίσης, οι μετρήσεις είναι πιθανό να μην πραγματοποιούνται κάθε ώρα αλλά μπορούν να υπάρχουν πάνω από μία μετρήσεις στην ώρα αλλά και στη χειρότερη μία μέτρηση ανά τρεις ώρες. Επίσης υπήρχαν και αρκετοί σταθμοί που είχαν μεγάλα άλματα ανάμεσα στα χρόνια των καταγραφών και έτσι δεν είχαν μετρήσεις σε όλη την περίοδο που δήλωναν ότι λειτουργούν οι σταθμοί. Θεωρήθηκε ότι τα 40 χρόνια μετρήσεων είναι επαρκή για τη μελέτη των ακραίων τιμών του ανέμου και ως αποτέλεσμα παρέμειναν οι 1864 που πληρούσαν αυτό το κριτήριο. Επομένως κριτήριο επιλογής των σταθμών από τη βάση δεδομένων ήταν τα χρόνια καταγραφών και επιλέχθηκε το σύνολο των χρόνων τους χωρίς κάποιο άλλο φίλτρο.

Τα ανεμολογικά δεδομένα που επιλέχθηκαν περιλαμβάνουν όλες τις διαθέσιμες μεταβλητές από τις μετρήσεις για τον άνεμο. Πιο συγκεκριμένα τις μεταβλητές εκείνες που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για τη διαστασιολόγηση των κατασκευών έναντι του ανέμου αλλά επίσης και για πρόγνωση ακραίων φαινομένων του ανέμου που είναι αναγκαίο για την αποφυγή απωλειών ζώων, καταστροφών περιουσιών και προβλημάτων σε αρκετούς τομείς της ζωής και της καθημερινότητας των ανθρώπων, όπως για παράδειγμα προβλήματα στις γραμμές τηλεφώνων, στην ηλεκτροδότηση, στις μετακινήσεις αλλά και στις μεταφορές μέσω της θάλασσας. Αυτά είναι η ταχύτητα του ανέμου, η διεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου τη στιγμή της μέτρησης καθώς και η τιμή της ριπής του ανέμου. Η μέτρηση της κάθε μεταβλητής του ανέμου έχει εξηγηθεί αναλυτικά πως γίνεται παραπάνω. Σε κάθε χώρα, ανάλογα με τον κώδικα των κατασκευών που χρησιμοποιεί, επιλέγεται και η ανεμολογική μεταβλητή που χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση κατασκευών για τον άνεμο αλλά ακόμα και ο μέσος χρόνος μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου για τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Για παράδειγμα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής χρησιμοποιείται πλέον για τη διαστασιολόγηση των κατασκευών έναντι του ανέμου η μέση ριπή τριών δευτερολέπτων (3-sec gust), ενώ στην Ευρώπη ο Ευρωκώδικας 1 χρησιμοποιεί τη μέση ταχύτητα του ανέμου των 10 λεπτών. Αν και αυτές οι τιμές λαμβάνονται τις περισσότερες φορές από μετεωρολογικούς ανεμολογικούς χάρτες είναι επιτακτική η ανάγκη αναβάθμισης των χαρτών αυτών με συνυπολογισμό φαινομένων που προκαλούν πιο ακραία φαινόμενα, όπως οι καταιγίδες που προκαλούν δυνατούς ανέμους και βροχή μαζί, αλλά και καλύτερη ανάλυση των δεδομένων που υπάρχουν από τέτοια φαινόμενα για να βρεθούν με ακρίβεια οι κατανομές και να εξαχθούν μοντέλα που εκφράζουν καλύτερα τις μεταβλητές, αφού σε πολλές χώρες δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για μεγάλες περιόδους επαναφοράς. Έτσι και ο σχεδιασμός θα γίνεται με μεγαλύτερη ασφάλεια αλλά και οικονομικότερα, και θα επιτευχθεί βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των κατασκευών. Βέβαια τα φορτία που δέχεται μία κατασκευή δεν είναι μόνο λόγω της ταχύτητας ή των ριπών του ανέμου αλλά βασικό ρόλο παίζουν και άλλα όπως η διεύθυνση του ανέμου και το σχήμα της κατασκευής, αλλά παρόλα αυτά η ανάλυση των ακραίων τιμών του ανέμου και η δημιουργία του

φάσματος της ταχύτητας είναι μία απαραίτητη μελέτη για το σχεδιασμό και διαστασιολόγηση των κατασκευών. Σε αυτή τη μελέτη επιλέχθηκε η τιμή της μέσης 2-λεπτης ταχύτητας του ανέμου για την εξαγωγή των ακραίων τιμών του ανέμου που αναλύθηκαν. Η μέση ταχύτητα του ανέμου ίσως δεν περιγράφει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις μέγιστες τιμές του ανέμου που εμφανίστηκαν μέσα στην ημέρα αλλά λόγω των συχνών μετρήσεων ανά μία ώρα ή λιγότερο, και του συνολικού όγκου των καταγραφών αποτελεί μία χαρακτηριστική τιμή για τη μελέτη της ακραίας ταχύτητας του ανέμου αν και θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι οι μέγιστες τιμές της μέσης ταχύτητας του ανέμου είναι μικρότερες από τη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου που μπορεί να εμφανίστηκε μέσα στη μέρα. Η μέση ταχύτητα λόγω των παραπάνω λόγων παρέχει μία πιο ασφαλή εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή του σταθμού. Επίσης, επειδή η μελέτη είναι παγκόσμια και οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι από όλον τον κόσμο είναι αδύνατο να είναι γνωστή η περιοχή στην οποία βρίσκονται για το πως είναι μορφολογικά. Αυτό παρόλο που λαμβάνεται υπόψη με την επιλογή των 10 μέτρων από την επιφάνεια της γης για την μέτρηση από το ανεμόμετρο, ωστόσο εάν ο σταθμός βρίσκεται ανάμεσα σε ορεινούς όγκους ή κοντά σε ψηλά κτίρια είναι δυνατόν να υπάρξει υποεκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου γιατί τα ψηλά βουνά ανακόπτουν την ταχύτητα του ανέμου και ευνοούν τις συνθήκες νηνεμίας στις περιοχές που βρίσκονται ανάμεσά τους. Επίσης σε περιοχές κοντά στη θάλασσα, δημιουργείται απόγειος αύρα και ο άνεμος πνέει περισσότερες ώρες το χρόνο, άρα το ποσοστό άπνοιας είναι μικρότερο (Φιλιππίδου, 2015).

Η Φιλιππίδου (2015) στη διπλωματική της εργασία δημιούργησε τις εμπειρικές πυκνότητες πιθανότητας για τέσσερεις σταθμούς στην Ελλάδα (Φίλιππος, Λαμία, Λάρισα και Νέα Αγχίαλος) και παρατήρησε ότι ο αριθμός των μηδενικών τιμών, δηλαδή της νηνεμίας, είναι αρκετά μεγάλος και επομένως δε μπορεί να προσαρμοστεί μία κατανομή συνολικά σε όλες τις τιμές της ωριαίας ταχύτητας. Έτσι έκανε την ανάλυση χωριστά για τις μηδενικές και τις θετικές τιμές της ταχύτητας, δηλαδή σε δύο φάσεις. Εξέτασε επομένως τη μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου ως μεταβλητή μικτού τύπου. Διαχώρισε τη μεταβλητή της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου σε δύο μέρη ως εξής: το πρώτο είναι το διακριτό μέρος που περιλαμβάνει όλες τις μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου που έχουν τιμή μηδέν και το δεύτερο είναι το συνεχές μέρος και περιλαμβάνει τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου που ανήκουν στο διάστημα  $(0, +\infty)$ , είναι δηλαδή θετικές (Φιλιππίδου, 2015). Το ίδιο παρατηρήθηκε και στα δικά μας δεδομένα και έτσι αναλόγως έγινε η αφαίρεση των μηδενικών τιμών για την επιλογή των ποσοστημορίων, όπως εξηγείται και αναλυτικότερα παρακάτω.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω οι μετρήσεις δεν έχουν σταθερό χρονικό βήμα και μπορούν να υπάρχουν παραπάνω από μία μέτρηση μέσα στην ώρα αλλά επίσης είναι πιθανό να υπάρχουν ακόμα και ελάχιστες μετρήσεις μέσα στην ημέρα, μία κάθε οχτώ ώρες δηλαδή

συνολικά 3 μετρήσεις την ημέρα σε κάποιους σταθμούς. Σε αυτό ρόλο παίζει η χώρα στην οποία βρίσκεται ο σταθμός καθώς και η χρονολογία μέτρησης. Σε σταθμούς της Ευρώπης και της Αμερικής για παράδειγμα μετά το 1973 υπάρχουν πάνω από μία μετρήσεις μέσα στην ώρα, ενώ σε σταθμούς της Ασίας υπάρχουν όλα τα χρόνια μία μέτρηση ανά 8 ώρες. Αυτό βέβαια επηρεάζει μόνο τον αριθμό των μετρήσεων καθώς στην παρούσα μελέτη ενδιαφέρει μόνο η τιμή της ταχύτητας καθώς επιλέγονται και χρησιμοποιούνται μόνο οι μέγιστες ταχύτητες που ανήκουν πάνω από κάποιο όριο, και πιο συγκεκριμένα από κάποιο ποσοστημόριο, ανεξαρτήτως από που προέρχονται. Δύο παρατηρήσεις που πρέπει να γίνουν πάνω στα αρχικά δεδομένα είναι το πως αντιμετωπίστηκαν οι μηδενικές τιμές και οι ίδιες τιμές που υπήρχαν μέσα στα δεδομένα. Πρέπει να σημειωθεί πως τα αρχικά αυτά δεδομένα περιλαμβάνουν πολλές μηδενικές τιμές, οι οποίες περιγράφουν συνθήκες νηνεμίας. Παρατηρήθηκε ότι σε κανένα σταθμό δεν υπάρχουν καταγραφές για ταχύτητες ανέμου από 0.1 έως 0.5 m/s. Από αυτή την παρατήρηση, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως όταν ο άνεμος πνέει με ταχύτητα κάτω του 0.5 m/s, τα ανεμόμετρα καταγράφουν την τιμή 0 m/s. Αυτό οφείλεται σε προβλήματα αδράνειας των ανεμομέτρων που προκαλούν λάθη στις χαμηλές αλλά και στις υψηλές ταχύτητες του ανέμου λόγω προβλημάτων στην επιτάχυνση και επιβράδυνση των ανεμομέτρων. Αυτά τα προβλήματα έχουν αναφερθεί και στην ανάλυση των μηχανημάτων που κάνουν τις μετρήσεις της ταχύτητας, της διεύθυνσης και των ριπών το ανέμου. Επομένως, όταν υπάρχει μέτρηση 0 m/s, σημαίνει πως ο άνεμος πνέει με μία πολύ μικρή ταχύτητα της τάξεως των 0 - 0.5 m/s. Το ποσοστό νηνεμίας (πολύ μικρές τιμές ταχύτητας) είναι αρκετά υψηλό στις μετρήσεις των σταθμών που επιλέχθηκαν. Η επιλογή των μέγιστων τιμών βασίστηκε στη μέθοδο του άνω κατωφλίου (Peaks Over Threshold Analysis) και σαν αποτέλεσμα έγινε η εξαγωγή τεσσάρων διαφορετικών δειγμάτων ανάλυσης και σύγκρισης με βάση τέσσερα διαφορετικά ποσοστημόρια (100%, 10%, 5% 1%). Η αναλυτικότερη περιγραφή των δειγμάτων γίνεται παρακάτω. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των αρκετών μηδενικών τιμών, δε λήφθησαν υπόψη στην επιλογή των ακραίων τιμών των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Δηλαδή οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δείγμα της ανάλυσης δεν επιλέχθηκαν με βάση τις συνολικές τιμές αλλά μόνο τις θετικές καθώς η μελέτη γίνεται για τις μέγιστες τιμές του ανέμου όταν φυσάει ο άνεμος. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, ο άνεμος αποτελείται από το διακριτό κομμάτι που είναι οι μηδενικές τιμές και από το συνεχές κομμάτι που είναι οι τιμές του ανέμου όταν ο άνεμος φυσά. Είναι λογικό επομένως να αφαιρεθεί στην ανάλυση το διακριτό κομμάτι του ανέμου, αφού δεν είναι δυνατόν να προσαρμοστούν συνεχείς θεωρητικές κατανομές σε μη συνεχή, διακριτού τύπου εμπειρική. Ένα ακραίο παράδειγμα που δείχνει την ορθότητα της επιλογής των δειγμάτων είναι το ακόλουθο: Έστω ότι έχει επιλεγεί ένας σταθμός που το 90% των τιμών του είναι 0 και μόνο το 10% των τιμών του είναι άνεμος που φυσάει δηλαδή θετικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Σε αυτή την περίπτωση το ανώτερο 90% δείγμα των μετρήσεων δεν είναι η ουρά της κατανομής αλλά όλες οι θετικές

τιμές. Με το ίδιο σκεπτικό αν υπήρχαν παραπάνω από μία τιμές της ταχύτητας του ανέμου που ήταν ίδιες, κρατήθηκε η τιμή αυτή μία φορά μόνο. Οι περίοδοι επαναφοράς όμως που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα αφορούν το σύνολο των μετρήσεων και έχει χρησιμοποιηθεί διορθωτικός συντελεστής, για την αποδέσμευση της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, για να λαμβάνει υπόψη το σύνολο των μετρήσεων γιατί στην περίοδο επαναφοράς ανήκουν και οι μηδενικές τιμές που ο άνεμος δε φυσάει καθόλου.

## 7.2 ΑΡΧΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα αρχικά όπως αποκτήθηκαν από την παγκόσμια βάση δεδομένων περιείχαν όλες τις πληροφορίες του ανέμου, τη μέση ταχύτητα του ανέμου, τη διεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου αλλά και τη μέτρηση της ριπής του ανέμου όπου αυτή υπήρχε. Η μέτρηση της ριπής του ανέμου έχει ελάχιστες μετρήσεις επειδή δεν τη μετρούν όλα τα ανεμόμετρα αλλά και επειδή υπάρχει το κριτήριο της διαφοράς των 10 κόμβων για να γίνει η μέτρηση. Η ριπή του ανέμου δε διαρκεί πάνω από 20 δευτερόλεπτα και έρχεται συνήθως σε διαστήματα 2 λεπτών. Από όλες αυτές τις μετρήσεις μόνο η ταχύτητα του ανέμου μελετήθηκε στην παρούσα εργασία. Αφού επιλέχθηκαν με βάση το κριτήριο του μήκους των χρόνων των καταγραφών οι σταθμοί που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έγινε η αρχική επεξεργασία των δεδομένων. Δημιουργήθηκαν επομένως χρονοσειρές οι οποίες είχαν μόνο τις μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου. Αρχικά στις χρονοσειρές της ταχύτητας του ανέμου έπρεπε να διαγραφούν οι τιμές 999.9 που υπήρχαν στα αρχικά δεδομένα καθώς αναφέρονται σε σφάλματα μέτρησης ή σε έλλειψη μέτρησης και δημιουργούν πρόβλημα στην ανάλυση καθώς δεν αποτελούν μέτρηση.

Καθώς τα δεδομένα προέρχονται από διάφορες χώρες και διαφορετικές βάσεις δεδομένων υπήρχαν κάποιες απλοποιήσεις που αναγκαστικά έπρεπε να γίνουν, λόγω έλλειψης πληροφοριών και μεγάλου όγκου δεδομένων για την επιβεβαίωσή τους. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν στην παρούσα διπλωματική δεν αποτελούν τιμές που έχουν προκύψει από περιοχές που υπόκεινται σε τυφώνες ή καταιγίδες (Tornadoes data). Η συγκεκριμένη ιστοσελίδα δεν κρατάει τέτοια δεδομένα. Επίσης τα επιφανειακά ανεμόμετρα κάτω από τέτοιες συνθήκες δε θα λειτουργούσαν και δε θα είχαν μετρήσεις. Όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή οι μετρήσεις των ταχυτήτων σε τέτοια φαινόμενα γίνεται με δορυφορικές ή άλλες εκτιμήσεις καθώς τα επιφανειακά ανεμόμετρα καταστρέφονται λόγω των ισχυρών ανέμων. Δεύτερον καθώς είναι αδύνατον να είναι γνωστό το γύρω περιβάλλον των σημείων των μετρήσεων θεωρήθηκε πως δεν επηρεάστηκαν οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου από το γύρω περιβάλλον όπως είναι η μορφολογία του εδάφους ή ψηλές κατασκευές κοντά στα σημεία που είναι εγκατεστημένα τα ανεμόμετρα. Τα ψηλά βουνά επηρεάζουν τον άνεμο και προκαλούν παρατεταμένη νηνεμία σε Λάρισα και Φίλιππο, λόγω των ορεινών όγκων της

Πίνδου και του Ολύμπου (Φιλιππίδου, 2015). Ακόμα για ανεμόμετρα τα οποία είναι εγκατεστημένα σε ψηλά κτίρια ή κατασκευές (π.χ. γέφυρες) οι οποίες λόγω ανέμων υπόκεινται σε κίνηση, θεωρήθηκε ότι δεν επηρεάστηκαν από τη σχετική αυτή κίνηση των κτιρίων. Τέλος αγνοήθηκε οποιαδήποτε συσχέτιση υπάρχει μεταξύ των μέγιστων τιμών, που θα μπορούσε να υπάρχει καθώς για παράδειγμα δύο μεγάλες τιμές της ταχύτητας του ανέμου θα μπορούσαν να έχουν προκύψει από το ίδιο το περιστατικό του ανέμου, διότι στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκαν τα μέγιστα από όπου και αν προέρχονται.

### 7.3 ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

Μετά την επιλογή των δεδομένων έγινε η εξαγωγή των μέγιστων τιμών ή τιμών της ουράς που μελετήθηκαν. Η επιλογή βασίστηκε στη μέθοδο της ανάλυσης του άνω κατωφλίου (Peak Over Threshold Analysis) και έγινε η εξαγωγή τεσσάρων δειγμάτων ανάλυσης με βάση την επιλογή του συνόλου των δεδομένων και τριών ποσοστημορίων 10%, 5%, 1%. Το ποσοστημόριο είναι ένα στατιστικό μέτρο, το οποίο υποδεικνύει την τιμή κάτω ή πάνω από την οποία βρίσκεται ένα δεδομένο ποσοστό παρατηρήσεων σε μία ομάδα παρατηρήσεων. Τα ποσοστημόρια αποτελούν μέτρο της σχετικής θέσης μίας παρατήρησης μέσα σε ένα σύνολο δεδομένων. Το  $P$ -οστό ποσοστημόριο, όπου  $P \in [0, 1]$ , μίας λίστας  $N$  διατεταγμένων τιμών (διατεταγμένες σε αύξουσα σειρά) είναι η μικρότερη τιμή της λίστας έτσι ώστε το  $P$  επί τοις εκατό των δεδομένων είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο.

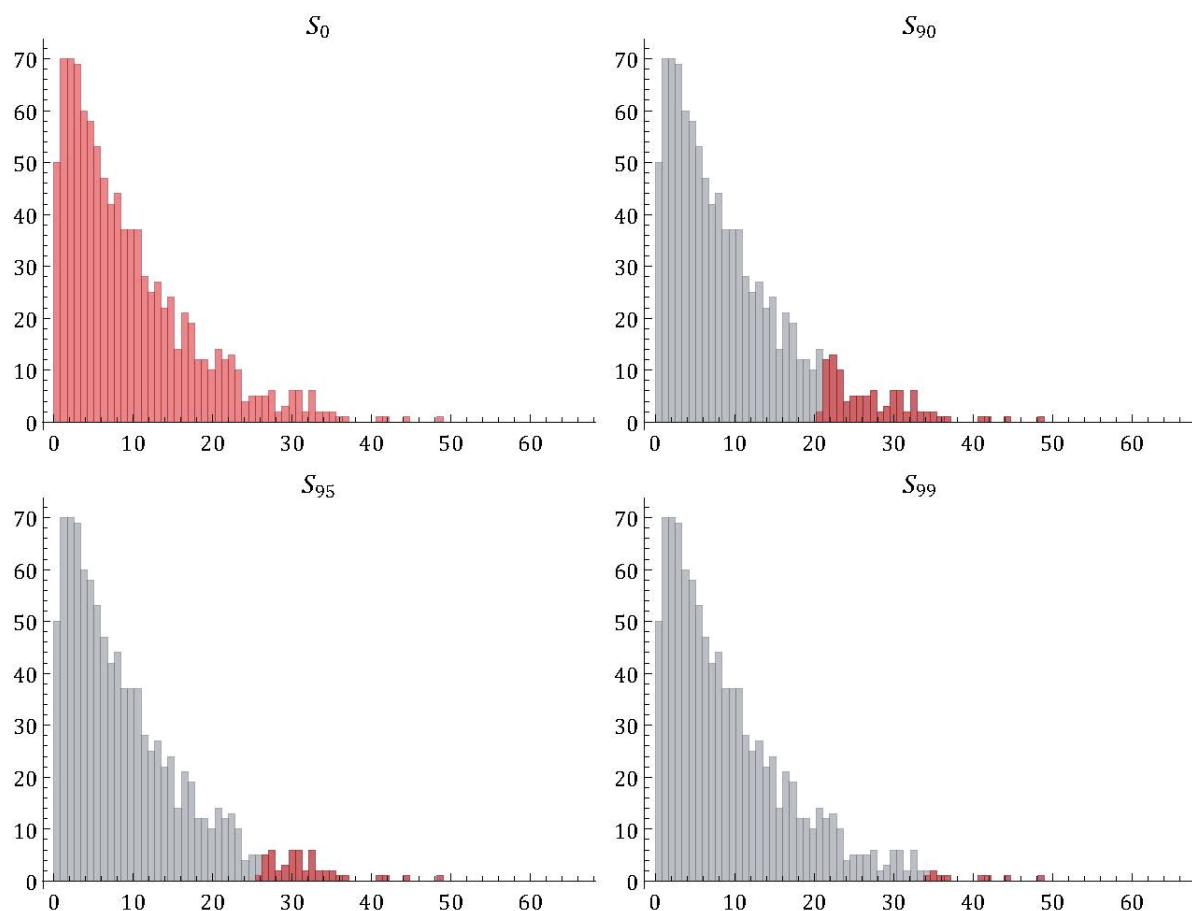
$$x_p = F^{-1}(p) = \inf\{x \in \mathbb{R} | F(x) \geq p\}, p \in [0, 1] \quad (40)$$

Επομένως με βάση τα τέσσερα ποσοστημόρια που επιλέχθηκαν, προέκυψαν τα δείγματα μελέτης

$$S_{100p} = \{x | x \geq x_p\} \quad (41)$$

Τα τέσσερα δείγματα μελέτης  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$  περιέχουν τιμές που αντιπροσωπεύουν όλο και περισσότερο την ουρά της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου. Για παράδειγμα το δείγμα  $S_0$  αντιστοιχεί σε όλες τις τιμές της κατανομής, το  $S_{90}$  αντιστοιχεί στις μεγαλύτερες του 10% τιμές, το δείγμα  $S_{95}$  περιέχει το 5% των μεγαλύτερων τιμών και το δείγμα  $S_{99}$  περιέχει το 1% των μεγαλύτερων τιμών της ουράς της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου. Τα δείγματα μελέτης απεικονίζονται και στο Σχήμα 7.1.





**Σχήμα 7.1.** Στα ιστογράμματα παρουσιάζονται τα τέσσερα δείγματα μελέτης  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ . Με κόκκινο απεικονίζονται οι τιμές της κατανομής που συμπεριλαμβάνονται σε κάθε δείγμα μελέτης και με γκρι οι τιμές που δε συμπεριλαμβάνονται.

## 7.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Από τη στιγμή που επιλέχθηκαν οι σταθμοί με τα δεδομένα που θα αναλυθούν και δημιουργήθηκαν οι χρονοσειρές της ταχύτητας του ανέμου ξεκίνησε η ανάλυση. Οι θεωρητικές κατανομές ουράς που προσαρμόζονται και συγκρίνονται σχετικά με την επίδοση προσαρμογής είναι: η Pareto τύπου II (PII), που είναι κατανομή δύναμης, η Λογαριθμοκανονική (LN) που έχει βαριά ουρά, η Weibull (W) που έχει ενδιάμεση. Αυτές οι κατανομές έχουν επιλεγεί για την απλότητά τους, τη δημοτικότητά τους, καθώς επίσης και γιατί πολλές άλλες πιο πολύπλοκες κατανομές έχουν ουρά με παρόμοια ασυμπτωτική συμπεριφορά. Έγινε απευθείας προσαρμογή των τριών αυτών κατανομών με χρήση της Νόρμας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσαρμογή επεξεργάστηκαν με αρκετούς τρόπους και φαίνονται στην παρακάτω ανάλυση.

## 7.5 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στο Σχήμα 7.2. παρουσιάζονται σε σχηματική απεικόνιση όλοι οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την παγκόσμια ανάλυση των ακραίων ταχυτήτων ανέμου.



**Σχήμα 7.2.** Γεωγραφική Απεικόνιση των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη

## 7.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε απευθείας προσαρμογή των εμπειρικών κατανομών των τεσσάρων δειγμάτων που επιλέχθηκαν για τις ακραίες τιμές, που εκτιμήθηκαν από τα δεδομένα που αποκτήθηκαν για κάθε σταθμό, στις ουρές των θεωρητικών κατανομών και στη συνέχεια συγκρίθηκαν μεταξύ τους με διάφορους τρόπους έτσι ώστε να βρεθεί η πιο κατάλληλη για την προσομοίωση των μεγίστων της μέσης ταχύτητας του ανέμου. Η προσαρμογή των θεωρητικών κατανομών και των ουρών τους στο σύνολο και στις ουρές των εμπειρικών δεδομένων έγινε ελαχιστοποιώντας μία τροποποιημένη νόρμα που δίνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Έτσι, διαπιστώνεται η καταλληλότητα και εφαρμοσιμότητα των θεωρητικών κατανομών που ελέγχονται. Η νόρμα που χρησιμοποιήθηκε είναι η

$$N1 = \frac{1}{N} \sum_{i=n-N+1}^n \left( \frac{\bar{F}(x_{(i)})}{\bar{F}_N(x_{(i)})} - 1 \right)^2 \quad (42)$$

Σε προηγούμενες εργασίες (Paralexiou et al., 2013; Νεραντζάκη, 2012) έχουν δοκιμαστεί ως προς την αποτελεσματικότητα τους μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo και άλλες νόρμες μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Αυτές ήταν οι

$$N2 = \frac{1}{N} \sum_{i=n-N+1}^n \left( \frac{x_u}{x_{(i)}} - 1 \right)^2 \quad (43)$$

$$N3 = \frac{1}{N} \sum_{i=n-N+1}^n (x_u - x_{(i)})^2 \quad (44)$$

και βρέθηκε ότι όσον αφορά υδρολογικές στοχαστικές μεταβλητές εκφράζει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε όρους πιθανότητας η νόρμα N1 δίνει πιο αμερόληπτα αποτελέσματα και εκφράζει καλύτερα τις παραμέτρους σε όλες τις κατανομές σε σχέση με τις άλλες δύο. Ιδιαίτερα για την N3 η οποία είναι και η πιο κλασσική και ευρέως χρησιμοποιούμενη, πρέπει να αναφερθεί ότι δίνει τα πιο μεροληπτικά αποτελέσματα (Papalexiou et al., 2013).

Η προτεινόμενη προσέγγιση σύμφωνα με την οποία προσαρμόζεται η θεωρητική κατανομή μόνο στις  $N$  μεγαλύτερες τιμές κάθε σταθμού, διασφαλίζει ότι η κατανομή που προσαρμόζεται θα παρέχει την καλύτερη δυνατή περιγραφή της ουράς καθώς δεν θα επηρεάζεται από τις χαμηλότερες τιμές (Papalexiou et al., 2013).

## 7.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η Pareto και η Λογαριθμοκανονική κατανομή ανήκουν στην κατηγορία των υποεκθετικών κατανομών και θεωρούνται κατανομές με χοντρή ουρά. Η Weibull μπορεί να ανήκει σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τις τιμές της παραμέτρου σχήματος της. Από πρακτική άποψη, η κατάταξη αυτών των κατανομών από την πιο χοντρή ουρά προς την πιο λεπτή είναι: Pareto, Λογαριθμοκανονική, Weibull με παράμετρο σχήματος  $< 1$ , Weibull με παράμετρο σχήματος  $> 1$  (El Adlouni et al., 2008). Να σημειωθεί ότι η Pareto είναι η μόνη κατανομή τύπου δύναμης, ενώ τα υπόλοιπα δύο μοντέλα είναι εκθετικής μορφής. Οι τρεις τύποι ουρών προσαρμόζονται απευθείας στα δεδομένα των 1864 σταθμών μέσω ελαχιστοποίησης της νόρμας  $N1$ . Όποια κατανομή έδινε το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα αυτή προσαρμόστηκε καλύτερα στα δεδομένα. Για να φανεί καλύτερα ποια από τις τρεις κατανομές δίνει την καλύτερη εφαρμογή, οι τρεις ουρές συγκρίθηκαν ανά τρεις αλλά και σε ζεύγη με βάση το σφάλμα που έδωσαν.

Στον Πίνακα 7.1 γίνεται η σύγκριση των προσαρμοσμένων ουρών ανά δύο βάση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εξετάστηκε η προσαρμογή των κατανομών σε τέσσερα δείγματα. Εξετάστηκε αρχικά η προσαρμογή των τριών κατανομών στο δείγμα  $S_0$  και στη συνέχεια στα δείγματα  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ . Επίσης, η προσαρμογή έγινε και σε δεύτερο επίπεδο ανά μήνα και τελικά στο σύνολο όλων των μηνών. Όπως φαίνεται και στον

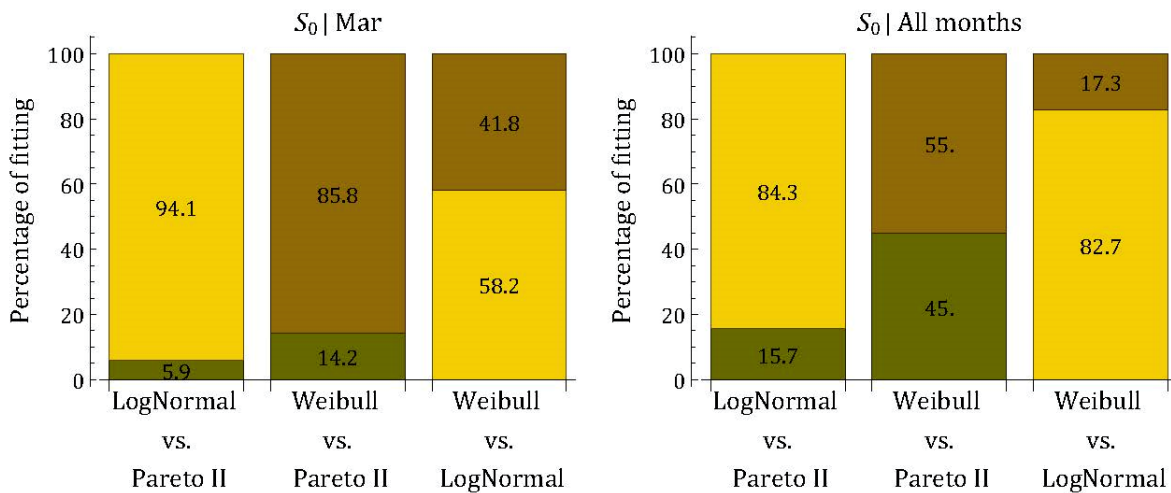
παρακάτω πίνακα, η Λογαριθμοκανονική κατανομή προσαρμόζεται καλύτερα από την Pareto II σε όλους τους μήνες και σε όλα τα δείγματα. Το ίδιο ισχύει και για την κατανομή Weibull, η οποία προσαρμόζεται καλύτερα από την Pareto II στο δείγμα  $S_0$  και στο δείγμα  $S_{90}$ . Όμως, στο  $S_{99}$  παρατηρείται σε αρκετούς μήνες και στο σύνολο των μηνών η Pareto II να προσαρμόζεται καλύτερα από τη Weibull. Στη σύγκριση μεταξύ της Λογαριθμοκανονικής κατανομής και της Weibull, η Λογαριθμοκανονική είναι πάντα καλύτερη όπως συμβαίνει στη σύγκρισή της με την Pareto II. Επομένως σε κάθε σύγκριση προκύπτει καταλληλότερη η κατανομή με τη δεύτερη πιο βαριά ουρά, στο μεγαλύτερο ποσοστό των σταθμών.

**Πίνακας 7.1.** Σύγκριση των κατανομών ανά δύο βάσει του ποσοστού προσαρμογής των κατανομών. Η προσαρμογή έγινε μέσω του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος και της ελαχιστοποίησης της νόρμας  $N1$  για κάθε μήνα και για κάθε δείγμα. Με πράσινο χρώμα στον πίνακα τονίζονται οι τιμές που υπερέρχουν στη σύγκριση μεταξύ των δύο κατανομών.

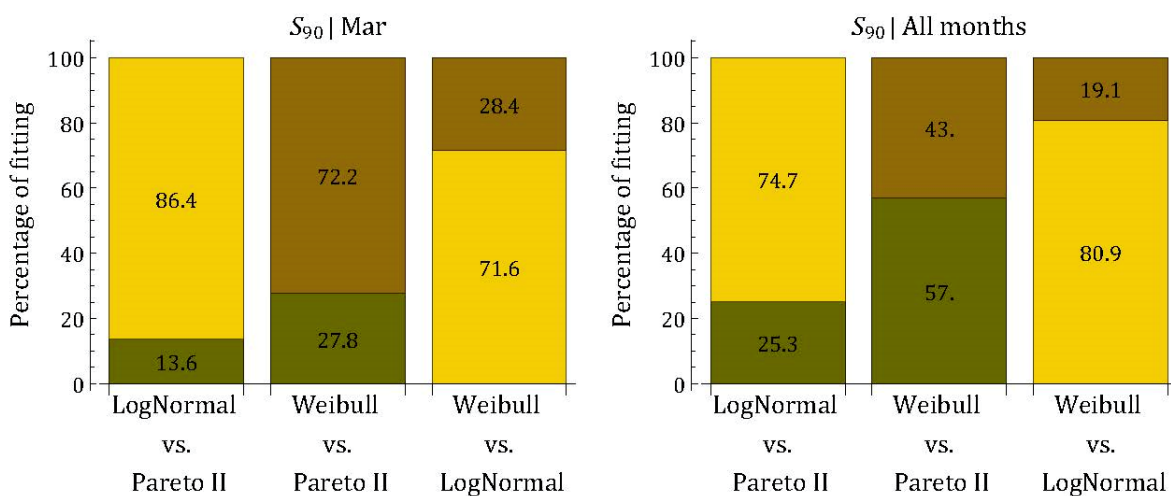
	$S_0$						$S_{90}$						$S_{95}$						$S_{99}$					
	PII	LN	PII	W	LN	W	PII	LN	PII	W	LN	W	PII	LN	PII	W	LN	W	PII	LN	PII	W	LN	W
Jan	10	90	18	82	59	41	17	83	31	69	69	31	20	80	36	64	69	31	33	67	44	56	61	39
Feb	8	92	15	85	57	43	15	85	29	71	70	30	20	80	35	65	69	31	33	67	45	55	61	39
Mar	6	94	14	86	58	42	14	86	28	72	72	28	19	81	33	67	72	28	31	69	44	56	65	35
Apr	4	96	13	87	62	38	14	86	29	71	72	28	18	82	35	65	71	29	32	68	45	55	63	37
May	5	95	17	83	67	33	14	86	33	67	77	23	19	81	38	62	76	24	33	67	49	51	67	33
Jun	4	96	21	79	74	26	16	84	41	59	81	19	22	78	47	53	78	22	39	61	58	42	68	32
July	5	95	23	77	77	23	19	81	44	56	82	18	25	75	50	50	80	20	42	58	60	40	67	33
Aug	5	95	26	74	76	24	19	81	46	54	80	20	26	74	52	48	78	22	45	55	61	39	66	34
Sep	6	94	25	75	70	30	18	82	43	57	76	24	24	76	48	52	75	25	42	58	54	46	64	36
Oct	8	92	20	80	65	35	16	84	37	63	72	28	22	78	41	59	72	28	36	64	51	49	63	37
Nov	10	90	18	82	60	40	16	84	32	68	69	31	21	79	37	63	69	31	34	66	46	54	63	37
Dec	10	90	18	82	57	43	17	83	31	69	68	32	22	78	36	64	69	31	34	66	45	55	63	37
All	16	84	45	55	83	17	25	75	57	43	81	19	29	71	58	42	78	22	36	64	57	43	69	31

Πιο αναλυτικά, φαίνεται η υπεροχή της Λογαριθμοκανονικής κατανομής απέναντι στις Pareto II και Weibull στο δείγμα  $S_0$  για όλους τους μήνες ξεχωριστά, αλλά και στα δεδομένα όλων των μηνών μαζί (All Months). Επίσης η Weibull είναι καλύτερη στο δείγμα  $S_0$  από την Pareto II σε όλους τους μήνες και στα δεδομένα όλων των μηνών μαζί. Στο δείγμα  $S_{90}$  η Λογαριθμοκανονική είναι επίσης καλύτερη από τις άλλες δύο κατανομές σε όλους τους μήνες και στα δεδομένα όλων των μηνών μαζί. Σε αυτό το δείγμα η Weibull είναι καλύτερη της Pareto II σε όλους τους μήνες όμως η Pareto II είναι καλύτερη στα δεδομένα όλων των μηνών μαζί του  $S_{90}$ . Στο δείγμα  $S_{95}$  η Λογαριθμοκανονική υπερέχει πάλι των άλλων δύο, όπως συμβαίνει και στο  $S_{99}$ . Ανάμεσα στις άλλες δύο κατανομές στο δείγμα  $S_{95}$  η Weibull είναι καλύτερη από την Pareto II σχεδόν σε όλους τους μήνες εκτός του Αυγούστου και του συνόλου των δεδομένων όπου πάλι η Pareto II είναι οριακά καλύτερη. Στο δείγμα  $S_{99}$  η Weibull είναι οριακά καλύτερη της Pareto II σε όλους τους μήνες εκτός των Ιουνίου, Ιουλίου, Σεπτεμβρίου, Οκτωβρίου αλλά και του συνόλου των δεδομένων όπου υπερέχει η συνάρτηση με την πιο χοντρή ουρά. Μία άλλη παρατήρηση που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι στο δείγμα  $S_{95}$  και στο  $S_{99}$  στους μήνες Ιούνιο έως Οκτώβριο οι κατανομές Weibull και Pareto II βρίσκονται πολύ κοντά. Αυτό φαίνεται και πιο καθαρά στο Σχήμα 7.10, όπου βρίσκονται διατεταγμένες οι μηνιαίες τιμές της βαθμονόμησης για τις τρεις κατανομές και στα τέσσερα ποσοστημόρια ανάλυσης.

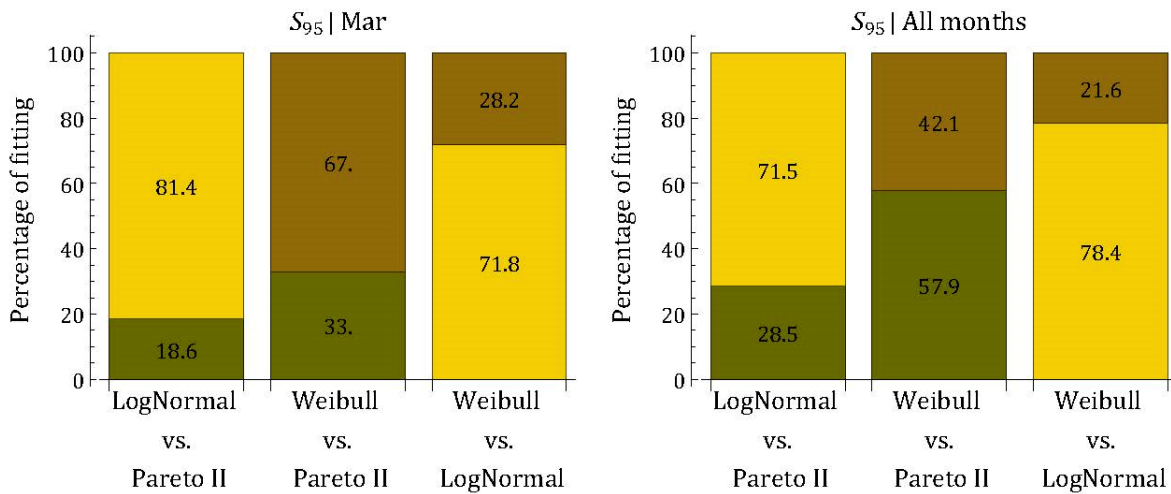
Στο Σχήμα 7.3 έως Σχήμα 7.6 παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση των τριών κατανομών ανά δύο για το μήνα Μάρτιο και για το σύνολο των μηνών για τα τέσσερα δείγματα των ουρών που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Παράρτημα A υπάρχουν αναλυτικότερα όλοι οι μήνες για όλες τις ουρές, στα σχήματα Σχήμα A.1 έως Σχήμα A.12.



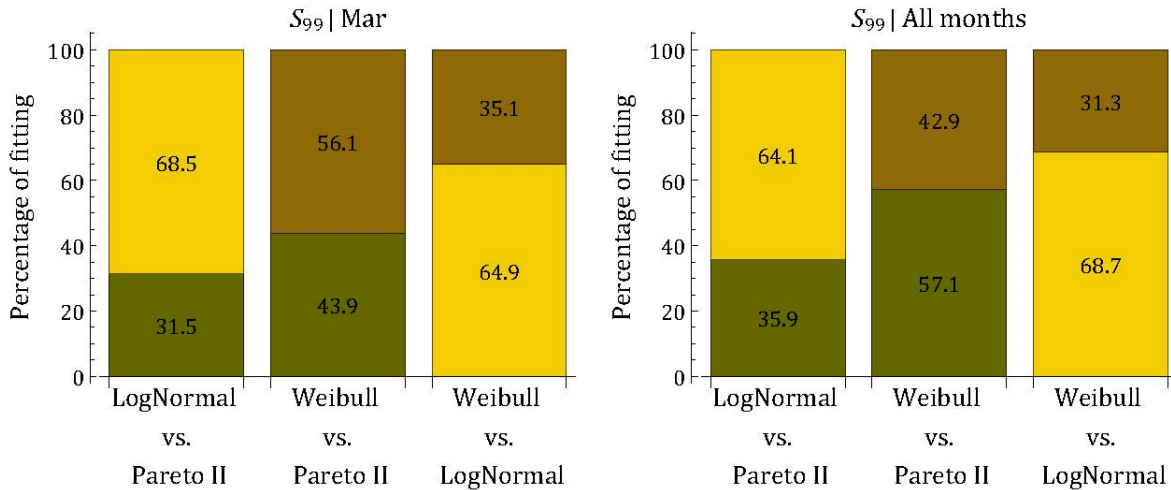
**Σχήμα 7.3.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν, για το μήνα Μάρτιο και στα δεδομένα όλων των μηνών μαζί (All Months) για το δείγμα  $S_0$  (πράσινο | Pareto II, κίτρινο | Λογαριθμοκανονική, καφέ | Weibull). Ενδεικτικά για το μήνα Μάρτιο η Λογαριθμοκανονική είναι σε μεγάλο ποσοστό καλύτερη της Pareto II και της Weibull, και η Weibull υπερέχει της Pareto II. Στο σύνολο των μηνών η Λογαριθμοκανονική υπερέχει των άλλων δύο, ενώ η Weibull είναι καλύτερη της Pareto II.



**Σχήμα 7.4.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν, για το μήνα Μάρτιο και στα δεδομένα όλων των μηνών μαζί (All Months) για το δείγμα  $S_{90}$  (πράσινο | Pareto II, κίτρινο | Λογαριθμοκανονική, καφέ | Weibull). Ενδεικτικά για το μήνα Μάρτιο η Λογαριθμοκανονική είναι σε μεγάλο ποσοστό καλύτερη της Pareto II και της Weibull, και η Weibull υπερέχει της Pareto II. Στο σύνολο των μηνών η Λογαριθμοκανονική υπερέχει των άλλων δύο, ενώ η Pareto II είναι καλύτερη της Weibull σε αυτό το δείγμα.



**Σχήμα 7.5.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για το μήνα Μάρτιο και στα δεδομένα όλων των μηνών μαζί (All Months) για το δείγμα S<sub>95</sub> (πράσινο | Pareto II, κίτρινο | Λογαριθμοκανονική, καφέ | Weibull). Ενδεικτικά για το μήνα Μάρτιο η Λογαριθμοκανονική είναι σε μεγάλο ποσοστό καλύτερη της Pareto II και της Weibull, και η Weibull υπερέχει της Pareto II. Στο σύνολο των μηνών η Λογαριθμοκανονική υπερέχει των άλλων δύο, ενώ η Pareto II είναι καλύτερη της Weibull.



**Σχήμα 7.6.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για το μήνα Μάρτιο και στα δεδομένα όλων των μηνών μαζί (All Months) για το δείγμα S<sub>99</sub> (πράσινο | Pareto II, κίτρινο | Λογαριθμοκανονική, καφέ | Weibull). Ενδεικτικά για το μήνα Μάρτιο η Λογαριθμοκανονική είναι σε μεγάλο ποσοστό καλύτερη της Pareto II και της Weibull, και η Weibull υπερέχει της Pareto II. Στο σύνολο των μηνών η Λογαριθμοκανονική υπερέχει των άλλων δύο, ενώ πάλι η Pareto II είναι καλύτερη της Weibull.



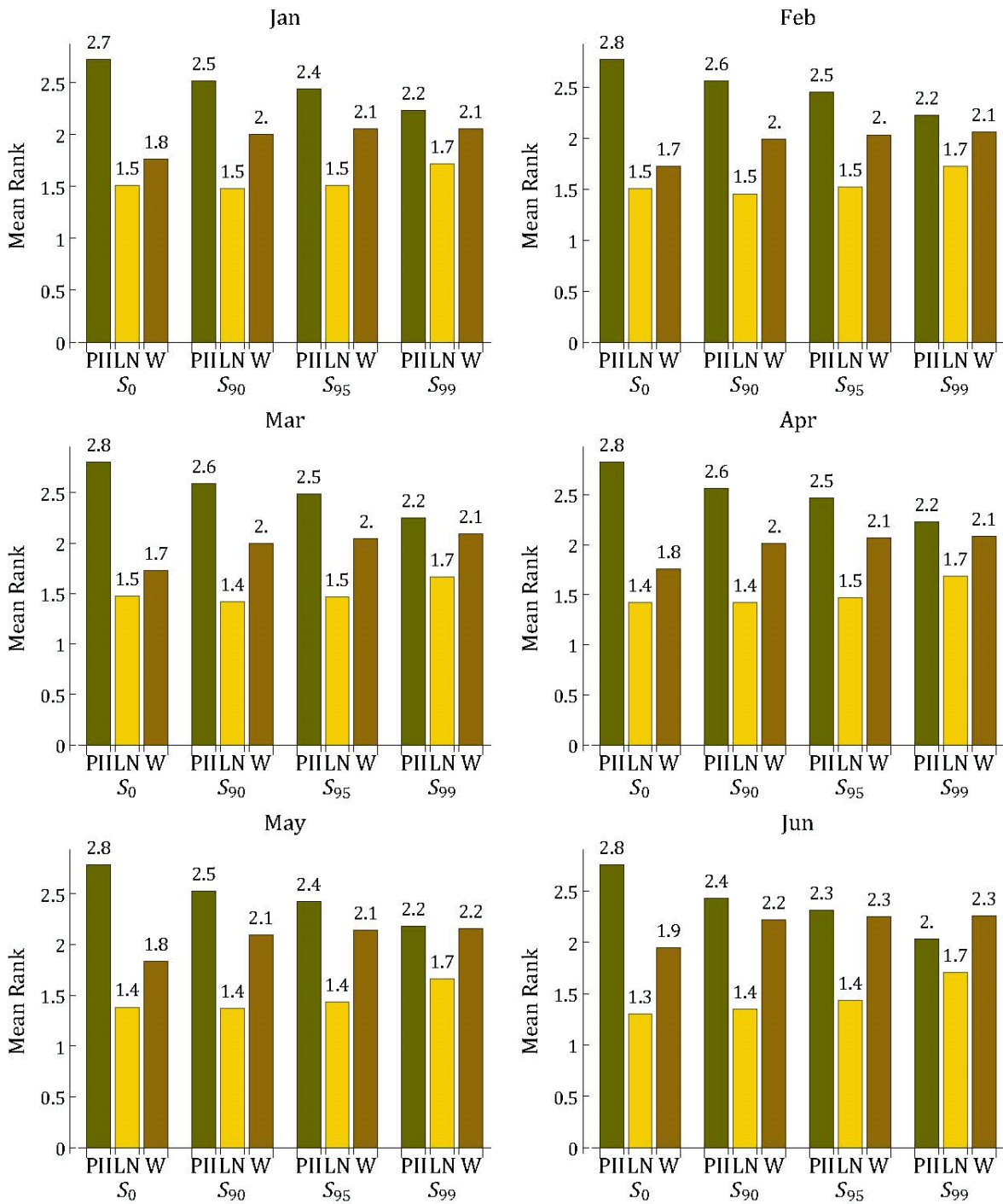
Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι εκτός του  $S_0$  όπου η Weibull είναι καλύτερη της Pareto II, σε όλα τα υπόλοιπα δείγματα η Pareto II είναι καλύτερη της Weibull όταν αναλύονται τα δεδομένα όλων των μηνών μαζί, δηλαδή όπου υπάρχουν πολλές τιμές. Επίσης διαφαίνεται μία εποχιακή διακύμανση στους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο όπου η Weibull είτε θα είναι οριακά καλύτερη της Pareto II είτε χειρότερη.

Επίσης πραγματοποιήθηκε κατάταξη της επίδοσης των τριών κατανομών μέσω βαθμονόμησης, ώστε να γίνει συνολική σύγκριση. Οι ουρές που εφαρμόστηκαν βαθμονομήθηκαν πάλι με βάση το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, δηλαδή η ουρά με το μικρότερο σφάλμα που είχε και την καλύτερη επίδοση είχε βαθμό 1 ενώ η ουρά με τη χειρότερη επίδοση είχε βαθμό 3. Η μέση κατάταξη φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

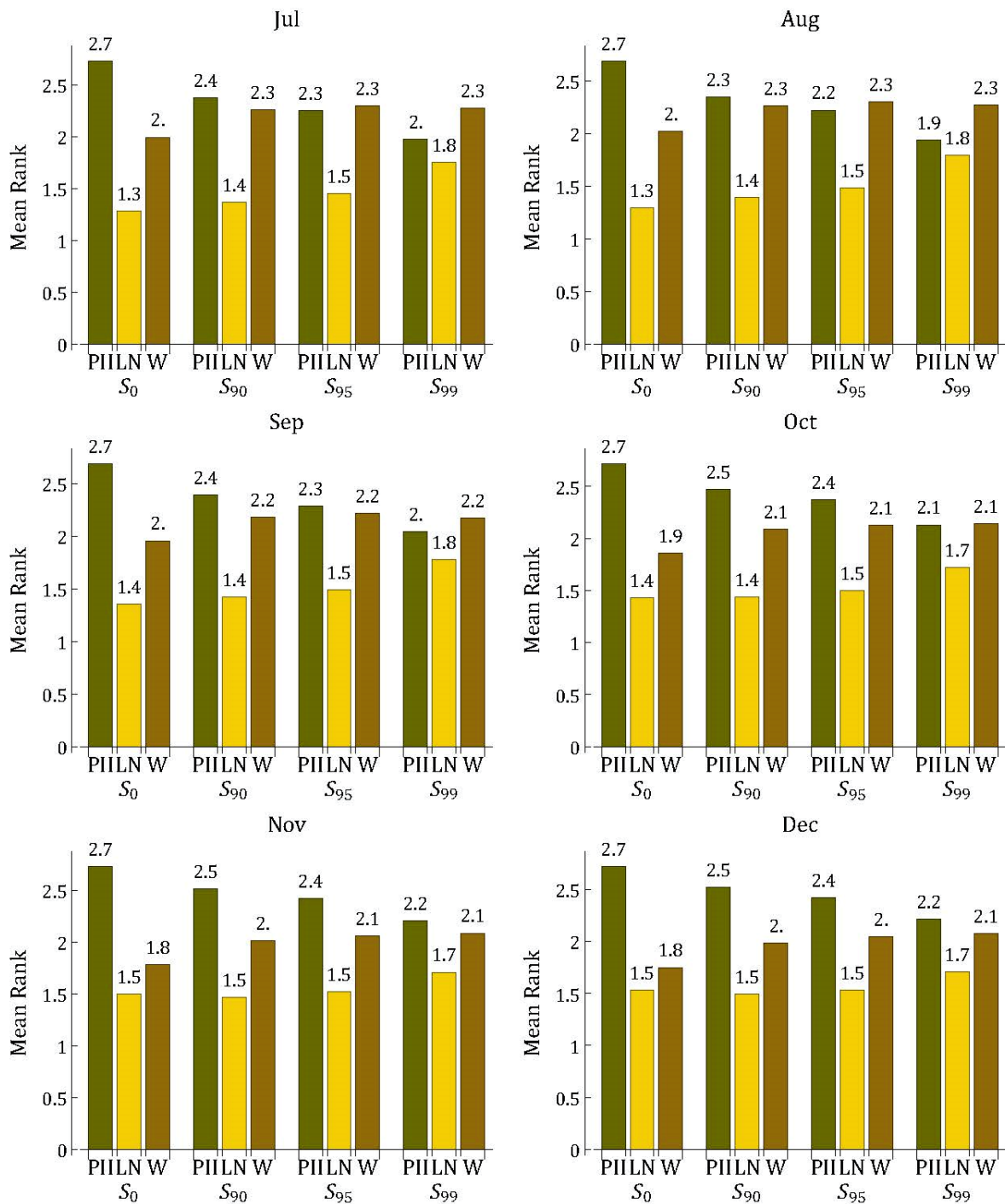
**Πίνακας 7.2.** Μέση βαθμονόμηση των κατανομών που εφαρμόστηκαν ανά μήνα και για τα τέσσερα δείγματα που δημιουργήθηκαν (σκούρο πράσινο | καλύτερη προσαρμογή, ανοιχτό πράσινο | δεύτερη καλύτερη τιμή, κίτρινο | χειρότερη τιμή).

	$S_0$			$S_{90}$			$S_{95}$			$S_{99}$		
	PII	LN	W	PII	LN	W	PII	LN	W	PII	LN	W
Jan	2.72	1.51	1.76	2.52	1.48	2.00	2.44	1.51	2.05	2.23	1.71	2.06
Feb	2.77	1.51	1.73	2.56	1.45	1.99	2.45	1.52	2.03	2.23	1.72	2.06
Mar	2.80	1.48	1.72	2.59	1.42	1.99	2.48	1.47	2.05	2.25	1.67	2.09
Apr	2.82	1.42	1.76	2.56	1.43	2.01	2.46	1.47	2.07	2.23	1.69	2.08
May	2.78	1.38	1.83	2.53	1.38	2.10	2.42	1.44	2.14	2.18	1.66	2.16
Jun	2.75	1.30	1.95	2.43	1.35	2.22	2.31	1.43	2.26	2.03	1.71	2.26
Jul	2.73	1.28	1.99	2.37	1.37	2.26	2.25	1.45	2.29	1.98	1.75	2.27
Aug	2.68	1.29	2.02	2.34	1.39	2.26	2.22	1.48	2.30	1.94	1.79	2.27
Sep	2.69	1.35	1.96	2.39	1.42	2.18	2.29	1.49	2.22	2.05	1.78	2.18
Oct	2.71	1.43	1.86	2.47	1.44	2.09	2.37	1.50	2.13	2.13	1.72	2.14
Nov	2.72	1.50	1.78	2.52	1.47	2.01	2.42	1.52	2.06	2.21	1.71	2.09
Dec	2.72	1.53	1.75	2.52	1.49	1.99	2.42	1.53	2.05	2.21	1.71	2.07
All	2.39	1.33	2.28	2.18	1.44	2.38	2.14	1.50	2.36	2.07	1.67	2.26

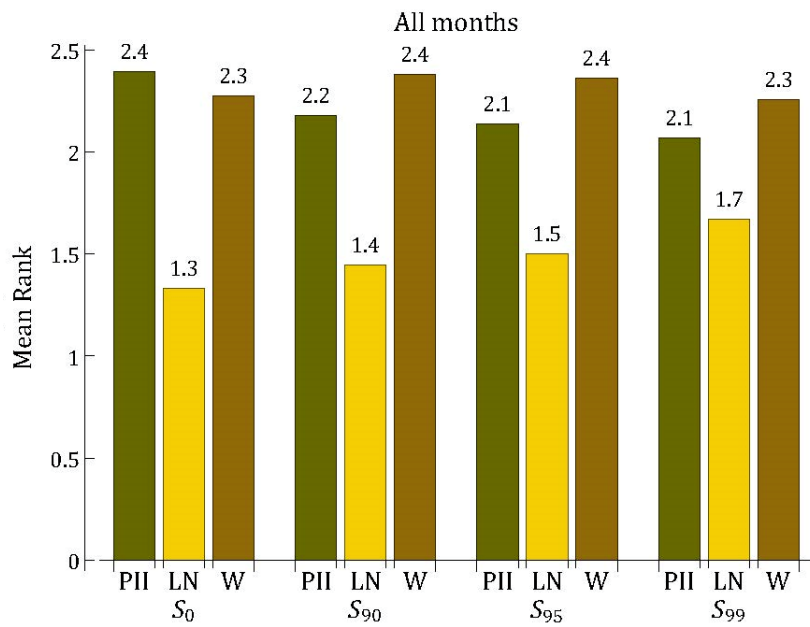
Το 1 αντιστοιχεί στην καλύτερη και το 3 στη χειρότερη. Στον Πίνακα 7.2 το σκούρο πράσινο αντιστοιχεί στην τιμή με την καλύτερη προσαρμογή, δηλαδή την κατανομή με βαθμονόμηση πιο κοντά στο 1, το ανοιχτό πράσινο στη δεύτερη καλύτερη τιμή και το κίτρινο στη χειρότερη προσαρμογή.



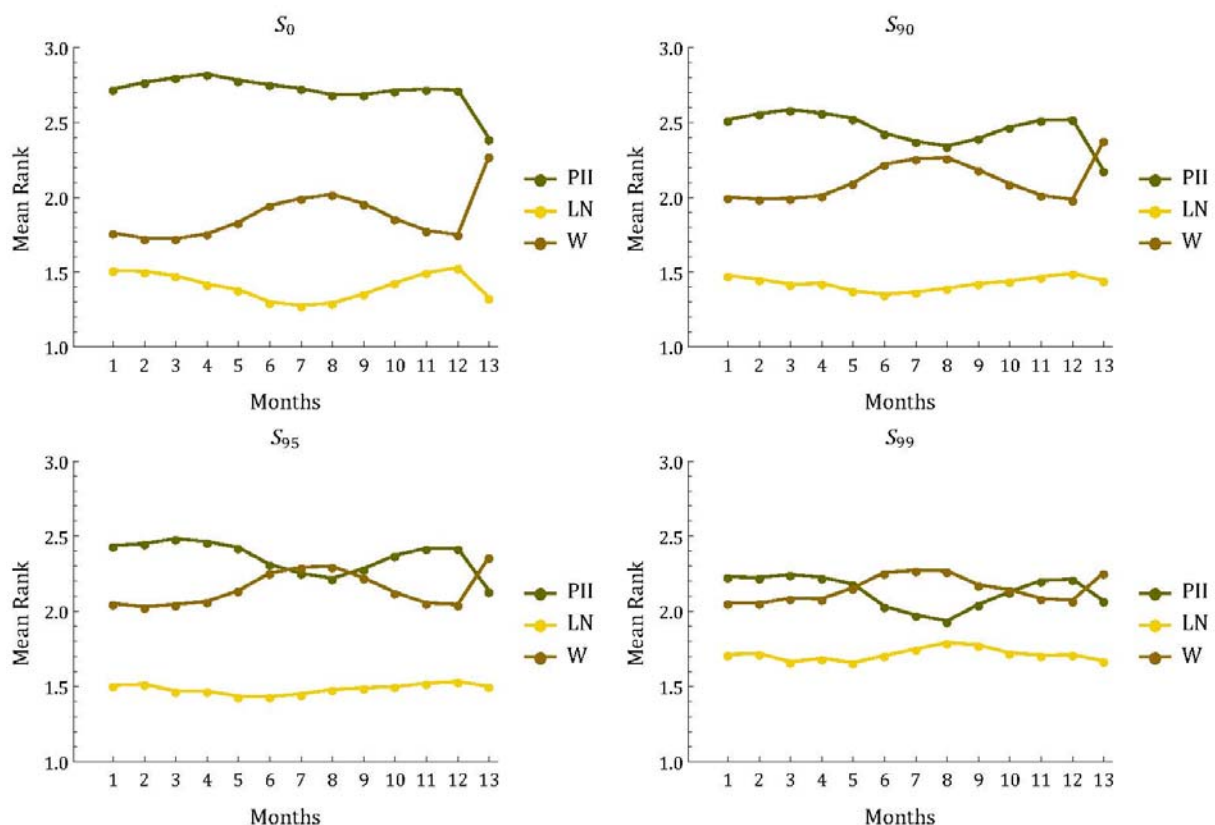
**Σχήμα 7.7.** Μέση βαθμονόμηση των κατανομών για τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



**Σχήμα 7.8.** Μέση βαθμονόμηση των κατανομών για τους μήνες Ιούλιο έως Δεκέμβριο για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



**Σχήμα 7.9.** Μέση βαθμονόμηση των κατανομών για το σύνολο των μηνών για τα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

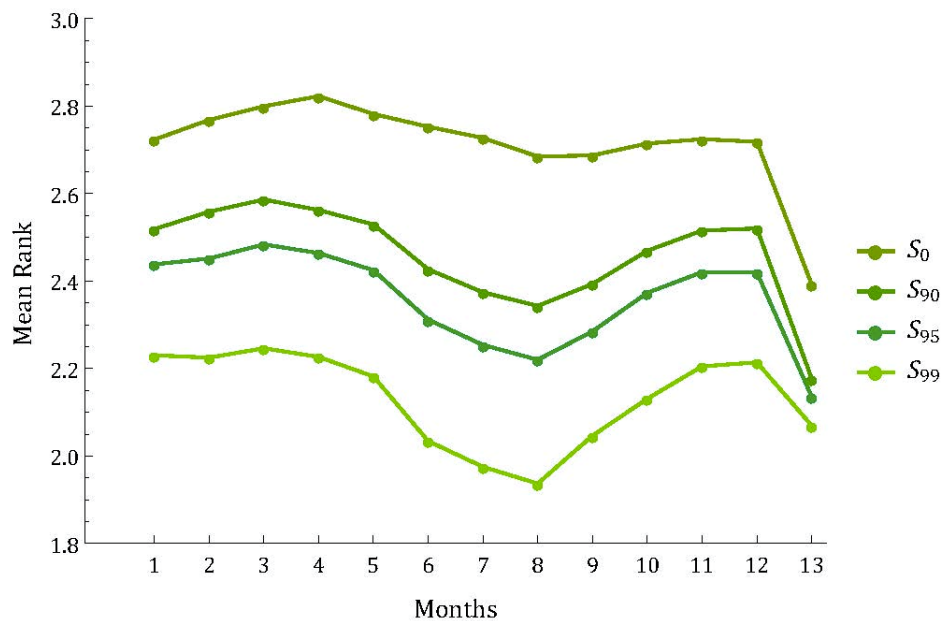


**Σχήμα 7.10.** Μέση βαθμονόμηση των τριών κατανομών για όλους τους μήνες και για το σύνολο των μηνών για τα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

Στο Σχήμα 7.10. γίνονται πιο διακριτές παρατηρήσεις που έγιναν πιο πάνω. Αρχικά, είναι ξεκάθαρη η υπεροχή της προσαρμογής της Λογαριθμοκανονικής σε όλους τους μήνες και σε όλα τα δείγματα. Δεύτερον, εκτός του  $S_0$  οι κατανομές Weibull και Pareto II βρίσκονται σε όλα τα δείγματα αρκετά κοντά με οριακή υπεροχή της Weibull εκτός των μηνών Ιούνιο με Οκτώβριο όπου οι δύο κατανομές είτε είναι πολύ κοντά είτε είναι καλύτερη η Pareto II. Αυτό θα μπορούσε να υποδεικνύει μία εποχιακή διακύμανση στους μήνες αυτούς αλλά παρόλα αυτά δεν προκύπτει με βεβαιότητα καθώς παρατηρείται μία σταθερότητα της Λογαριθμοκανονικής κοντά στην τιμή του 1.5 σε όλα τα δείγματα.

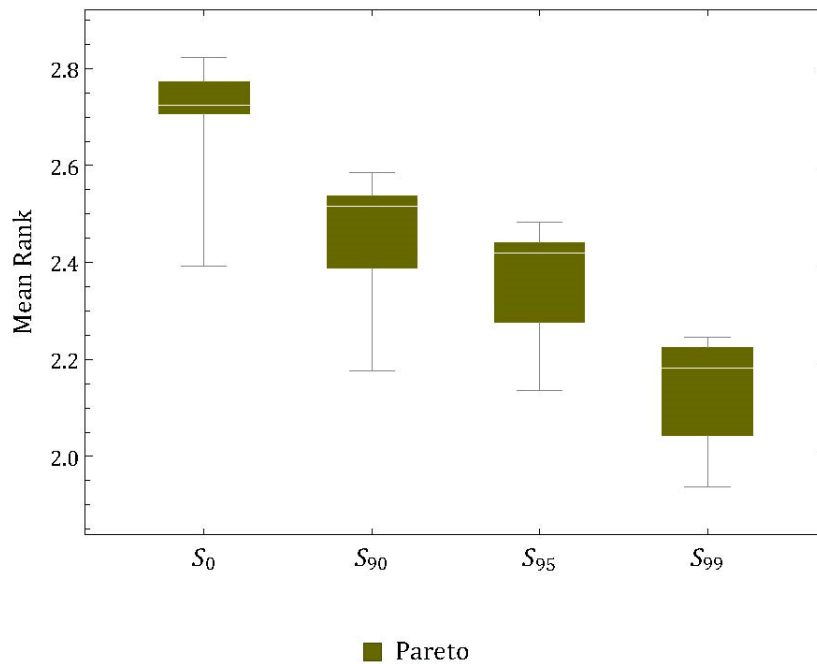
Μελετώντας το σύνολο των δεδομένων όλων των μηνών μαζί (All Months) υπάρχουν διαφορετικές τιμές της βαθμονόμησης από τους υπόλοιπους μήνες και λόγω του ότι υπάρχουν περισσότερες τιμές. Γενικά η Λογαριθμοκανονική υπερτερεί πολύ περισσότερο γιατί πέφτει και άλλο η μέση βαθμονόμησης της, ενώ η Weibull χειροτερεύει και η Pareto II καλύτερευει. Πιο συγκεκριμένα, στο  $S_0$  η Weibull υπερέχει της Pareto II οριακά, ενώ όσο οι τιμές αναφέρονται όλο και περισσότερο σε πιο ακραία η Pareto II είναι καλύτερη. Επίσης, στις κατανομές Weibull και Pareto II οι τιμές που αναφέρονται στο σύνολο των δεδομένων όλων των μηνών μαζί παρουσιάζουν μεγάλη μεταβολή από τις τιμές του κάθε μήνα

μεμονωμένα, κάτι που δε συμβαίνει στη Λογαριθμοκανονική κατανομή όπου παρουσιάζεται μία σταθερότητα σε αυτές τις τιμές οι οποίες είναι αρκετά κοντά με τους υπόλοιπους μήνες, και ιδιαίτερα όσο το δείγμα αναφέρεται περισσότερο σε ουρά. Αυτή είναι μία ακόμα ένδειξη του ότι η Λογαριθμοκανονική κατανομή προσαρμόζεται καλύτερα στις τιμές της ταχύτητας του ανέμου της ουράς.



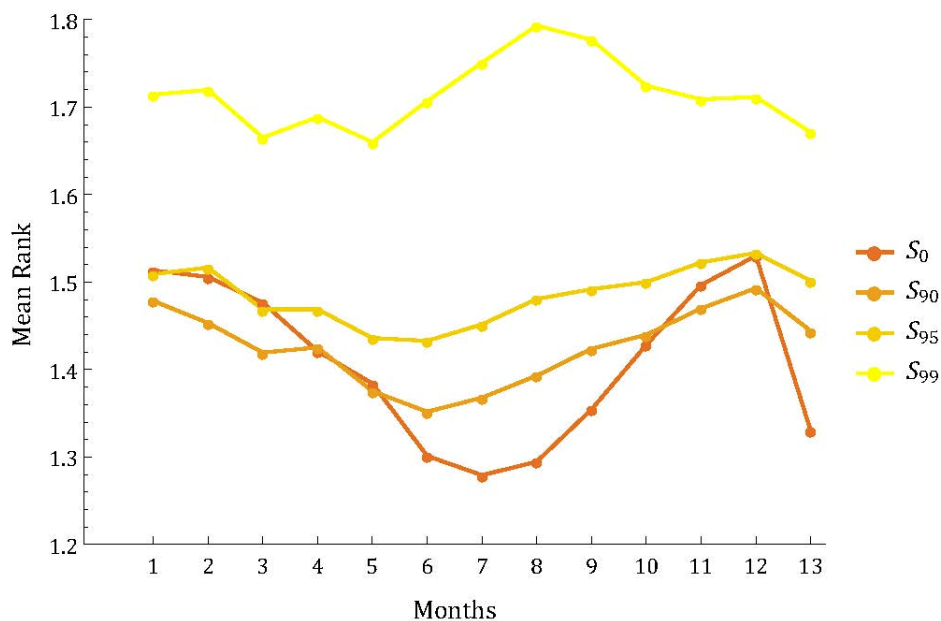
**Σχήμα 7.11.** Γραμμική απεικόνιση των τιμών της βαθμονόμησης της ουράς της κατανομής Pareto II για όλους τους μήνες και για τα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

Η προσαρμογή των δεδομένων στην ουρά της κατανομής Pareto II γίνεται καλύτερη όσο οι τιμές γίνονται πιο ακραίες, δηλαδή όσο το δείγμα γίνεται μικρότερο και αντιπροσωπεύει περισσότερο τις τιμές της ουράς. Αυτό οφείλεται στο ότι η ουρά της κατανομής είναι αρκετά χοντρή και μπορεί να περιλάβει ακραίες τιμές. Επίσης γίνεται αρκετά καλύτερη στους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο σε όλα τα δείγματα και στο σύνολο των δεδομένων.



**Σχήμα 7.12.** Απεικόνιση σε μορφή θηκογράμματος στα τέσσερα δείγματα της προσαρμογής της ουράς της κατανομής Pareto II.

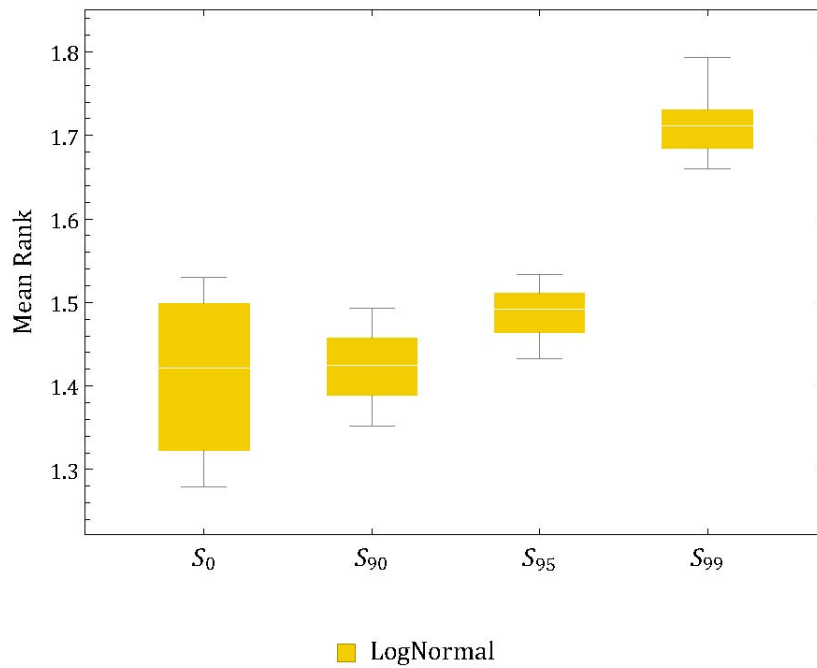
Και στο Σχήμα 7.12. φαίνεται η βελτίωση της απόδοσης της κατανομής όσο το δείγμα γίνεται μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα η διάμεσος της βαθμονόμησης της κατανομής Pareto II στο  $S_0$  είναι 2.72, στο δείγμα  $S_{90}$  είναι 2.52, στο δείγμα  $S_{95}$  είναι 2.42 και στο  $S_{99}$  είναι 2.18 (η διάμεσος είναι χρήσιμο μέγεθος σε κατανομές με ασυμμετρία).



**Σχήμα 7.13.** Γραμμική απεικόνιση των τιμών της βαθμονόμησης της ουράς της Λογαριθμοκανονικής κατανομής για όλους τους μήνες και για τα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

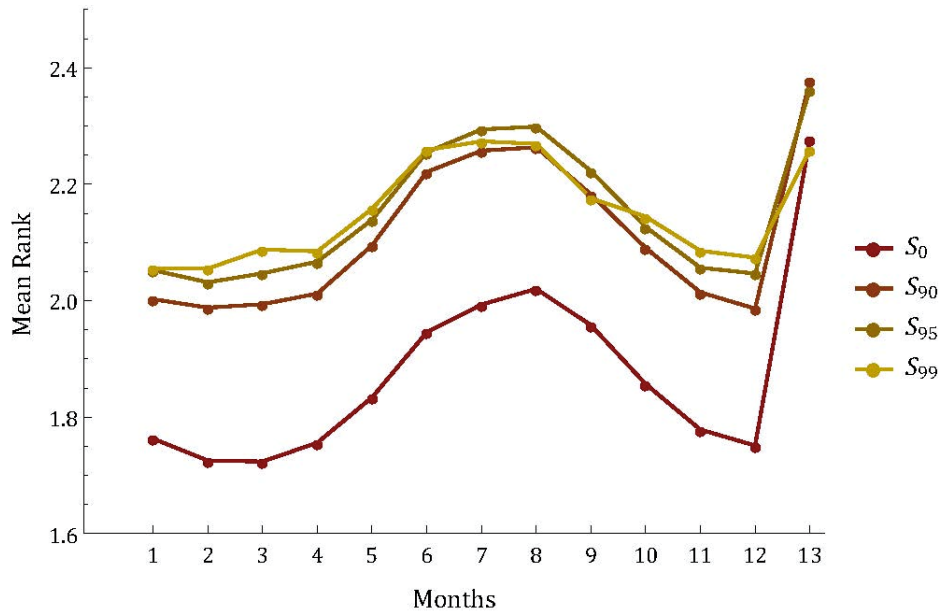
Στο Σχήμα 7.13. παρατηρείται ότι η προσαρμογή της κατανομής παρά τις διακυμάνσεις είναι καλύτερη στο δείγμα  $S_0$  και χειροτερεύει στα δείγματα  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ . Παρατηρείται και εδώ μία μικρή εποχιακή διακύμανση στους μήνες του καλοκαιριού. Τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο η Λογαριθμοκανονική κατανομή στο δείγμα  $S_0$  βελτιώνεται αρκετά ενώ στα δείγματα  $S_{90}$  και  $S_{95}$  πάλι παρατηρείται μία μικρή βελτίωση της απόδοσής της. Στο δείγμα  $S_{99}$  όμως τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο χειροτερεύει. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως στο σύνολο των όλων μηνών και στα τέσσερα δείγματα βελτιώνεται η απόδοσή της.





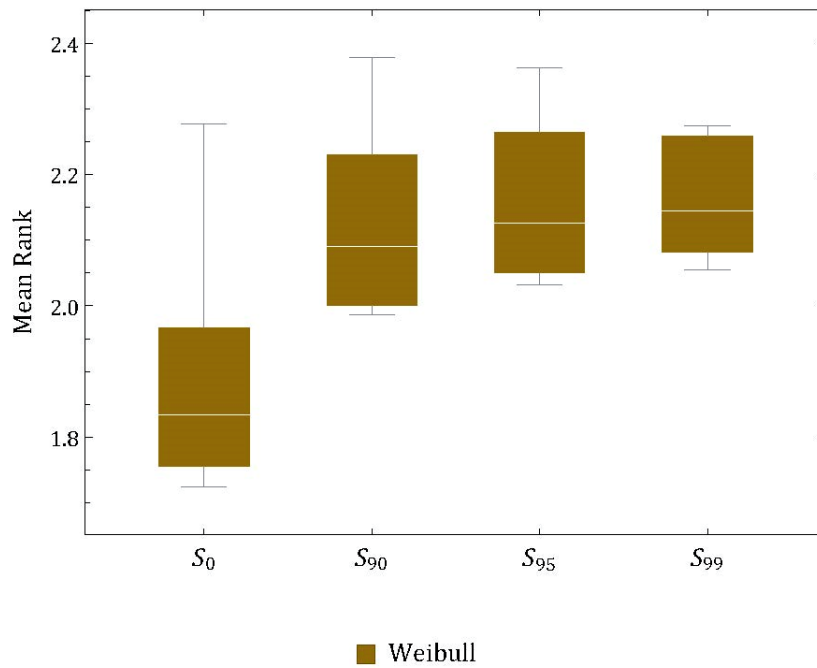
**Σχήμα 7.14.** Απεικόνιση σε μορφή θηκογράμματος στα τέσσερα δείγματα της προσαρμογής της ουράς της Λογαριθμοκανονικής κατανομής.

Και στο Σχήμα 7.14. φαίνεται η χειροτέρευση της Λογαριθμοκανονικής κατανομής στα μικρά δείγματα. Πιο συγκεκριμένα η διάμεσος της βαθμονόμησης της Λογαριθμοκανονικής κατανομής στο δείγμα  $S_0$  είναι 1.42, στο δείγμα  $S_{90}$  είναι 1.42, στο δείγμα  $S_{95}$  είναι 1.49 και στο  $S_{99}$  είναι 1.71 (η διάμεσος είναι χρήσιμο μέγεθος σε κατανομές με ασυμμετρία).



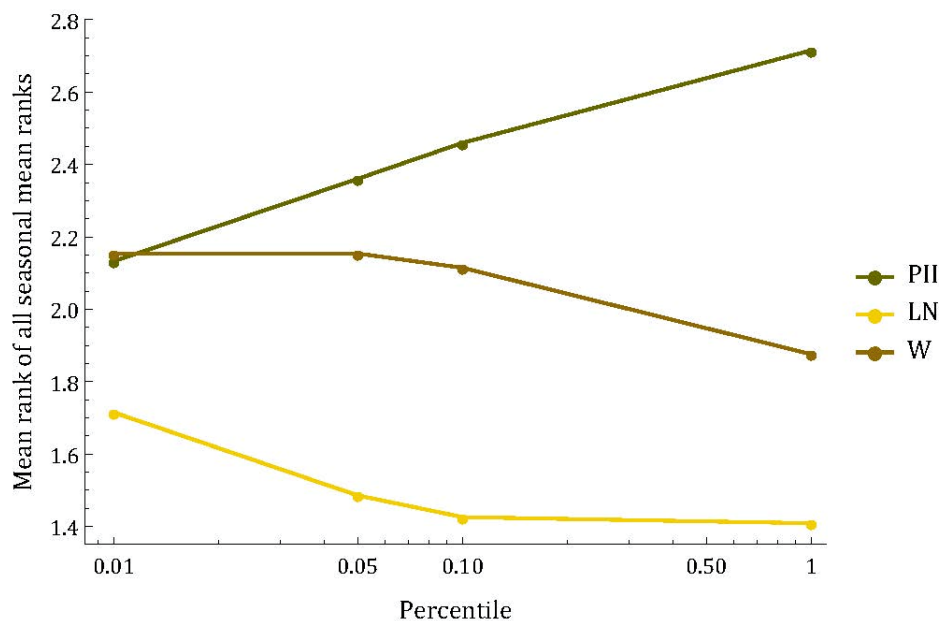
**Σχήμα 7.15.** Γραμμική απεικόνιση των τιμών της βαθμονόμησης της ουράς της κατανομής Weibull για όλους τους μήνες και για τα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

Η προσαρμογή των δεδομένων στην ουρά της κατανομής Weibull γίνεται χειρότερη όσο οι τιμές γίνονται πιο ακραίες, δηλαδή όσο το δείγμα γίνεται μικρότερο και πιο ουρά, αν και διακρίνεται κάποια ταύτιση στα δείγματα  $S_{95}$  και  $S_{99}$ . Αυτό οφείλεται στο ότι η ουρά της κατανομής δεν είναι αρκετά χοντρή για να μπορεί να περιλάβει ακραίες τιμές. Επίσης γίνεται αρκετά χειρότερη στους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο σε όλα τα δείγματα και στο σύνολο των δεδομένων και ακόμα χειρότερη στο σύνολο των δεδομένων, φανερώνοντας μία αδυναμία της στις πολλές τιμές.



**Σχήμα 7.16.** Απεικόνιση σε μορφή θηκογράμματος στα τέσσερα δείγματα της προσαρμογής της ουράς της κατανομής Weibull.

Και στο Σχήμα 7.16. φαίνεται η χειροτέρευση της κατανομής Weibull στα δείγματα  $S_{90}$ ,  $S_{95}$  και  $S_{99}$  και μία σταθερότητα στα τρία τελευταία δείγματα. Πιο συγκεκριμένα η διάμεσος της βαθμονόμησης της κατανομής Pareto II στο δείγμα  $S_0$  είναι 2.09, στο δείγμα  $S_{90}$  είναι 2.12, στο δείγμα  $S_{95}$  είναι 2.42 και στο  $S_{99}$  είναι 2.14.



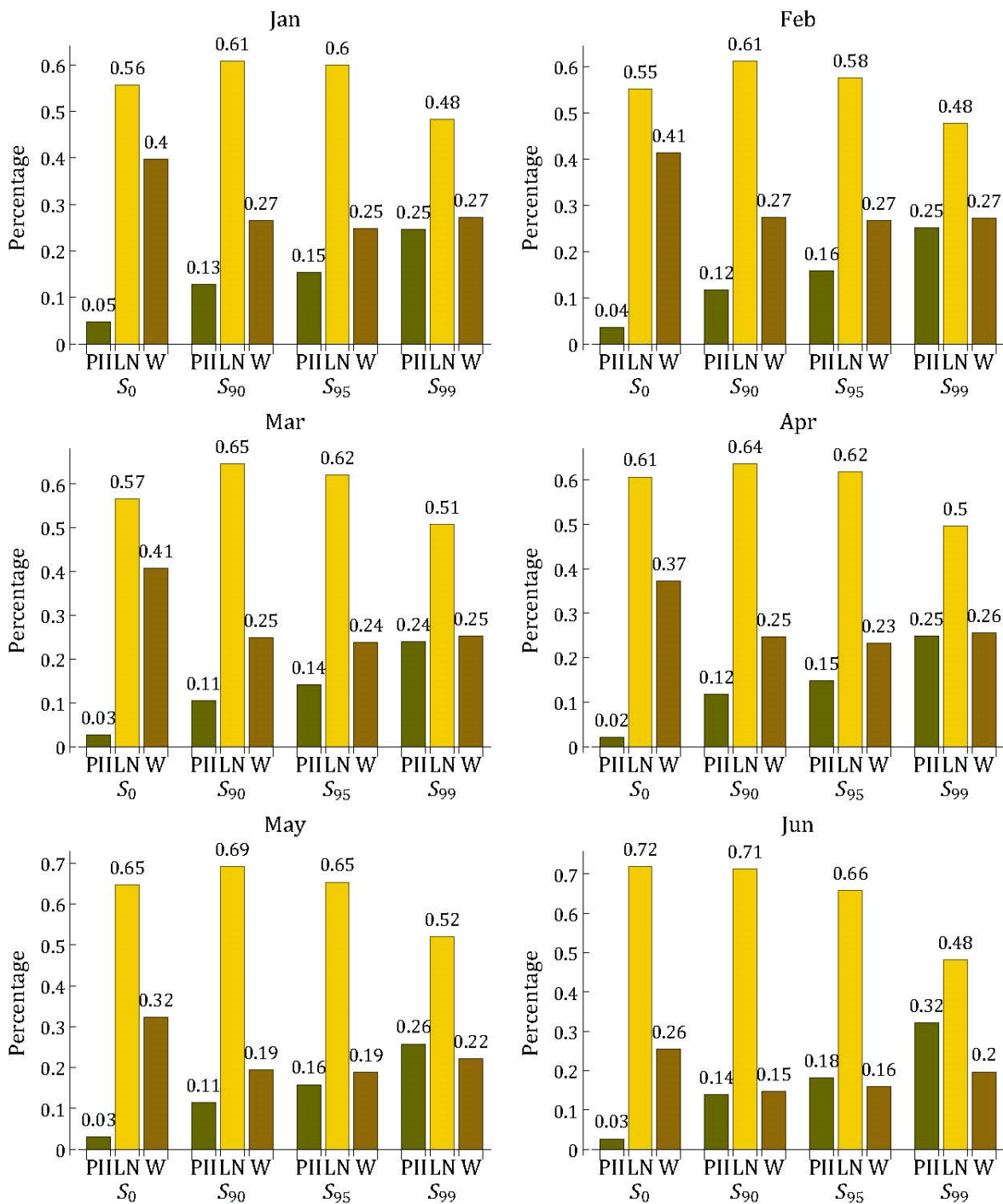
**Σχήμα 7.17.** Γραμμική απεικόνιση μέσω των τιμών των δεκατριών μέσων τιμών της βαθμονόμησης για τα τέσσερα δείγματα. Στο σχήμα κάθε τιμή αντιστοιχεί στη μέση τιμή των δεκατριών μέσων τιμών της βαθμονόμησης κάθε ποσοστημορίου.

Και στο Σχήμα 7.17. φαίνεται η βελτίωση της Pareto II και η χειροτέρευση των άλλων δύο στα δείγματα  $S_{90}$ ,  $S_{95}$  και  $S_{99}$ . Η βελτίωση της κατανομής Pareto II όσο τα δεδομένα αναφέρονται περισσότερο στην ουρά. Η βελτίωση αυτή μπορεί να είναι μη ουσιαστική γιατί ήταν αναμενόμενη η βελτίωσή της καθώς το σχήμα της είναι J-Shape και ήταν προφανές πως θα βελτιωνόταν η απόδοσή της στην ουρά, αφού στην ουρά μοιάζει με τις άλλες κατανομές. Αυτό όμως δεν αναιρεί και το γεγονός πως ενώ οι άλλες κατανομές μετά το δείγμα  $S_{90}$  χειροτερεύουν αυτή συνεχίζει και βελτιώνεται.

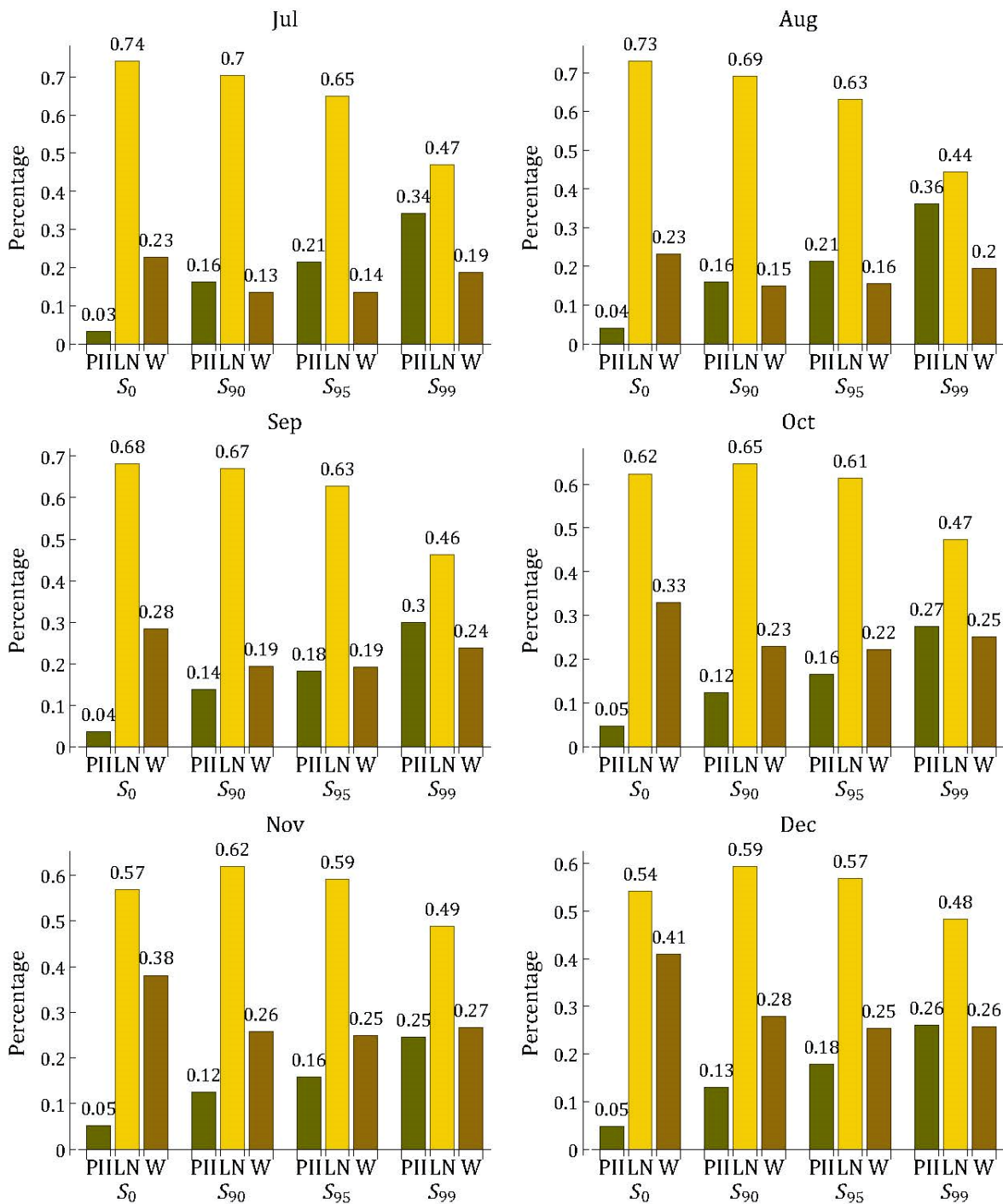
**Πίνακας 7.3.** Τα ποσοστά προσαρμογής των κατανομών. Με πράσινο χρώμα τονίζεται η καλύτερη τιμή προσαρμογής.

	S <sub>0</sub>			S <sub>90</sub>			S <sub>95</sub>			S <sub>99</sub>		
	PII	LN	W	PII	LN	W	PII	LN	W	PII	LN	W
Jan	4.7	55.7	39.6	12.7	60.7	26.5	15.3	60.0	24.7	24.5	48.3	27.1
Feb	3.6	55.1	41.3	11.6	61.1	27.3	15.8	57.5	26.6	25.1	47.6	27.2
Mar	2.7	56.6	40.8	10.5	64.6	24.9	14.1	62.1	23.8	24.0	50.7	25.3
Apr	2.1	60.6	37.3	11.7	63.5	24.8	14.8	61.9	23.3	24.8	49.6	25.6
May	3.1	64.6	32.3	11.4	69.1	19.5	15.8	65.4	18.8	25.8	52.0	22.2
Jun	2.7	71.8	25.5	13.9	71.3	14.8	18.3	65.7	16.0	32.2	48.1	19.7
Jul	3.3	74.1	22.6	16.2	70.4	13.4	21.4	65.0	13.6	34.2	47.0	18.7
Aug	3.9	73.0	23.1	16.0	69.0	15.0	21.3	63.1	15.6	36.1	44.3	19.5
Sep	3.5	68.1	28.4	13.7	66.9	19.4	18.2	62.7	19.1	29.9	46.2	23.8
Oct	4.7	62.4	32.9	12.4	64.6	23.0	16.5	61.3	22.2	27.5	47.4	25.1
Nov	5.2	56.8	38.1	12.5	61.8	25.7	15.8	59.2	25.0	24.6	48.8	26.6
Dec	4.9	54.2	40.9	12.9	59.2	27.8	17.8	56.9	25.3	26.0	48.3	25.7
All	13.3	72.7	14.1	20.3	66.8	12.9	21.4	63.3	15.3	24.0	51.5	24.5

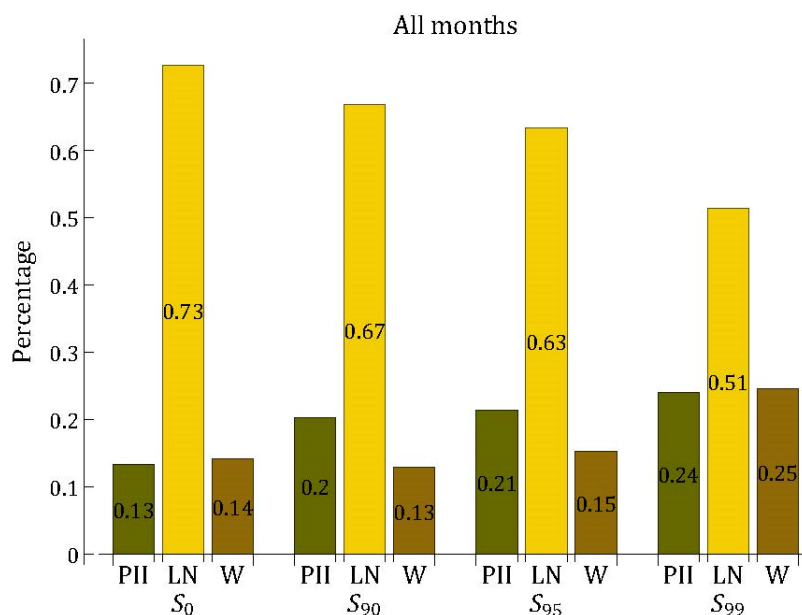
Τέλος, στη συνολική σύγκριση των τριών κατανομών για την καλύτερη εφαρμογή πάλι μέσω του μέσου τετραγωνικού σφάλματος φαίνεται η υπεροχή της Λογαριθμοκανονικής κατανομής σε σχέση με τις άλλες δύο στο σύνολο των μηνών, σε όλα τα δείγματα S<sub>0</sub>, S<sub>90</sub>, S<sub>95</sub> και S<sub>99</sub>. Επίσης φαίνεται ότι όσο πηγαίνουν τα δεδομένα σε περισσότερο ουρά η Pareto II και Weibull παρουσιάζουν περίπου τα ίδια ποσοστά εφαρμογής με την Pareto II να είναι και καλύτερη στους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο στα δείγματα S<sub>95</sub> και S<sub>99</sub>.



**Σχήμα 7.18.** Ποσοστά καλύτερης εφαρμογής για τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



**Σχήμα 7.19.** Ποσοστά καλύτερης εφαρμογής για τους μήνες Ιούλιο έως Δεκέμβριο για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



**Σχήμα 7.20.** Ποσοστά καλύτερης εφαρμογής για σύνολο των μηνών για τα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

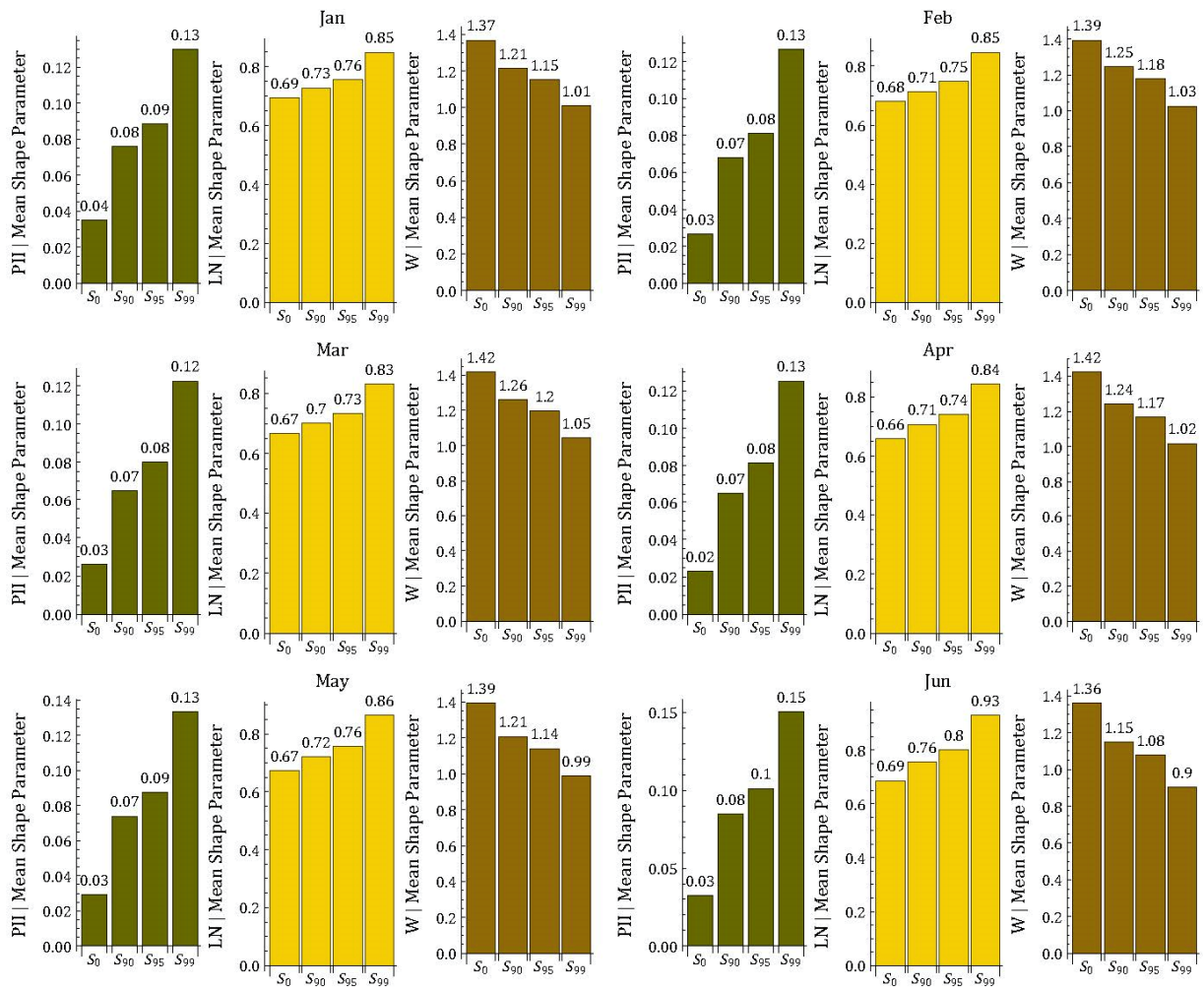
### 7.7.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

**Πίνακας 7.4.** Τιμές της παραμέτρου σχήματος για τις τρεις κατανομές που προσαρμόστηκαν και για τα τέσσερα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

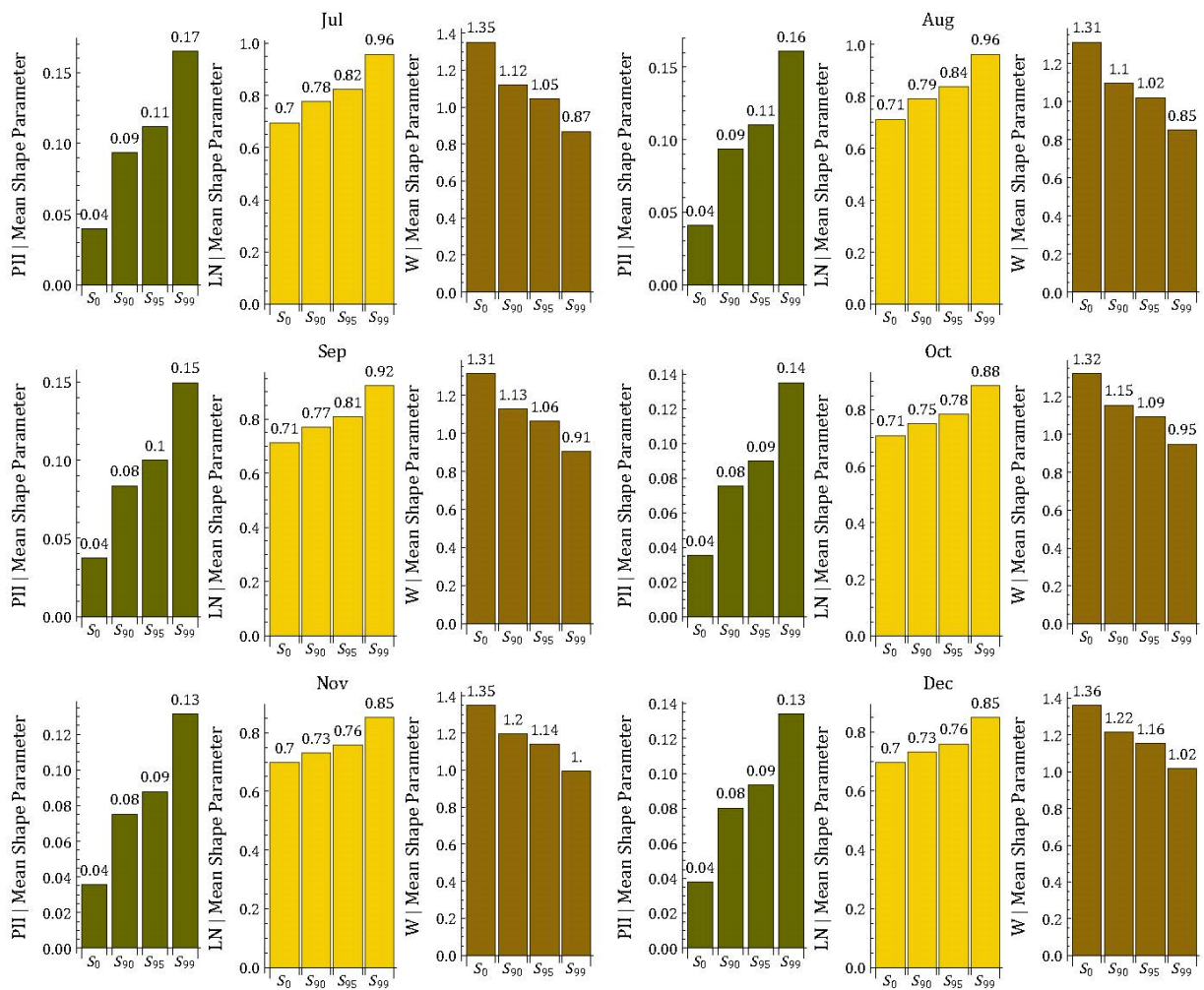
	Pareto II				LogNormal				Weibull			
	$S_0$	$S_{90}$	$S_{95}$	$S_{99}$	$S_0$	$S_{90}$	$S_{95}$	$S_{99}$	$S_0$	$S_{90}$	$S_{95}$	$S_{99}$
Jan	0.035	0.076	0.088	0.130	0.694	0.729	0.757	0.850	1.368	1.214	1.153	1.009
Feb	0.027	0.068	0.081	0.127	0.680	0.712	0.749	0.847	1.393	1.246	1.177	1.026
Mar	0.026	0.065	0.080	0.123	0.666	0.701	0.734	0.830	1.416	1.261	1.198	1.046
Apr	0.023	0.065	0.082	0.125	0.660	0.707	0.742	0.843	1.422	1.242	1.168	1.017
May	0.029	0.074	0.088	0.133	0.672	0.721	0.756	0.864	1.394	1.208	1.141	0.989
Jun	0.032	0.085	0.101	0.150	0.686	0.756	0.799	0.929	1.360	1.150	1.079	0.903
Jul	0.040	0.094	0.112	0.165	0.696	0.777	0.825	0.958	1.351	1.121	1.046	0.868
Aug	0.041	0.093	0.110	0.161	0.712	0.791	0.838	0.963	1.313	1.095	1.022	0.852
Sep	0.038	0.084	0.100	0.150	0.712	0.769	0.807	0.923	1.313	1.128	1.063	0.905
Oct	0.035	0.075	0.090	0.135	0.709	0.751	0.784	0.884	1.320	1.154	1.092	0.949
Nov	0.036	0.075	0.088	0.131	0.698	0.730	0.758	0.852	1.349	1.196	1.141	0.996
Dec	0.038	0.080	0.093	0.134	0.696	0.732	0.759	0.850	1.361	1.215	1.155	1.016
All	0.079	0.101	0.107	0.125	0.806	0.877	0.901	0.960	1.110	0.908	0.860	0.767

Για την παράμετρο σχήματος ισχύει ότι όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου σχήματος στην κατανομή Weibull μειώνεται η ουρά. Αντίθετα, στις κατανομές Pareto II και Λογαριθμοκανονική όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου σχήματος η ουρά χοντραίνει. Ο Σχήμα 7.6. απεικονίζεται αναλυτικά στα σχήματα Σχήμα 7.21. έως Σχήμα 7.30.

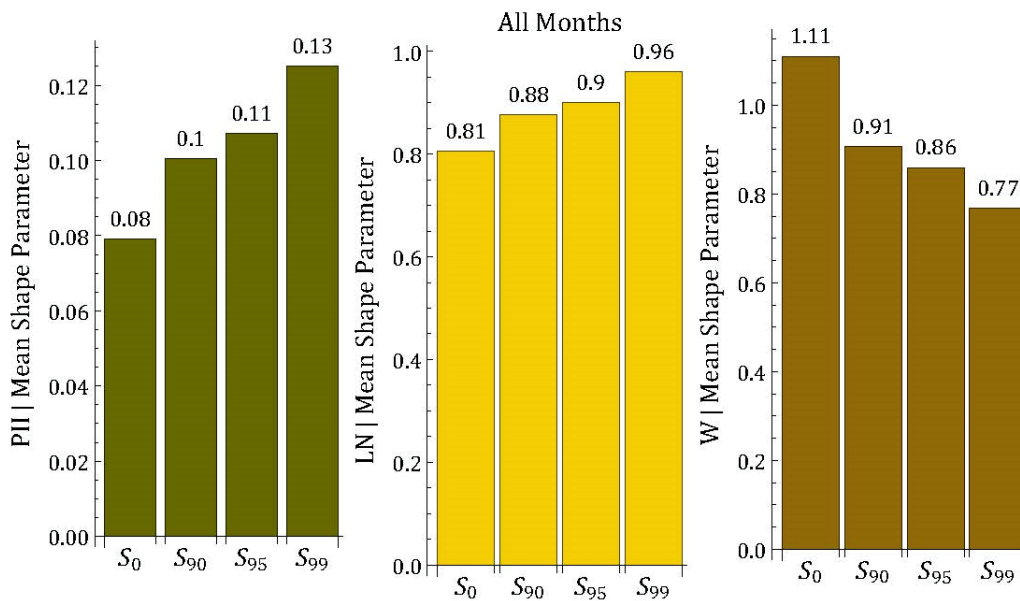




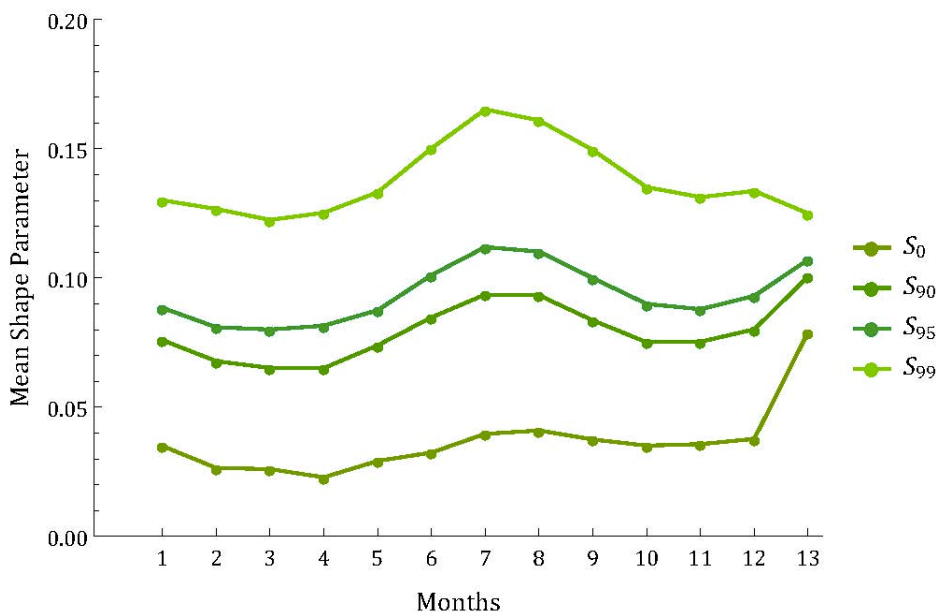
**Σχήμα 7.21.** Τιμές της παραμέτρου σχήματος για τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



**Σχήμα 7.22.** Τιμές της παραμέτρου σχήματος για τους μήνες Ιούλιο έως Δεκέμβριο για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



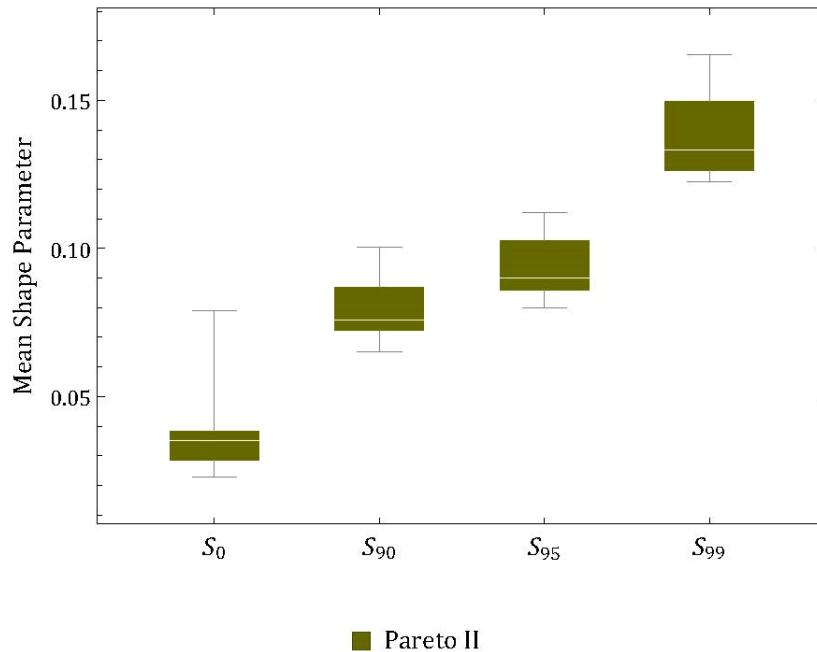
**Σχήμα 7.23.** Τιμές της παραμέτρου σχήματος συνολικά για το σύνολο των μετρήσεων για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



**Σχήμα 7.24.** Γραμμική απεικόνιση των τιμών της βαθμονόμησης της παραμέτρου σχήματος της κατανομής Pareto II για όλους τους μήνες για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .

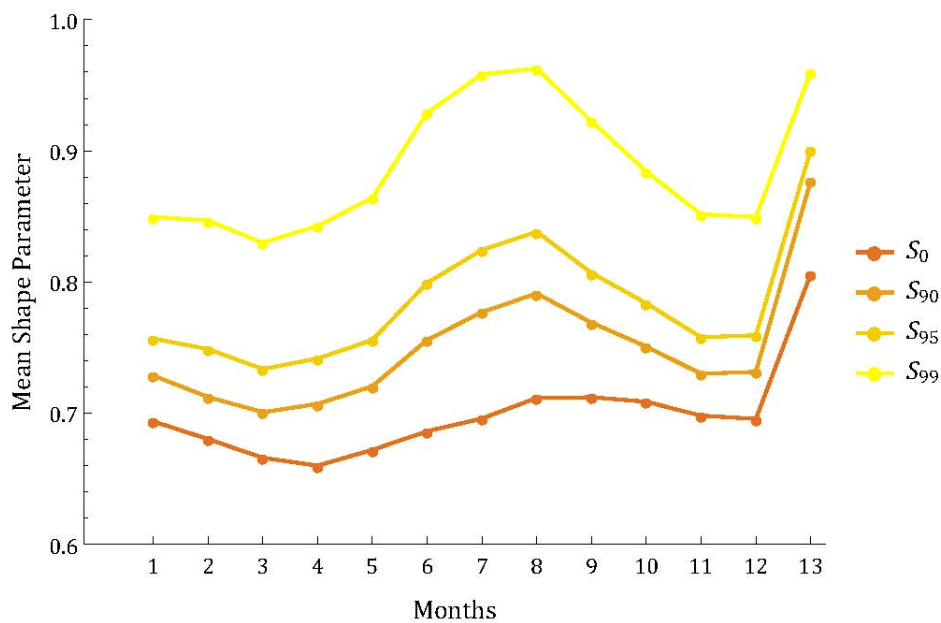
Στο Σχήμα 7.24. φαίνεται ότι όσο το ποσοστημόριο μικραίνει η παράμετρος σχήματος μεγαλώνει δηλαδή η ουρά της κατανομής Pareto II αυξάνεται. Στο σύνολο των δεδομένων στα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}$  η παράμετρος σχήματος παρουσιάζει αύξηση. Στο δείγμα  $S_{99}$  όμως μικραίνει η παράμετρος σχήματος στο σύνολο των δεδομένων. Παρατηρείται ακόμα η

διακύμανση στους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο όπως επισημάνθηκε και στη μέση βαθμονόμηση.



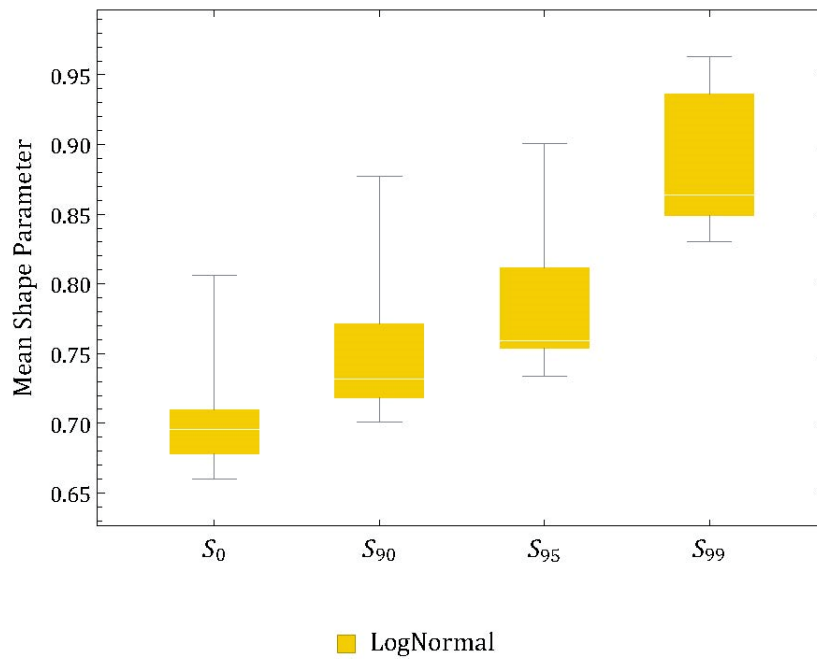
**Σχήμα 7.25.** Απεικόνιση σε μορφή θηκογράμματος στα τέσσερα δείγματα της παραμέτρου σχήματος της ουράς της κατανομής Pareto II.

Είναι πιο φανερό στο Σχήμα 7.25, η αύξηση της παραμέτρου σχήματος στα  $S_{90}$ ,  $S_{95}$  και  $S_{99}$ , που υποδηλώνει μείωση τη ουράς της κατανομής. Πιο συγκεκριμένα η διάμεσος της παραμέτρου σχήματος της κατανομής Pareto II στο δείγμα  $S_0$  είναι 0.035, στο δείγμα  $S_{90}$  είναι 0.076, στο  $S_{95}$  είναι 0.09 και στο δείγμα  $S_{99}$  είναι 0.13 (η διάμεσος είναι χρήσιμο μέγεθος σε κατανομές με ασυμμετρία).



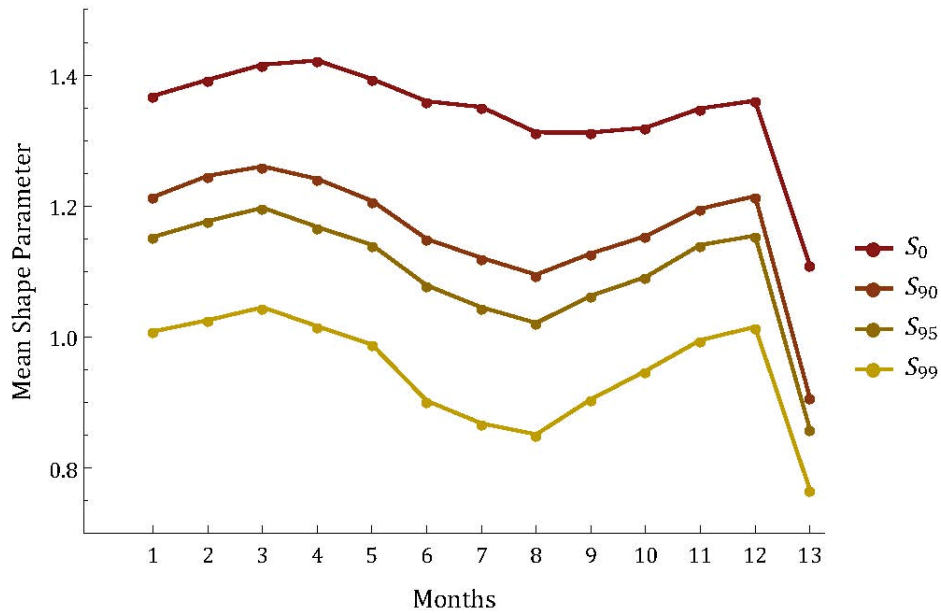
**Σχήμα 7.26.** Γραμμική απεικόνιση των τιμών της βαθμονόμησης της παραμέτρου σχήματος της Λογαριθμοκανονικής κατανομής για όλους τους μήνες για τα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

Στο Σχήμα 7.26. φαίνεται ότι όσο το ποσοστημόριο μικραίνει η παράμετρος σχήματος μεγαλώνει δηλαδή η ουρά της Λογαριθμοκανονικής κατανομής μεγαλώνει. Στο σύνολο των δεδομένων στα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$  και  $S_{99}$  η παράμετρος σχήματος παρουσιάζει μεγάλη αύξηση. Παρατηρείται και εδώ η διακύμανση στους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο όπως επισημάνθηκε και στη μέση βαθμονόμηση.



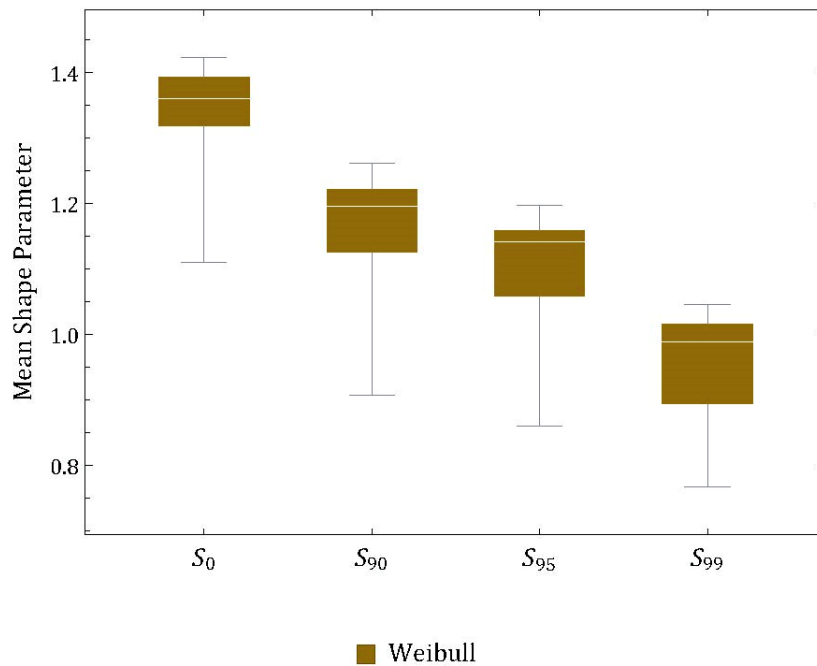
**Σχήμα 7.27.** Απεικόνιση σε μορφή θηκογράμματος στα τέσσερα δείγματα της παραμέτρου σχήματος της ουράς της Λογαριθμοκανονικής κατανομής.

Είναι πιο φανερό στο Σχήμα 7.27, η αύξηση της παραμέτρου σχήματος στα δείγματα  $S_{90}$ ,  $S_{95}$  και  $S_{99}$ , που υποδηλώνει αύξηση τη ουράς της κατανομής. Πιο συγκεκριμένα η διάμεσος της παραμέτρου σχήματος της Λογαριθμοκανονικής κατανομής στο δείγμα  $S_0$  είναι 0.7, στο  $S_{90}$  είναι 0.73, στο  $S_{95}$  είναι 0.76 και στο  $S_{99}$  είναι 0.86 (η διάμεσος είναι χρήσιμο μέγεθος σε κατανομές με ασυμμετρία).



**Σχήμα 7.28.** Γραμμική απεικόνιση των τιμών της βαθμονόμησης της παραμέτρου σχήματος της κατανομής Weibull για όλους τους μήνες για τα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

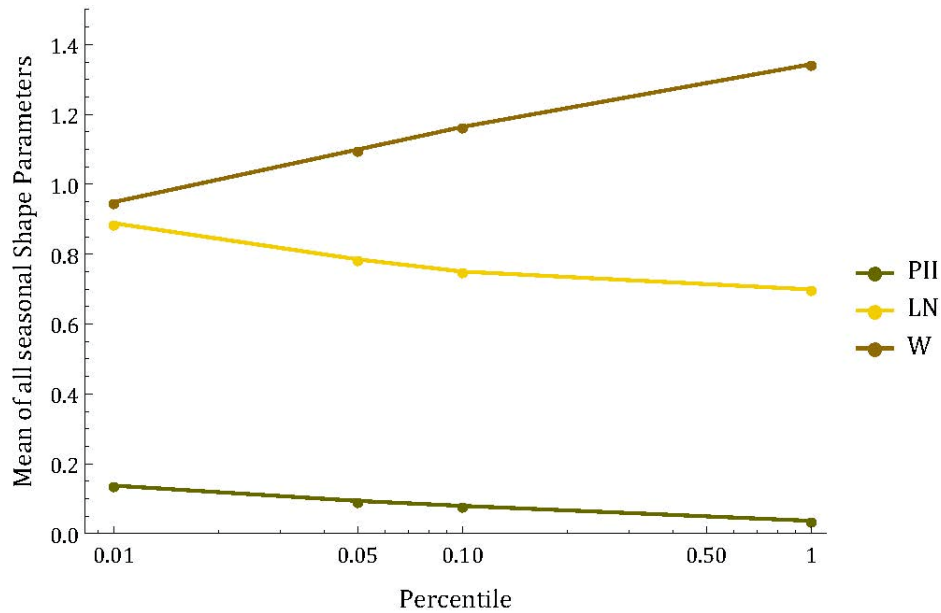
Στο Σχήμα 7.28. φαίνεται ότι όσο το ποσοστημόριο μικραίνει η παράμετρος σχήματος μικραίνει δηλαδή η ουρά της κατανομής Weibull μεγαλώνει. Στο σύνολο των δεδομένων στα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$  παράμετρος σχήματος παρουσιάζει μεγάλη αύξηση. Παρατηρείται και εδώ η διακύμανση στους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο όπως επισημάνθηκε και στη μέση βαθμονόμηση.



**Σχήμα 7.29.** Απεικόνιση σε μορφή θηκογράμματος στα τέσσερα δείγματα της παραμέτρου σχήματος της ουράς της κατανομής Weibull.

Είναι πιο φανερό στο Σχήμα 7.29, η φαίνεται πιο καθαρά μείωση της παραμέτρου σχήματος στα δείγματα  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ , που υποδηλώνει αύξηση τη ουράς της κατανομής. Πιο συγκεκριμένα η διάμεσος της παραμέτρου σχήματος της κατανομής Weibull στο δείγμα  $S_0$  είναι 1.36, στο  $S_{90}$  είναι 1.2, στο  $S_{95}$  είναι 1.14 και στο  $S_{99}$  είναι 0.99 (η διάμεσος είναι χρήσιμο μέγεθος σε κατανομές με ασυμμετρία).





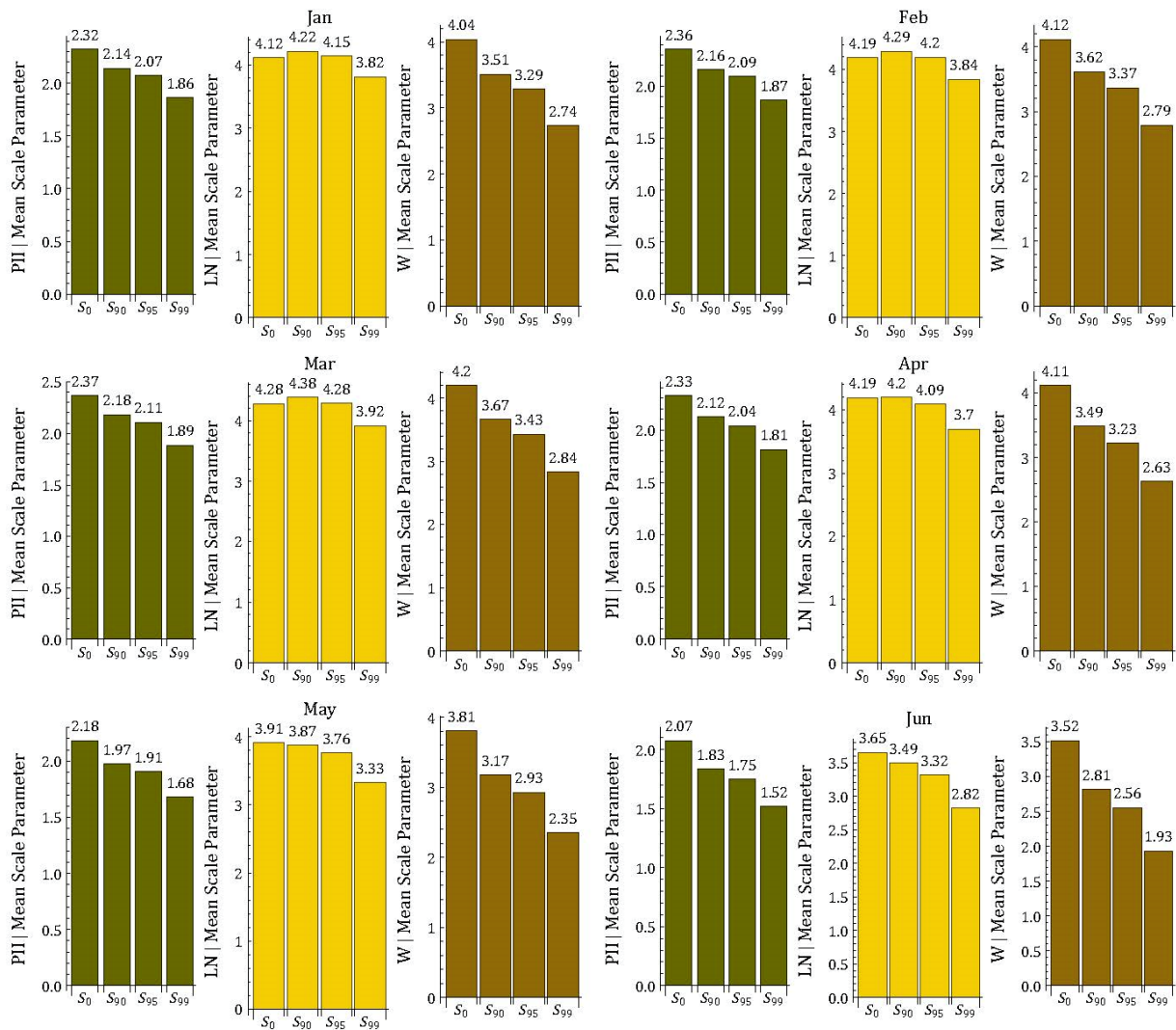
**Σχήμα 7.30.** Γραμμική απεικόνιση μέσω τιμών των δεκατριών μέσω τιμών της παραμέτρου σχήματος για τα τέσσερα δείγματα. Στο σχήμα κάθε τιμή αντιστοιχεί στη μέση τιμή των δεκατριών μέσω τιμών της βαθμονόμησης κάθε δείγμα.

Στο Σχήμα 7.30. είναι ευδιάκριτες οι αυξήσεις των τιμών της παραμέτρου σχήματος των κατανομών Λογαριθμοκανονικής και Pareto II που υποδηλώνει μείωση της ουράς της κατανομής και η μείωση της παραμέτρου σχήματος της κατανομής Weibull που υποδηλώνει αύξηση της ουράς της κατανομής.

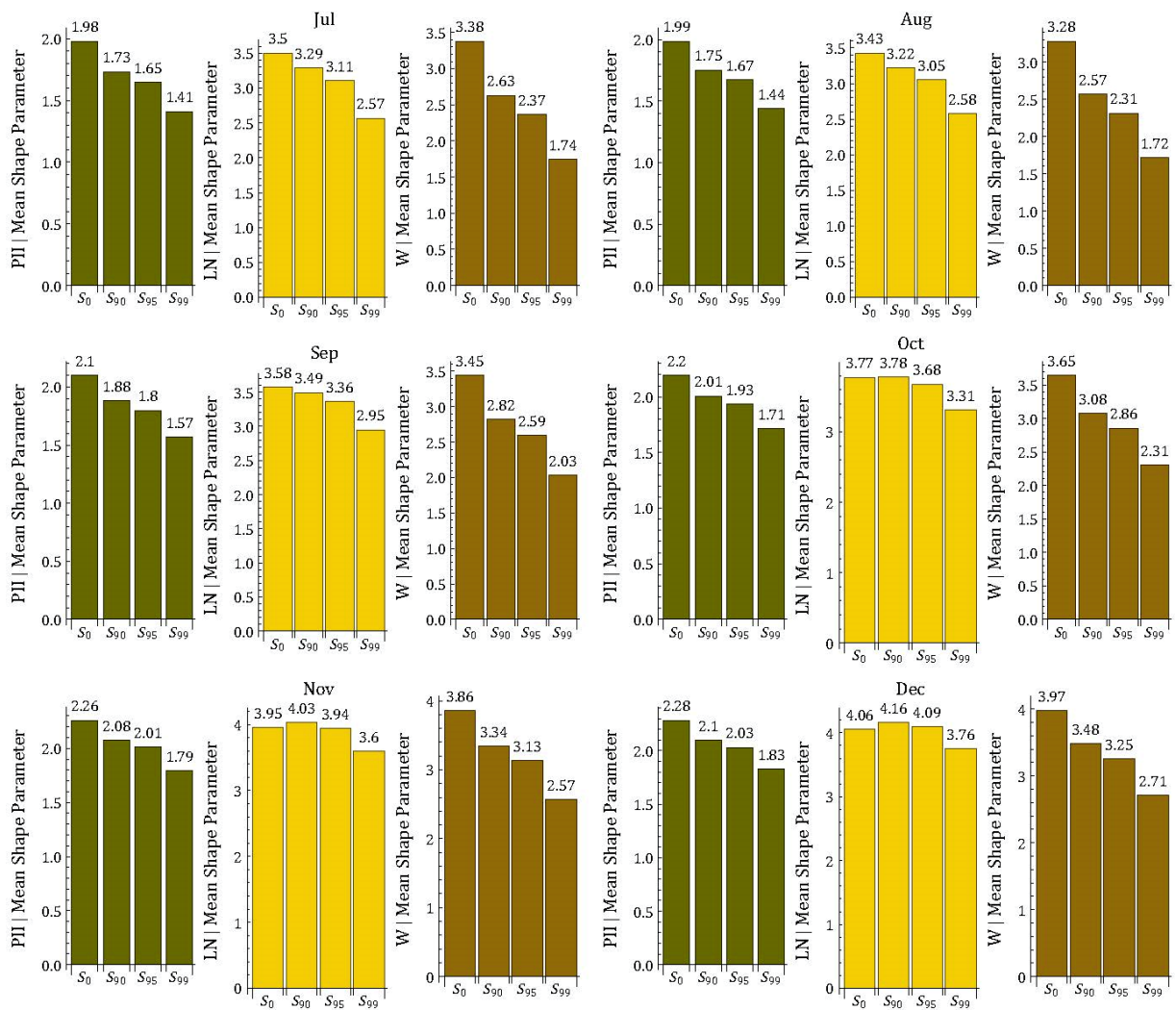
## 7.7.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

**Πίνακας 7.5.** Τιμές της παραμέτρου κλίμακας για τις τρεις κατανομές που προσαρμόστηκαν και για τα τέσσερα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ .

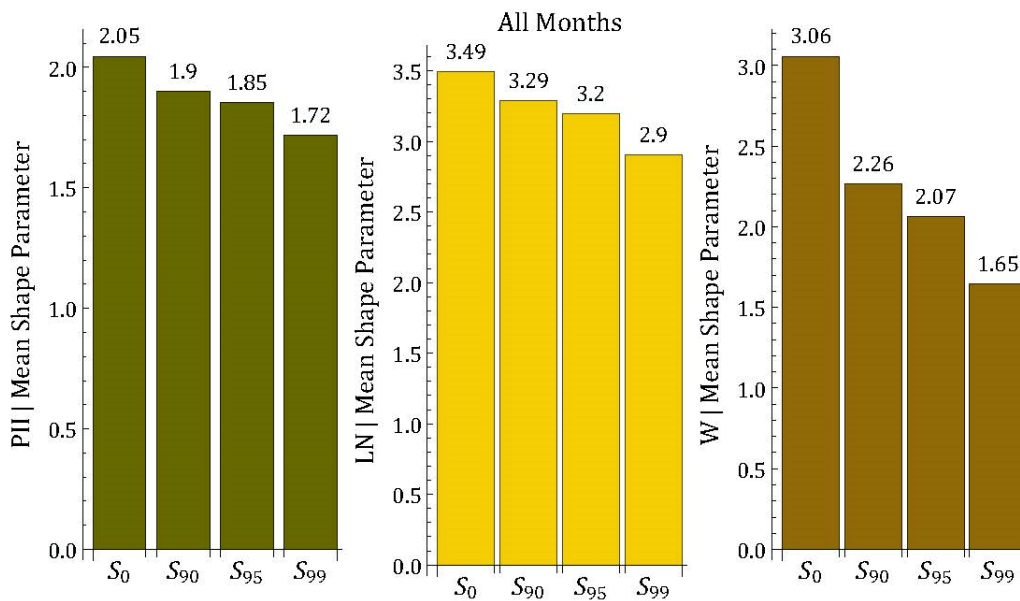
	Pareto II				LogNormal				Weibull			
	$S_0$	$S_{90}$	$S_{95}$	$S_{99}$	$S_0$	$S_{90}$	$S_{95}$	$S_{99}$	$S_0$	$S_{90}$	$S_{95}$	$S_{99}$
Jan	2.322	2.140	2.073	1.864	4.122	4.222	4.147	3.816	4.040	3.512	3.289	2.735
Feb	2.357	2.162	2.093	1.869	4.185	4.293	4.195	3.840	4.116	3.616	3.368	2.791
Mar	2.368	2.182	2.107	1.888	4.278	4.381	4.285	3.915	4.199	3.671	3.433	2.838
Apr	2.328	2.125	2.041	1.813	4.190	4.195	4.092	3.697	4.112	3.488	3.226	2.631
May	2.183	1.974	1.906	1.682	3.912	3.870	3.758	3.330	3.805	3.172	2.928	2.350
Jun	2.075	1.833	1.749	1.519	3.651	3.494	3.318	2.821	3.515	2.813	2.555	1.932
Jul	1.980	1.733	1.647	1.411	3.504	3.291	3.110	2.568	3.380	2.630	2.365	1.745
Aug	1.988	1.753	1.674	1.442	3.428	3.221	3.049	2.577	3.281	2.567	2.313	1.717
Sep	2.102	1.881	1.799	1.569	3.578	3.494	3.363	2.947	3.447	2.823	2.595	2.033
Oct	2.196	2.007	1.934	1.714	3.774	3.779	3.678	3.308	3.649	3.080	2.856	2.308
Nov	2.258	2.077	2.010	1.795	3.954	4.031	3.943	3.598	3.858	3.340	3.131	2.566
Dec	2.283	2.096	2.031	1.828	4.060	4.163	4.094	3.756	3.974	3.481	3.252	2.709
All	2.046	1.901	1.852	1.718	3.492	3.291	3.198	2.904	3.057	2.265	2.066	1.646



**Σχήμα 7.31.** Τιμές της παραμέτρου κλίμακας για τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



**Σχήμα 7.32.** Τιμές της παραμέτρου κλίμακας για τους μήνες Ιούλιο έως Δεκέμβριο για τα δείγματα  $S_0, S_{90}, S_{95}, S_{99}$ .



**Σχήμα 7.33.** Τιμές της παραμέτρου κλίμακας συνολικά για το σύνολο των μετρήσεων για τα δείγματα S<sub>0</sub>, S<sub>90</sub>, S<sub>95</sub>, S<sub>99</sub>

Η παράμετρος κλίμακας εκφράζει τη διασπορά μίας κατανομής επομένως αύξηση της θα σήμαινε ότι η κατανομή δίνει πιο ακραίες τιμές.

Παρατηρώντας τα σχήματα Σχήμα 7.31, Σχήμα 7.32, Σχήμα 7.33 και τον Πίνακα 7.5 που απεικονίζουν την τιμή της παραμέτρου κλίμακας συμπεραίνεται ότι καθώς το δείγμα αναφέρεται όλο και περισσότερο στην ουρά η παράμετρος κλίμακας μειώνεται και αυτό ενδεχομένως λειτουργεί σαν αντιστάθμιση για το γεγονός ότι η μεταβολή που συμβαίνει στην παράμετρο σχήματος θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ακραίων, όσο το δείγμα αντιπροσωπεύει περισσότερο ακραίες τιμές.

## 8 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήθηκε μία διαφορετική προσέγγιση στο θέμα της προσαρμογής των ακραίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου. Επιλέχθηκαν εκ των προτέρων τρεις ευρέως διαδεδομένες θεωρητικές κατανομές και προσαρμόστηκαν σε αυτές τα εμπειρικά δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου μέσω μίας νόρμας ελαχιστοποίησης τετραγωνικού σφάλματος. Οι τρεις κατανομές που επιλέχθηκαν ήταν η Pareto II, η Λογαριθμοκανονική και η Weibull και επιλέχθηκαν με βάση το μέγεθος της ουράς τους. Η Pareto II ανήκει στις υποεκθετικές κατανομές, είναι δηλαδή κατανομή με ουρά τύπου δύναμης και έχει την πιο χοντρή ουρά από τις τρεις κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν. Η Λογαριθμοκανονική ανήκει επίσης στις υποεκθετικές κατανομές, έχει ενδιάμεση ουρά και τη δεύτερη πιο χοντρή ουρά από τις τρεις κατανομές. Τέλος, η Weibull ανάλογα με την τιμή που έχει η παράμετρος ή συντελεστής σχήματος  $\gamma$  μπορεί να ανήκει στις υποεκθετικές για  $\gamma < 1$  ή στις υπερεκθετικές για  $\gamma > 1$  και έχει την πιο ελαφριά ουρά από τις τρεις κατανομές. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε παγκόσμια κλίμακα και τα δεδομένα αφορούσαν τη μέση 2-λεπτη ταχύτητα του ανέμου. Οι ακραίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου επιλέχθηκαν με τη μέθοδο του άνω κατωφλίου (Peak Over Threshold) και περιελάβανε την εξαγωγή τεσσάρων δειγμάτων ανάλυσης ακραίων τιμών της ουράς με βάση τέσσερα ποσοστημόρια. Έτσι τα τέσσερα δείγματα που δημιουργήθηκαν είναι τα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$ . Το δείγμα  $S_0$  περιλαμβάνει όλες τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή το 100%, το  $S_{90}$  περιελάβανε το 10% των μεγαλύτερων τιμών, το  $S_{95}$  τις τιμές που είναι μεγαλύτερες του 5% και το δείγμα  $S_{99}$  αντιπροσωπεύει το 1% των ακραίων τιμών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε εποχιακή κλίμακα ανά μήνα και στο σύνολο όλων των μηνών μαζί για τα τέσσερα δείγματα. Παράλληλα, έγινε η εξαγωγή των παραμέτρων σχήματος και κλίμακας των κατανομών για τα τέσσερα δείγματα και για το σύνολο των μηνών.

- Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των κατανομών ανά δύο, με κριτήριο το ποσοστό προσαρμογής της κάθε κατανομής στα εμπειρικά δεδομένα, για όλα τα δείγματα, για όλους τους μήνες και το σύνολο των μηνών (Πίνακας 7.1 και σχήματα παραρτήματος Σχήμα A.1 έως Σχήμα A.12). Από τη σύγκριση, συμπεραίνεται η υπεροχή της Λογαριθμοκανονικής κατανομής απέναντι στις άλλες δύο κατανομές, για όλα τα δείγματα σε όλους τους μήνες ξεχωριστά αλλά και στο σύνολο των μηνών. Από τη σύγκριση μεταξύ των άλλων δύο η Weibull αποδείχθηκε καλύτερη της Pareto II στο δείγμα  $S_0$  και στο  $S_{90}$  εκτός του συνόλου των μηνών όπου η Pareto II ήταν καλύτερη και επίσης παρατηρήθηκε ότι τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο οι δύο κατανομές πλησίαζαν. Στο δείγμα  $S_{95}$  η Weibull είναι πάλι καλύτερη της Pareto II τους περισσότερους μήνες, εκτός του Αυγούστου και του συνόλου των μηνών. Πάλι παρατηρήθηκε ότι οι δύο κατανομές πλησίασαν σε απόδοση στους μήνες Ιούνιο με

Οκτώβριο. Τέλος στο δείγμα  $S_{99}$ , η Pareto II είχε καλύτερη προσαρμογή τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο και στο σύνολο των μηνών.

- Από τη σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών παρατηρήθηκε η υπεροχή της Λογαριθμοκανονικής. Σημαντική παρατήρηση είναι ακόμα η βελτίωση της Pareto II τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο κάτι που μπορεί να υποδεικνύει εποχιακή διακύμανση, αλλά και η υπεροχή της έναντι της Weibull στο σύνολο των μηνών, τότε δηλαδή που υπάρχουν πολλές τιμές δεδομένων.
- Πραγματοποιήθηκε κατάταξη των κατανομών μέσω της μέσης απόδοσής τους για όλους τους μήνες και το σύνολο των μηνών (Πίνακας 7.2 και Σχήμα 7.7 έως Σχήμα 7.9). Από την κατάταξή τους προέκυψε πάλι ότι η Λογαριθμοκανονική υπερέχει σε απόδοση των άλλων δύο κατανομών. Ανάμεσα στις άλλες δύο κατανομές η Weibull είναι καλύτερη της Pareto II στο δείγμα  $S_0$  σε όλους τους μήνες και στο σύνολο των μηνών. Στα υπόλοιπα δείγματα η Pareto II είναι καλύτερη στο σύνολο των μηνών της Weibull και βελτιώνεται η απόδοσή της τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο και στο δείγμα  $S_{99}$  είναι καλύτερη της Weibull αυτούς τους μήνες.
- Με βάση τη μέση βαθμονόμηση των κατανομών δημιουργήθηκαν γραμμικά διαγράμματα (Σχήμα 7.10) τα οποία επιβεβαίωσαν την υπεροχή της Λογαριθμοκανονικής κατανομής και τη πιθανή ύπαρξη εποχιακής διακύμανσης χωρίς όμως αυτό να μπορεί να επιβεβαιωθεί με σιγουριά καθώς η τιμή της μέσης βαθμονόμησης της Λογαριθμοκανονικής είναι σταθερή.
- Στο σύνολο των μηνών παρουσιάστηκε μεγάλη βελτίωση της απόδοσης της Pareto II και χειροτέρευση της Weibull ενώ η Λογαριθμοκανονική παρουσίασε μικρή βελτίωση στο δείγμα  $S_0$  ενώ στα υπόλοιπα παρέμεινε σταθερή. Αυτή η σταθερότητα δείχνει ότι προσαρμόζεται καλύτερα στις τιμές της ταχύτητας του ανέμου.
- Με τη δημιουργία ξεχωριστών γραμμικών διαγραμμάτων (Σχήμα 7.11, Σχήμα 7.13, Σχήμα 7.15) που απεικονίζουν τα τέσσερα δείγματα  $S_0$ ,  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$  για κάθε μήνα παρατηρήθηκε επίσης η βελτίωση της Pareto II όσο το δείγμα αναφέρεται περισσότερο στην ουρά και ιδιαίτερη βελτίωση τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο και στο σύνολο των μηνών. Η δημιουργία των θηκογραμμάτων (Σχήμα 7.12, Σχήμα 7.14, Σχήμα 7.16) των τεσσάρων δειγμάτων για την κατανομή το επιβεβαίωσε. Η βελτίωση αυτή μπορεί να είναι μη ουσιαστική γιατί ήταν αναμενόμενη η βελτίωσή της καθώς το σχήμα της είναι J-Shape και ήταν προφανές πως θα βελτιωνόταν η απόδοσή της στην ουρά, αφού στην ουρά μοιάζει με τις άλλες κατανομές.
- Στη Λογαριθμοκανονική κατανομή παρατηρήθηκε ότι η προσαρμογή της κατανομής παρά τις διακυμάνσεις είναι καλύτερη στο δείγμα  $S_0$  και χειροτερεύει στα δείγματα  $S_{90}$ ,  $S_{95}$ ,  $S_{99}$  (Σχήμα 7.13, Σχήμα 7.14, Σχήμα 7.17). Παρατηρήθηκε επίσης και σε αυτή μία εποχιακή διακύμανση τους μήνες του καλοκαιριού που δεν είχε ανιχνευτεί με ακρίβεια νωρίτερα. Τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο η Λογαριθμοκανονική κατανομή

στο δείγμα  $S_0$  βελτιώνεται αρκετά ενώ στα δείγματα  $S_{90}$  και  $S_{95}$  πάλι παρατηρείται μία μικρή βελτίωση της απόδοσής της. Στο δείγμα  $S_{99}$  όμως τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο χειροτερεύει. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως στο σύνολο των όλων μηνών και στα τέσσερα δείγματα βελτιώνεται η απόδοσή της.

- Στην κατανομή Weibull (Σχήμα 7.15) παρατηρήθηκε ότι γίνεται χειρότερη όσο οι τιμές γίνονται πιο ακραίες, δηλαδή όσο το δείγμα γίνεται μικρότερο και πιο ουρά, αν και διακρίνεται κάποια ταύτιση στα δείγματα  $S_{95}$  και  $S_{99}$ . Αυτό οφείλεται στο ότι η ουρά της κατανομής δεν είναι αρκετά χοντρή για να μπορεί να περιλάβει ακραίες τιμές. Επίσης γίνεται αρκετά χειρότερη στους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο σε όλα τα δείγματα και στο σύνολο των δεδομένων και ακόμα χειρότερη στο σύνολο των δεδομένων, φανερώνοντας μία αδυναμία της στις πολλές τιμές. Γενικά, η απόδοσή της χειροτερεύει μετά το δείγμα  $S_{90}$  (Σχήμα 7.15, Σχήμα 7.16).
- Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των κατανομών ανά τρεις με κριτήριο το ποσοστό της εφαρμογής τους στα εμπειρικά δεδομένα η οποία επιβεβαίωσε την υπεροχή της Λογαριθμοκανονικής κατανομής (Πίνακας 7.3 και Σχήμα 7.18, Σχήμα 7.20).
- Ανάλυση της παραμέτρου σχήματος των κατανομών για τα τέσσερα δείγματα και για όλους τους μήνες και το σύνολο των μηνών (Πίνακας 7.4 και Σχήμα 7.21 ως Σχήμα 7.23) έδειξε αύξηση των τιμών της παραμέτρου σχήματος των κατανομών Λογαριθμοκανονικής και Pareto II που υποδηλώνει μείωση της ουράς της κατανομής και η μείωση της παραμέτρου σχήματος της κατανομής Weibull που υποδηλώνει αύξηση της ουράς της κατανομής.
- Στην παράμετρο σχήματος παρατηρήθηκε εποχιακή διακύμανση στις κατανομές για τους μήνες Ιούνιο με Οκτώβριο και μεγάλες διαφοροποιήσεις στο σύνολο των μηνών από τους υπόλοιπους μήνες για τη Λογαριθμοκανονική και τη Weibull ενώ μικρότερες για την Pareto II (Σχήμα 7.24, Σχήμα 7.26, Σχήμα 7.28, Σχήμα 7.30).
- Από ανάλυση της παραμέτρου κλίμακας (Πίνακας 7.5 και Σχήμα 7.31 έως Σχήμα 7.33) προέκυψε ότι καθώς το δείγμα αναφέρεται όλο και περισσότερο στην ουρά η παράμετρος κλίμακας μειώνεται γεγονός που ενδεχομένως λειτουργεί σαν αντιστάθμιση για τη μεταβολή που συμβαίνει στην παράμετρο σχήματος και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ακραίων, όσο το δείγμα αντιπροσωπεύει περισσότερο ακραίες τιμές.

Το γενικότερο συμπέρασμα που βγαίνει στην παρούσα διπλωματική μελέτη είναι ότι η Λογαριθμοκανονική κατανομή υπερτερεί, τόσο στην περιγραφή των ακραίων όσο και στο γενικό σύνολο των τιμών έναντι της Weibull, που θεωρείται στη βιβλιογραφία η πιο δημοφιλής ως η πιο αντιπροσωπευτική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου, αλλά και της Pareto II. Το συμπέρασμα αυτό έχει πολύ μεγάλες επιπτώσεις στο σχεδιασμό και στην πρόβλεψη ακραίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου καθώς η Λογαριθμοκανονική έχει πιο



χοντρή ουρά από τη Weibull και συνεπώς προβλέπει μεγαλύτερη συχνότητα και μέγεθος στις ακραίες τιμές του ανέμου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- Analysis on Public Health and Economic Damage Caused by Severe Weather Events in the United States [WWW Document], n.d. URL [http://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/21120\\_31a9483b86444bd5bc958cc729437670.html](http://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/21120_31a9483b86444bd5bc958cc729437670.html) (accessed 10.30.15).
- An, Y., Pandey, M.D., 2005. A comparison of methods of extreme wind speed estimation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93, 535–545. doi:10.1016/j.jweia.2005.05.003
- Balkema, A.A., Haan, L. de, 1974. Residual Life Time at Great Age. *The Annals of Probability* 2, 792–804.
- Beirlant, J. (Ed.), 2004. *Statistics of extremes: theory and applications*, Wiley series in probability and statistics. Wiley, Hoboken, NJ.
- Bensalah, Y., 2000. Steps in applying extreme value theory to finance: a review. Bank of Canada.
- Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: Table of Events | National Centers for Environmental Information (NCEI) [WWW Document], n.d. URL <https://www.ncdc.noaa.gov/billions/events> (accessed 10.30.15).
- Boos, D.D., 1984. Using Extreme Value Theory to Estimate Large Percentiles. *Technometrics* 26, 33–39. Doi: 10.2307/1268413
- Boutsikas, M., 2008. Extreme Value Theory (slides), 2008-10 [WWW Document]. URL [http://www.unipi.gr/faculty/mbouts/evt/slides\\_ch1\\_2010.pdf](http://www.unipi.gr/faculty/mbouts/evt/slides_ch1_2010.pdf) (accessed 10.23.15).
- Brabson, B.B., Palutikof, J.P., 2000. Tests of the generalized Pareto distribution for predicting extreme wind speeds. *Journal of Applied Meteorology* 39, 1627–1640.
- Bryson, M.C., 1974. Heavy-Tailed Distributions: Properties and Tests. *Technometrics* 16, 61–68. Doi: 10.2307/1267493
- Castillo, E., 2012. *Extreme Value Theory in Engineering*. Elsevier.
- Castillo, E., Hadi, A.S., 1997. Fitting the Generalized Pareto Distribution to Data. *Journal of the American Statistical Association* 92, 1609–1620. doi:10.1080/01621459.1997.10473683
- Cheng, E., Yeung, C., 2002. Generalized extreme gust wind speeds distributions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Fifth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering* 90, 1657–1669. Doi: 10.1016/S0167-6105(02)00277-5

- Chiodi, R., Ricciardelli, F., 2014. Three issues concerning the statistics of mean and extreme wind speeds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 125, 156–167. doi:10.1016/j.jweia.2013.12.009
- Coles, S., 2001a. Basics of Statistical Modeling, in: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer Series in Statistics. Springer London, pp. 18–44.
- Coles, S., 2001b. Classical Extreme Value Theory and Models, in: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer Series in Statistics. Springer London, pp. 45–73.
- Coles, S., 2001c. Threshold Models, in: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer Series in Statistics. Springer London, pp. 74–91.
- Cook, N.J., 1986. Designers guide to wind loading of building structures. Part 1.
- Cook, N.J., 1982. Towards better estimation of extreme winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 9, 295–323. Doi: 10.1016/0167-6105(82)90021-6
- Cook, N.J., Ian Harris, R., Whiting, R., 2003. Extreme wind speeds in mixed climates revisited. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 403–422. Doi: 10.1016/S0167-6105(02)00397-5
- Cunnane, C., 1988. Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology* 100, 269–290. Doi: 10.1016/0022-1694(88)90188-6
- Davison, A.C., Smith, R.L., 1990. Models for Exceedances over High Thresholds. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 52, 393–442.
- De Haan, L., Ferreira, A., 2006. *Extreme Value Theory*, Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer New York, New York, NY.
- Earth Science Reference: February 2013, n.d.
- eFunda: Introduction to Hot-Wire Anemometers [WWW Document], n.d. URL [http://www.efunda.com/designstandards/sensors/hot\\_wires/hot\\_wires\\_intro.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/hot_wires/hot_wires_intro.cfm) (accessed 10.30.15).
- El Adlouni, S., Bobée, B., Ouarda, T.B.M.J., 2008. On the tails of extreme event distributions in hydrology. *Journal of Hydrology* 355, 16–33. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.02.011
- El Adlouni, S., Ouarda, T.B.M.J., Zhang, X., Roy, R., Bobée, B., 2007. Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model: GMLE FOR THE NONSTATIONARY GEV MODELOR. *Water Resources Research* 43, n/a–n/a. Doi: 10.1029/2005WR004545

- Embrechts, P., Klüppelberg, C., Mikosch, T., 1997. Modelling extremal events. Springer Science & Business Media.
- Embrechts, P., Resnick, S.I., Samorodnitsky, G., 1999. Extreme value theory as a risk management tool. *North American Actuarial Journal* 3, 30–41.
- Escalante-Sandoval, C.A., 2013. Estimation of Extreme Wind Speeds by Using Mixed Distributions.
- Galambos, J., Lechner, J., Simiu, E. (Eds.), 1994. *Extreme Value Theory and Applications*. Springer US, Boston, MA.
- Gatey, D.A., Miller, C.A., 2007. An investigation into 50-year return period wind speed differences for Europe. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, the Fourth European and African Conference on Wind Engineering* 95, 1040–1052. doi:10.1016/j.jweia.2007.01.016
- Gomes, M.I., 1984. Penultimate limiting forms in extreme value theory. *Ann Inst Stat Math* 36, 71–85. Doi: 10.1007/BF02481954
- Gross, J.L., Heckert, N.A., Lechner, J.A., Simiu, E., Brown, R., 1995. Extreme wind estimates by the conditional mean exceedance procedure. *Journal of Structural Engineering*.
- Harris, R.I., 1996. Gumbel re-visited - a new look at extreme value statistics applied to wind speeds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 59, 1–22. Doi: 10.1016/0167-6105(95)00029-1
- Harris, R.I., Cook, N.J., 2014. The parent wind speed distribution: Why Weibull? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 131, 72–87. doi:10.1016/j.jweia.2014.05.005
- Holmes, J.D., Moriarty, W.W., 1999. Application of the generalized Pareto distribution to extreme value analysis in wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 83, 1–10. Doi: 10.1016/S0167-6105(99)00056-2
- III, J.P., 1975. Statistical Inference Using Extreme Order Statistics. *The Annals of Statistics* 3, 119–131.
- James A. Lechner, S.D.L., 1992. Recent approaches to extreme value estimation with application to wind speeds. Part I: The Pickands method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 41, 509–519. Doi: 10.1016/0167-6105(92)90457-L

Japan, M.A., n.d. Chapter 4- Measurement of surface wind [WWW Document]. URL [http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/ric/material/1\\_Lecture\\_Notes/CP4-Wind.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/ric/material/1_Lecture_Notes/CP4-Wind.pdf) (accessed 10.23.15).

Jenkinson, A.F., 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 81, 158–171. doi:10.1002/qj.49708134804

Klüppelberg, C., 1988. Subexponential Distributions and Integrated Tails. *Journal of Applied Probability* 25, 132–141. Doi: 10.2307/3214240

Knutson, T.R., McBride, J.L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J.P., Srivastava, A.K., Sugi, M., 2010. Tropical cyclones and climate change. *Nature Geosci* 3, 157–163. Doi: 10.1038/ngeo779

Koutsoyiannis, D., 2013. Encolpion of stochastics Fundamentals of stochastic processes. *Lecture Notes of Stochastics*, Version 5.

Koutsoyiannis, D., 2011. *Lecture Notes on Hydrometeorology: A probability-based introduction to atmospheric thermodynamics.*

Koutsoyiannis, D., 2004. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 1, Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal* 49, 575–590.

Koutsoyiannis, D., n.d. *The utility of probability.*

Landsea, C.W., 2000. Climate variability of tropical cyclones: past, present and future. *Storms* 1, 220–241.

Landsea, C.W., 1993. A Climatology of Intense (or Major) Atlantic Hurricanes. *Mon. Wea. Rev.* 121, 1703–1713. Doi: 10.1175/1520-0493(1993)121<1703: ACOIMA>2.0.CO; 2

Lang, M., Ouarda, T.B.M.J., Bobée, B., 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology* 225, 103–117. Doi: 10.1016/S0022-1694(99)00167-5

Leadbetter, M.R., 1991. On a basis for “Peaks over Threshold” modeling. *Statistics & Probability Letters* 12, 357–362. Doi: 10.1016/0167-7152(91)90107-3

Leadbetter, M.R., 1974. On extreme values in stationary sequences. *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw Gebiete* 28, 289–303. Doi: 10.1007/BF00532947

Leadbetter, M.R., Lindgren, G., Rootzén, H., 1983. *Extremes and Related Properties of Random Sequences and Processes*, Springer Series in Statistics. Springer New York, New York, NY.

Lindgren, G., Rootzén, H., Tjøstheim, D., Davis, R.A., Nilsson, L., Uvell, S., Milhøj, A., Maré, J. de, 1987. Extreme Values: Theory and Technical Applications [with Discussion and Reply]. *Scandinavian Journal of Statistics* 14, 241–279.

Matthews, S., 2007. How is wind speed measured ? Is it an average of speeds taken at specific time intervals.....please explain. : [WWW Document]. WRAL.com. URL [http://www.wral.com/weather/blogpost/1283652/?comment\\_order=forward](http://www.wral.com/weather/blogpost/1283652/?comment_order=forward) (accessed 10.23.15).

McNeil, A.J., 1999. Extreme value theory for risk managers. Departement Mathematik ETH Zentrum.

McNeil, A.J., Frey, R., Embrechts, P., 2005. Quantitative Risk Management [WWW Document]. URL <http://press.princeton.edu/chapters/s8056.pdf> (accessed 10.23.15).

Morgan, E.C., Lackner, M., Vogel, R.M., Baise, L.G., 2011. Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management* 52, 15–26. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.015

Ouarda, T.B.M.J., Rasmussen, P.F., Bobée, B., Bernier, J., 1998. Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle. *Revue des sciences de l'eau* 11, 41. Doi: 10.7202/705328ar

Papalexiou, S.M., Koutsoyiannis, D., 2013. Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall. *Water Resources Research* 49, 187–201. Doi: 10.1029/2012WR012557

Papalexiou, S.M., Koutsoyiannis, D., Makropoulos, C., 2013. How extreme is extreme? An assessment of daily rainfall distribution tails. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 851–862. Doi: 10.5194/hess-17-851-2013

Pielke, R.A., Landsea, C.W., 1998. Normalized Hurricane Damages in the United States: 1925–95. *Wea. Forecasting* 13, 621–631. Doi: 10.1175/1520-0434(1998)013<0621:NHDITU>2.0.CO; 2

Prescott, P., Walden, A.T., 1983. Maximum likelihood estimation of the parameters of the three-parameter generalized extreme-value distribution from censored samples. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 16, 241–250. Doi: 10.1080/00949658308810625

Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., 2010. Climate change impacts on wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 430–437. doi:10.1016/j.rser.2009.07.028

REED AM-4204 Hot Wire Anemometer w/ RS232 Output [WWW Document], n.d. URL <http://www.licensedelectrician.com/Store/RD/AM-4204.htm> (accessed 10.30.15).

- Sachs, P., 1978. *Wind forces in engineering*, 2d ed. ed. Pergamon Press, Oxford, New York.
- Sacré, C., Moisselin, J.M., Sabre, M., Flori, J.P., Dubuisson, B., 2007. A new statistical approach to extreme wind speeds in France. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, the Fourth European and African Conference on Wind Engineering 95, 1415–1423. doi:10.1016/j.jweia.2007.02.013
- Simiu, E., Heckert, N.A., 1996. Extreme Wind Distribution Tails: A “Peaks over Threshold” Approach. *Journal of Structural Engineering* 122, 539–547. Doi: 10.1061/ (ASCE) 0733-9445(1996)122:5(539)
- Simiu, E., Heckert, N.A., Filliben, J.J., Johnson, S.K., 2001. Extreme wind load estimates based on the Gumbel distribution of dynamic pressures: an assessment. *Structural Safety* 23, 221–229. Doi: 10.1016/S0167-4730(01)00016-9
- Simiu, E., Scanlan, R.H., 1978. *Wind Effect on Structures: An Introduction to Wind Engineering*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Singh, V., 2012. *Hydrologic Frequency Modeling: Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analyses*, 14–17 May 1986, Louisiana State University, Baton Rouge, U.S.A. Springer Science & Business Media.
- Smith, R.L., 2003. *Statistics of extremes, with applications in environment, insurance and finance. Extreme values in finance, telecommunications and the environment* 1–78.
- Smith, R.L., 1986. Extreme value theory based on the  $r$  largest annual events. *Journal of Hydrology* 86, 27–43. Doi: 10.1016/0022-1694(86)90004-1
- Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Foufoula-Georgiou, E., 1993. *Frequency analysis of extreme events*.
- Tawn, J.A., 1990. Modelling Multivariate Extreme Value Distributions. *Biometrika* 77, 245–253. Doi: 10.2307/2336802
- The 728-Ton Tuned Mass Damper of Taipei 101 | Amusing Planet [WWW Document], n.d. URL <http://www.amusingplanet.com/2014/08/the-728-ton-tuned-mass-damper-of-taipei.html> (accessed 10.30.15).
- The Largest and Deadliest Hurricane to Hit the United States [WWW Document], n.d. URL <http://geology.com/hurricanes/largest-hurricane/> (accessed 10.23.15).
- Todorovic, P., 1978. Stochastic models of floods. *Water Resour. Res.* 14, 345–356. Doi: 10.1029/WR014i002p00345

Tornados and Wind-Related Events a Significant Cause of Harm and Economic Damage [WWW Document], n.d. URL [https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/20389\\_5b40dc9c612142c68186ae43e428d34e.html](https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/20389_5b40dc9c612142c68186ae43e428d34e.html) (accessed 10.30.15).

US Department of Commerce, N., n.d. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Home Page [WWW Document]. URL <http://www.noaa.gov/> (accessed 10.26.15).

Wang, J., Qin, S., Jin, S., Wu, J., 2015. Estimation methods review and analysis of offshore extreme wind speeds and wind energy resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 26–42. doi:10.1016/j.rser.2014.09.042

Weather 2011 [WWW Document], n.d. URL [http://www.exo.net/~pauld/summer\\_institute/weather2011/Weather2011.htm](http://www.exo.net/~pauld/summer_institute/weather2011/Weather2011.htm) (accessed 10.30.15).

Weissman, I., 1978. Estimation of Parameters and Larger Quantiles Based on the k Largest Observations [WWW Document]. URL [http://darp.lse.ac.uk/PapersDB/Weissman\\_\(JASA\\_78\).pdf](http://darp.lse.ac.uk/PapersDB/Weissman_(JASA_78).pdf) (accessed 10.23.15).

Werner, T., Upper, C., 2002. Time variation in the tail behaviour of bund futures returns, Discussion paper / Economic Research Centre of the Deutsche Bundesbank. Dt. Bundesbank, Frankfurt am Main.

Wikipedia, the free encyclopedia, 2015. . Wikipedia, the free encyclopedia.

XII, Y.Q., Li, Q.S., Li, Z.N., Chow, Y.W., Li, G.Q., 2006. Probability distributions of extreme wind speed and its occurrence interval. *Engineering Structures* 28, 1173–1181. doi:10.1016/j.engstruct.2006.01.001

Ανεμογεννήτριες στην Ικαρία: όσα παίρνει ο άνεμος... | ikariamag.gr [WWW Document], n.d. URL <http://www.ikariamag.gr/%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%B5%CF%82-%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CE%B9%CE%BA%CE%B1%CF%81%CE%AF%CE%B1-%CF%8C%CF%83%CE%B1-%CF%80%CE%B1%CE%AF%CF%81%CE%BD%CE%B5%CE%B9-%CE%BF-%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CE%BF%CF%82%E2%80%A6> (accessed 10.30.15).

Δημάκος, Ι., 2014. Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση πολλαπλής κλίμακας του ανέμου στην Ελλάδα. ΤΥΠΕ.

Κουτσογιάννης, Δ., 2000. Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας - Μέρος 1.



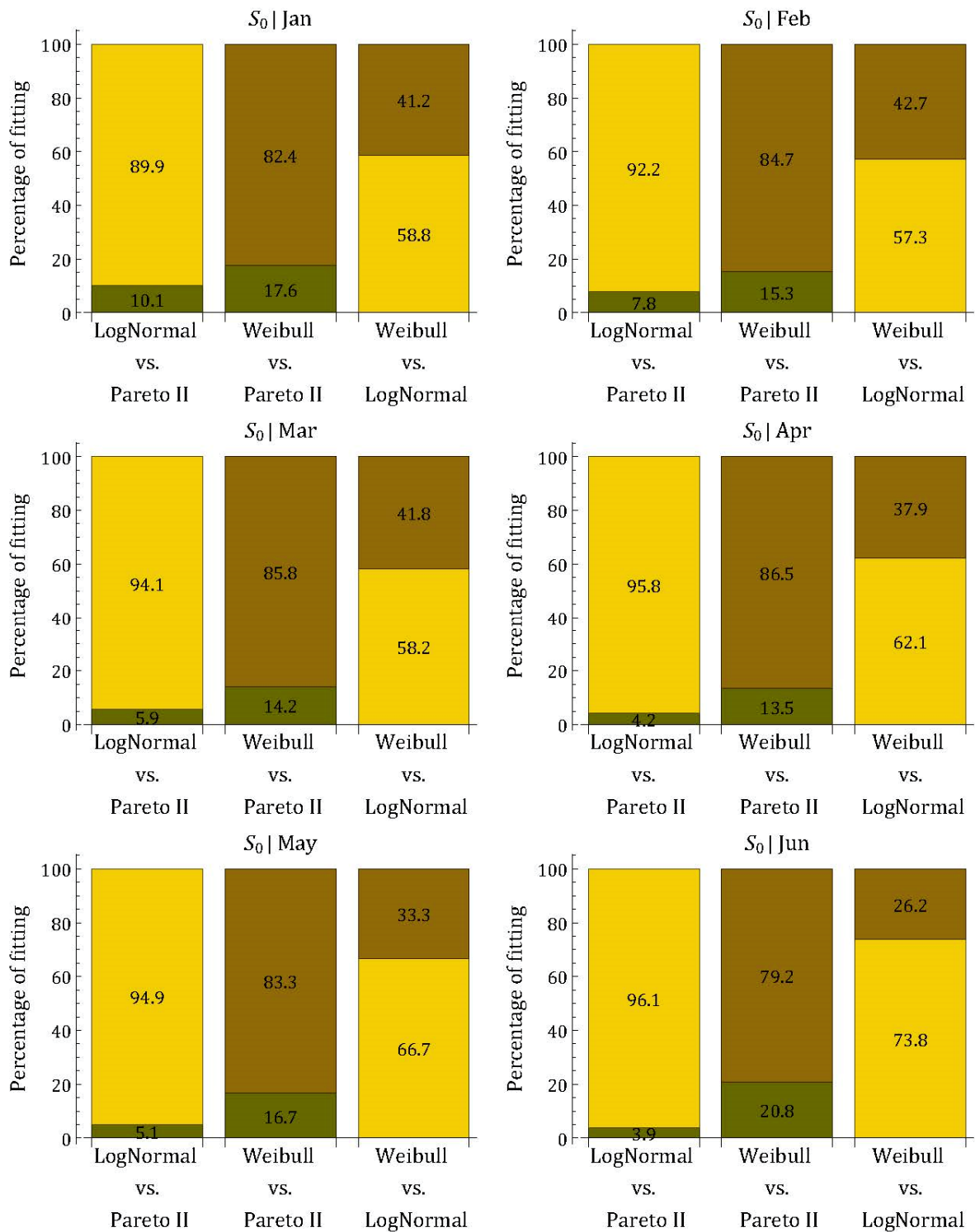
Μαμάσης, Ν., 2013. Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία-Αιολική Ενέργεια [WWW Document]. URL [http://users.itia.ntua.gr/nikos/energy/ene\\_wind\\_13.pdf](http://users.itia.ntua.gr/nikos/energy/ene_wind_13.pdf) (accessed 10.23.15).

Νεραντζάκη, Σ., 2012. Πιθανοτικές κατανομές ακραίων βροχοπτώσεων Εφαρμογή σε παγκόσμια κλίμακα. ΤΥΠΕ.

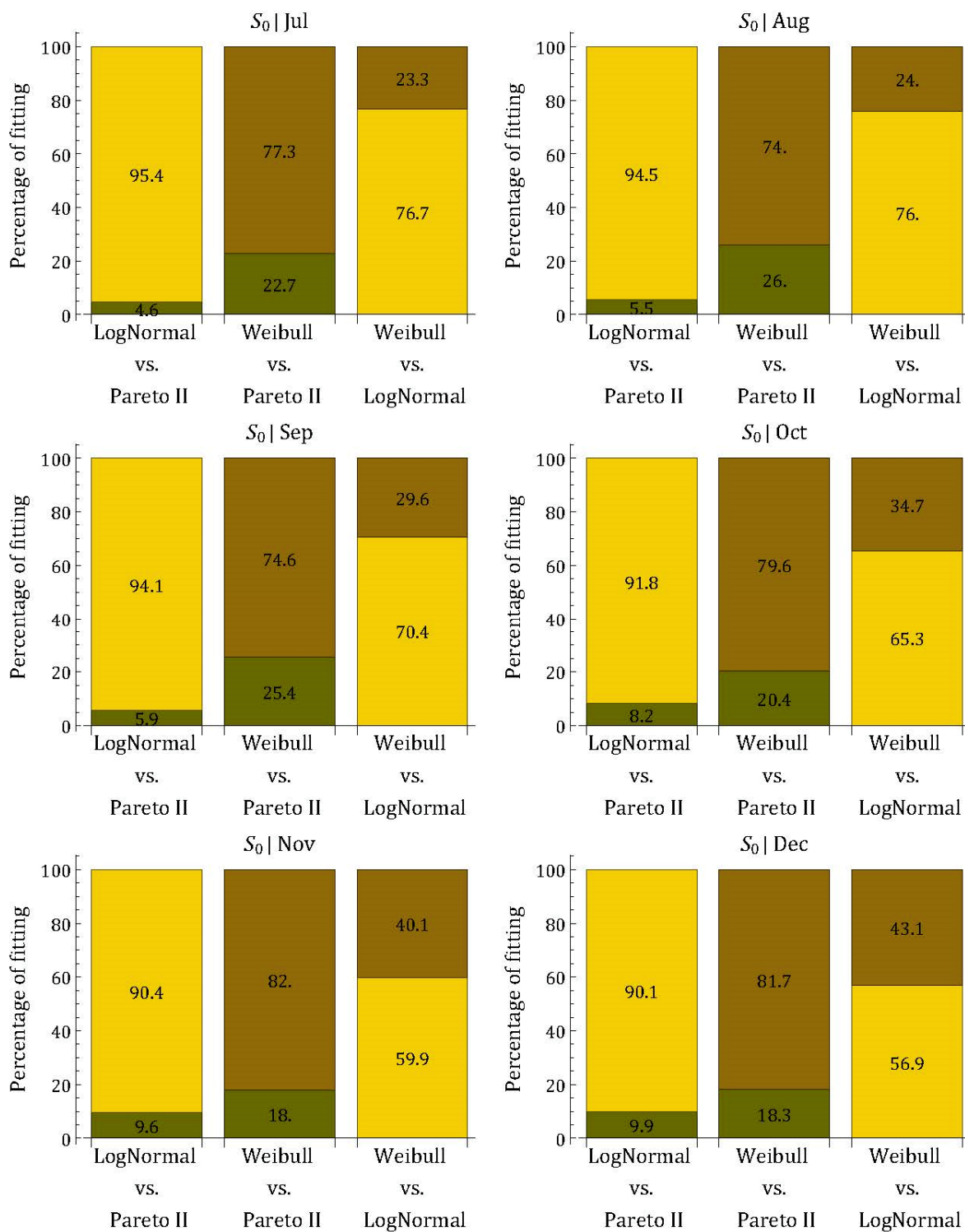
Φιλιππίδου, Α.-Μ., 2015. Στατιστική και στοχαστική ανάλυση της ωριαίας ταχύτητας ανέμου για την προσομοίωση παραγωγής αιολικής ενέργειας. Εφαρμογή σε σταθμούς της Κεντρικής Ελλάδας.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

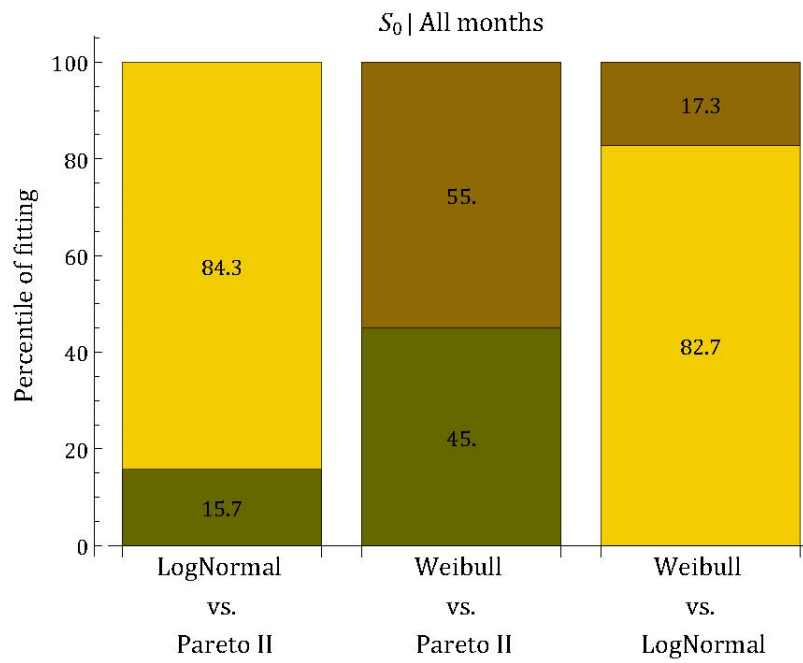
---



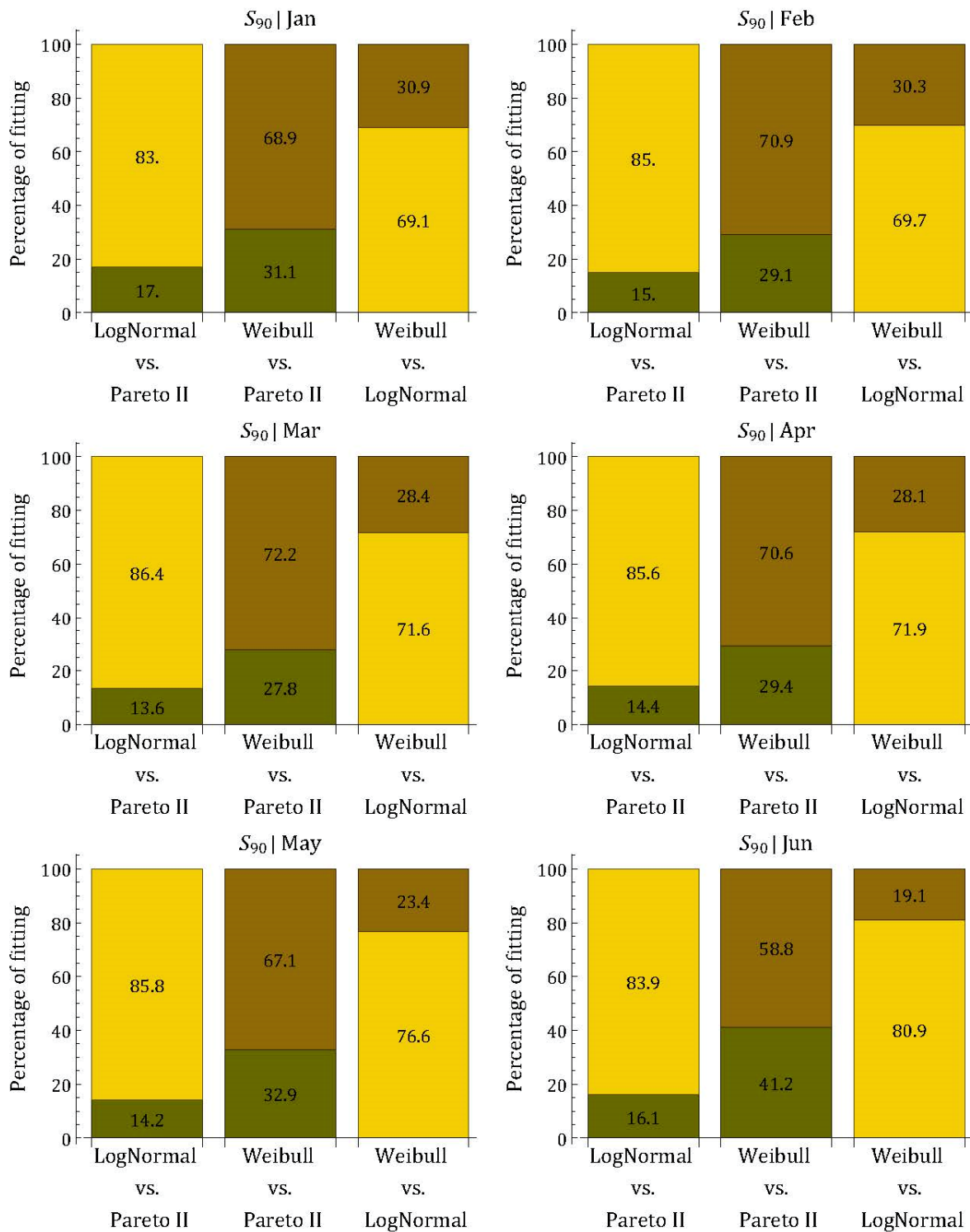
**Σχήμα A.1.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο στο δείγμα  $S_0$ .



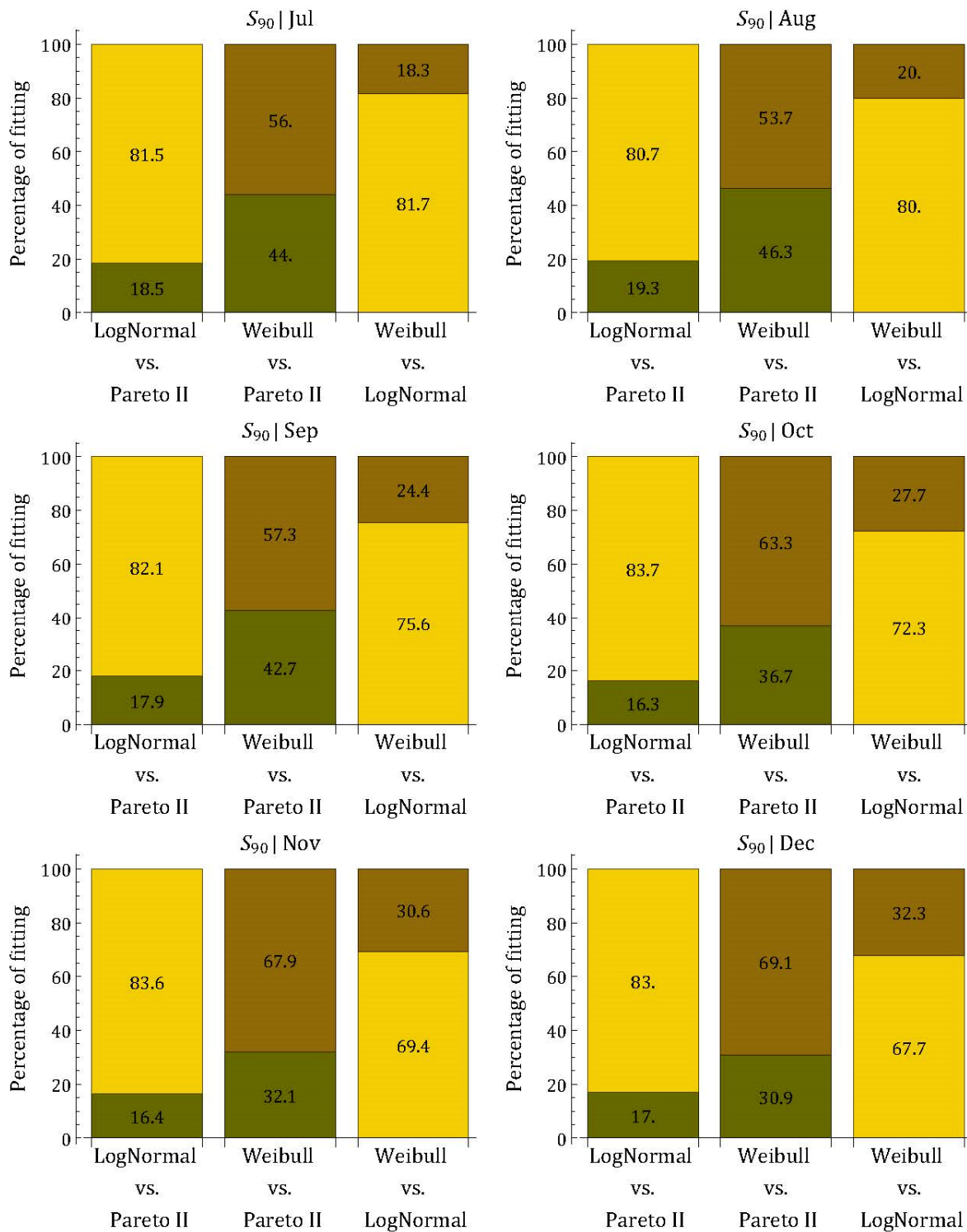
**Σχήμα Α.2.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για τους μήνες Ιούλιο έως Δεκέμβριο στο δείγμα  $S_0$ .



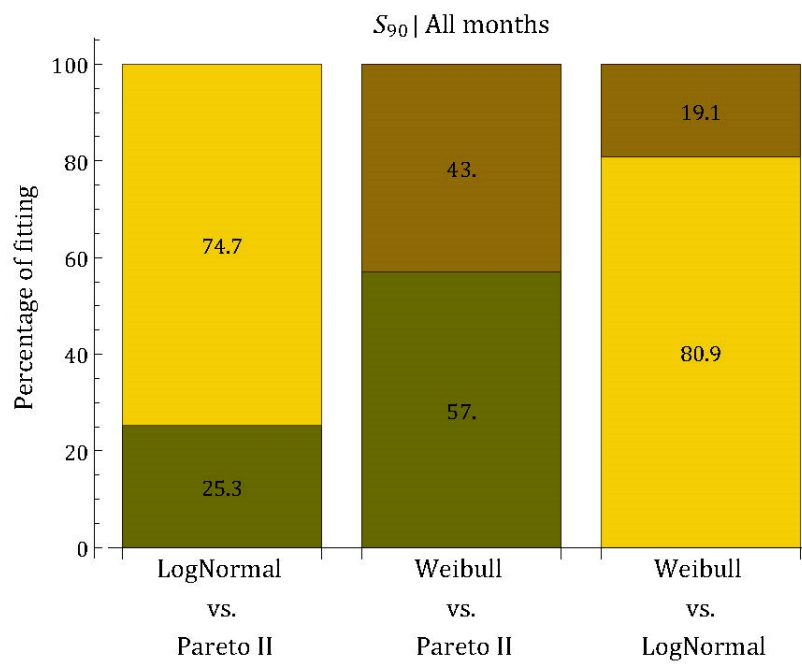
**Σχήμα A.3.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για το σύνολο των δεδομένων στο δείγμα  $S_0$ .



**Σχήμα Α.4.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο στο δείγμα  $S_{90}$ .

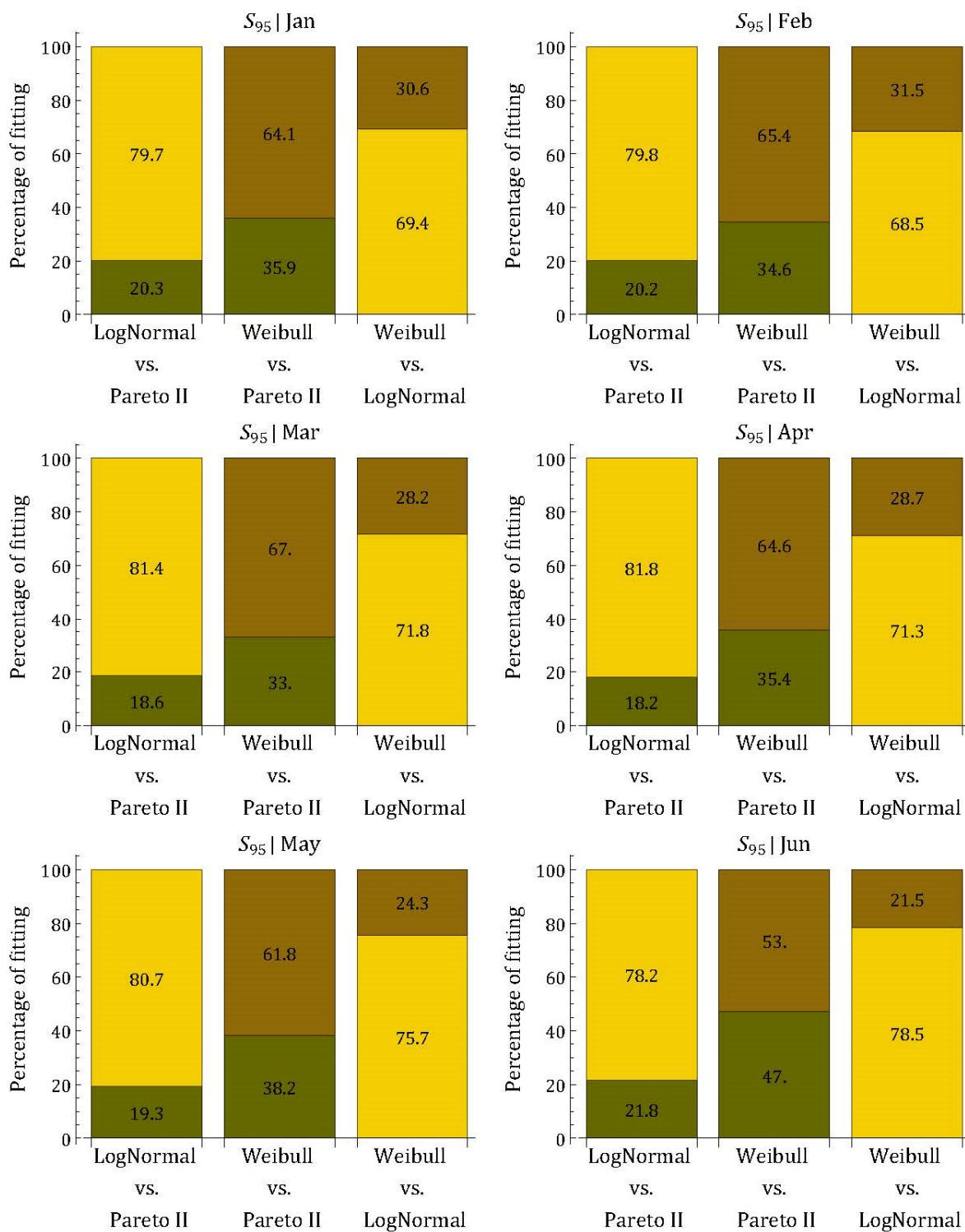


**Σχήμα Α.5.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για τους μήνες Ιούλιο έως Δεκέμβριο στο δείγμα  $S_{90}$ .

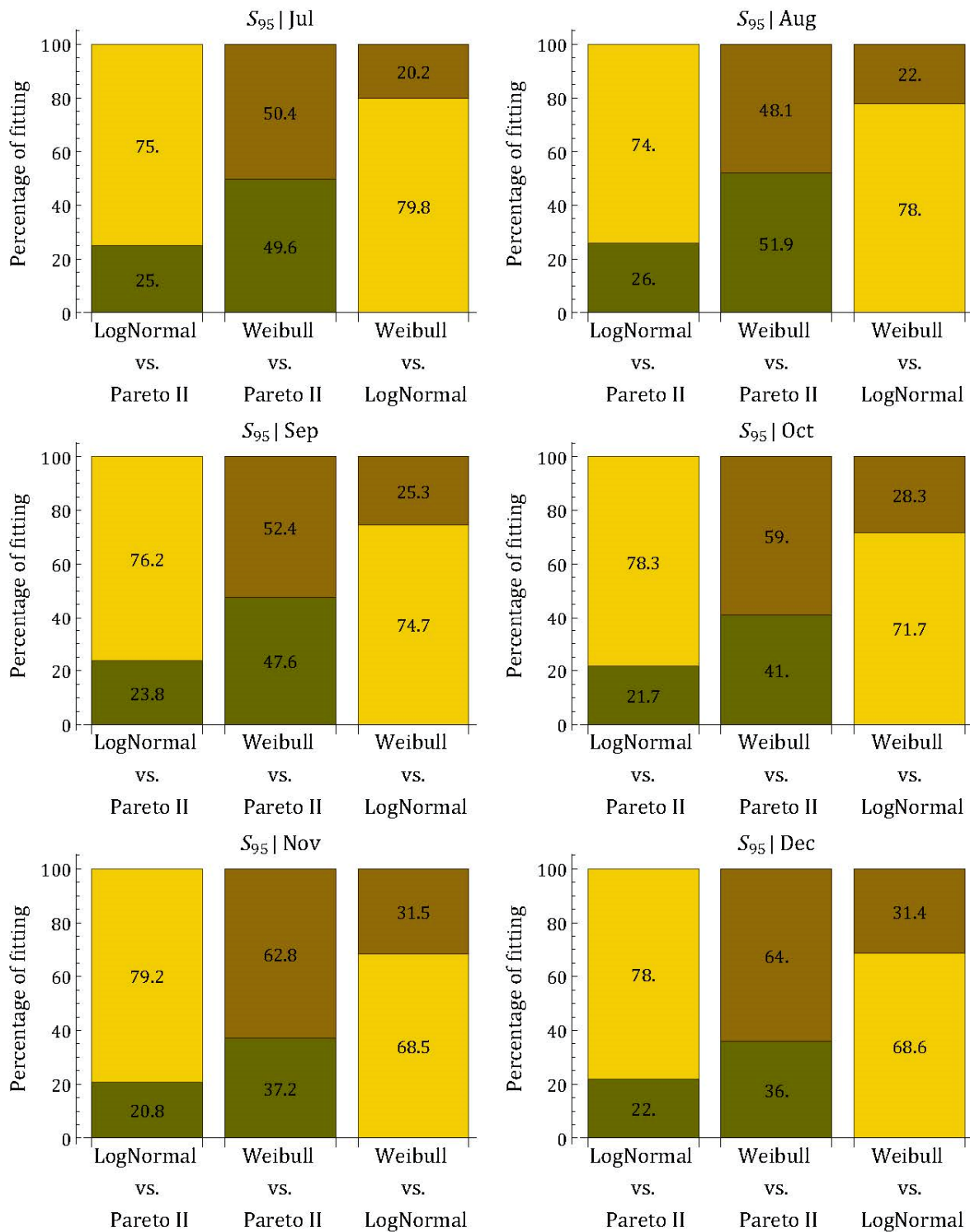


**Σχήμα A.6.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για το σύνολο των δεδομένων στο δείγμα  $S_{90}$ .

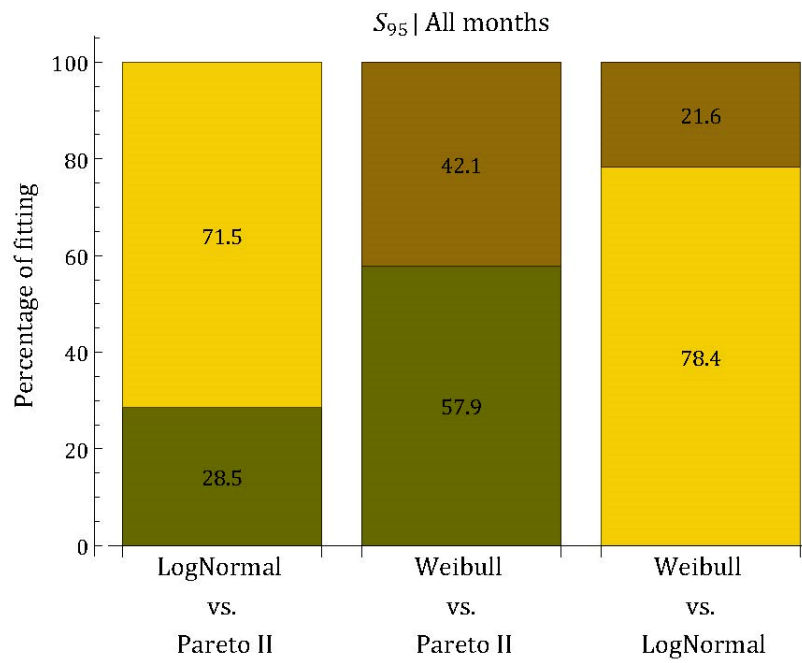




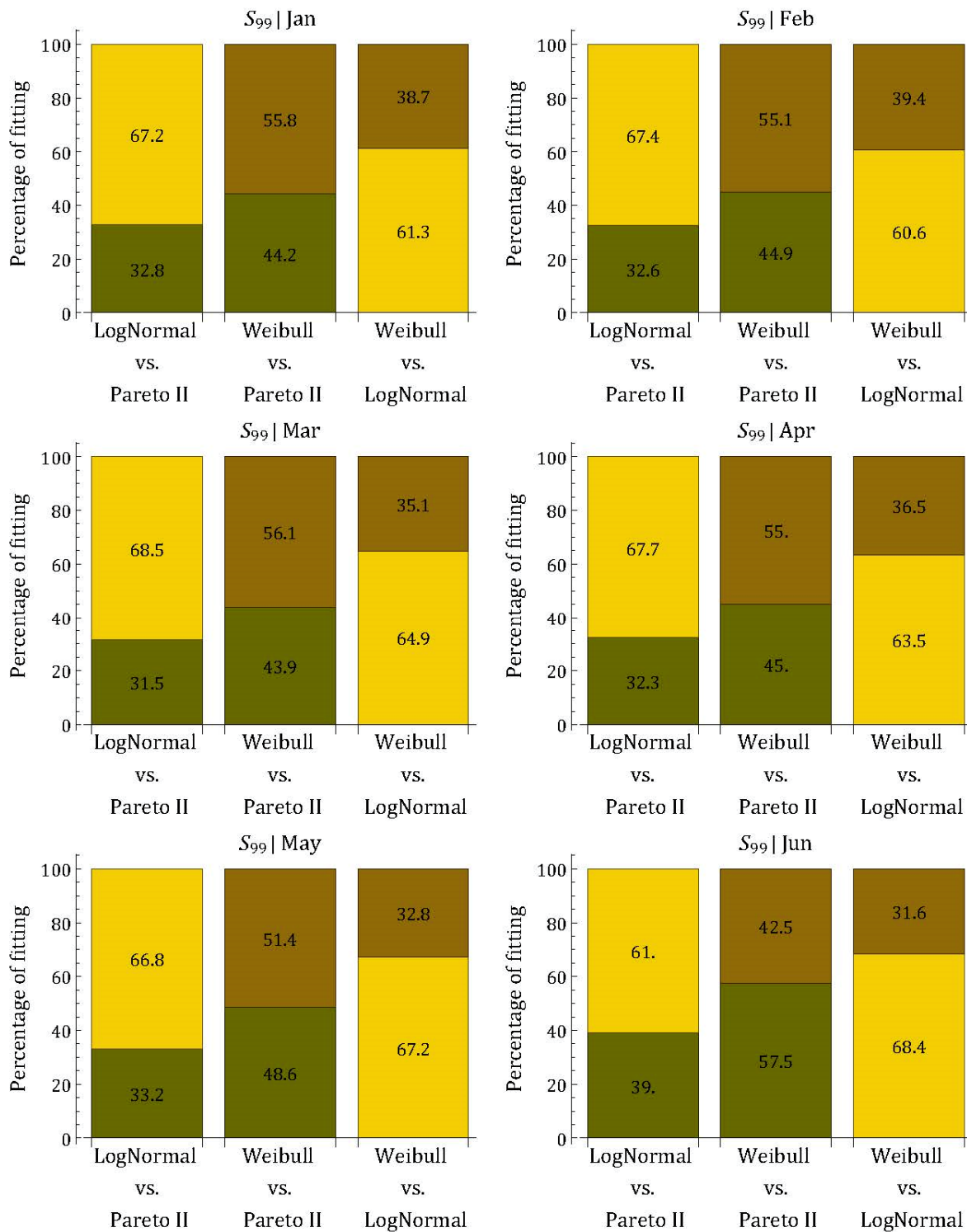
**Σχήμα Α.7.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο στο δείγμα  $S_{95}$ .



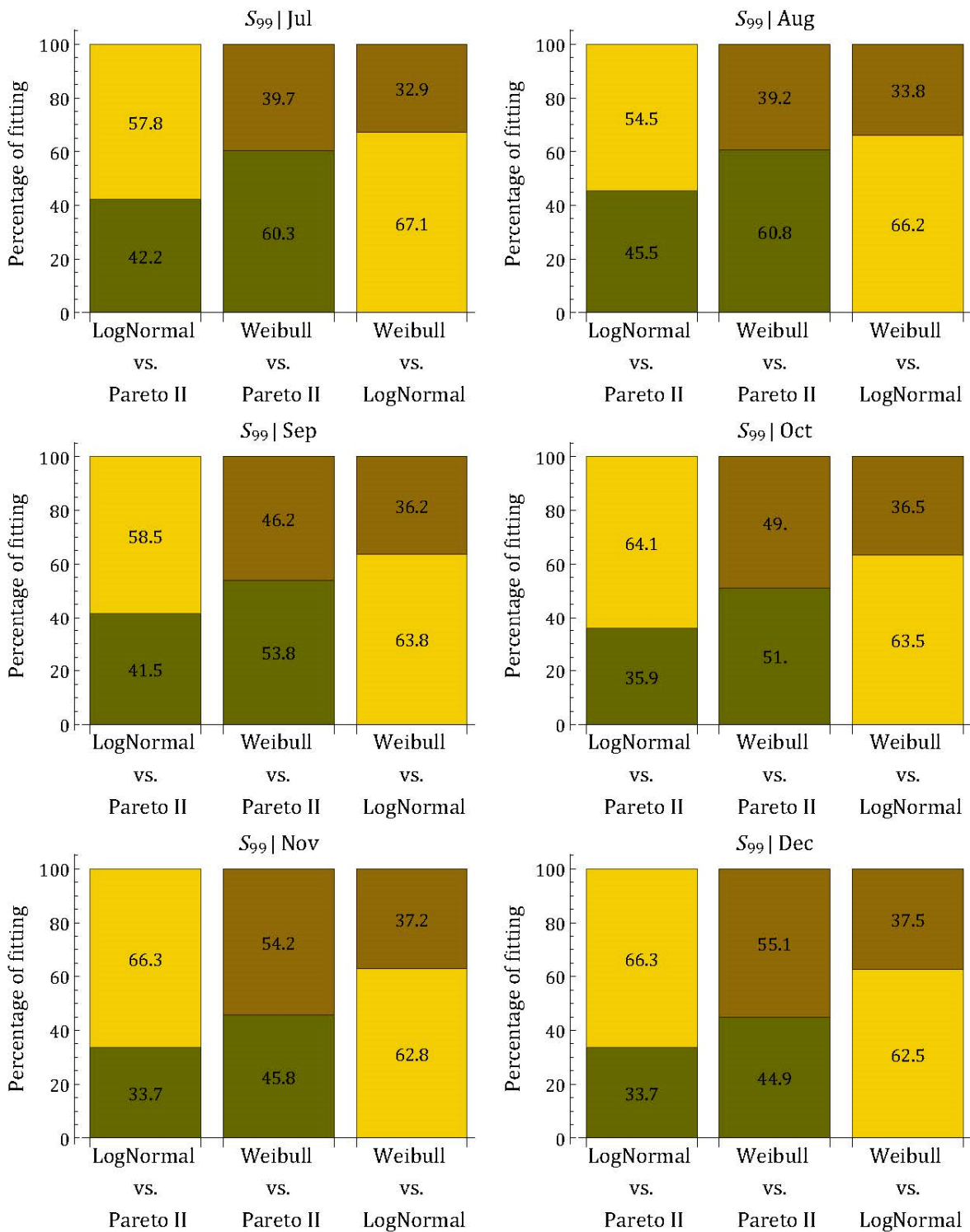
**Σχήμα Α.8.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για τους μήνες Ιούλιο έως Δεκέμβριο στο δείγμα  $S_{95}$ .



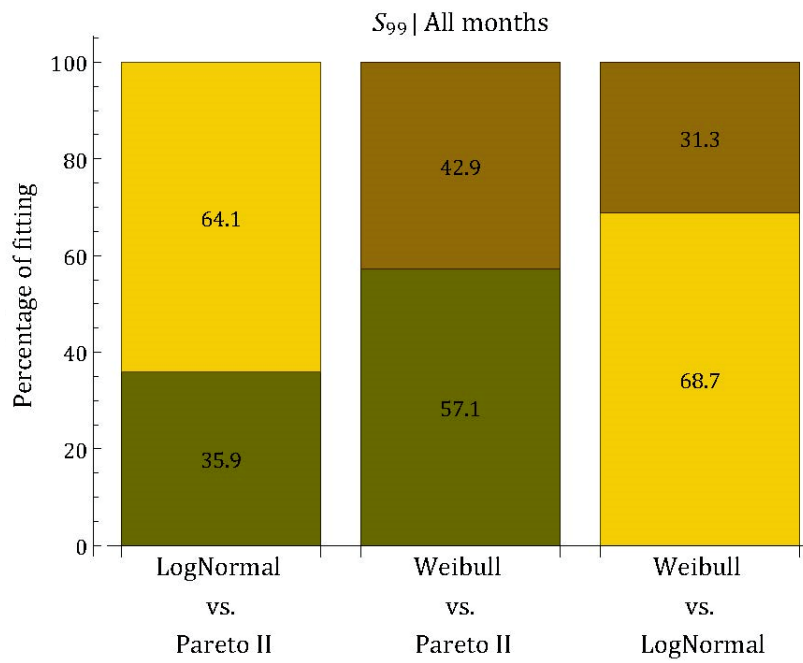
**Σχήμα A.9.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για το σύνολο των δεδομένων στο δείγμα  $S_{95}$ .



**Σχήμα A.10.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο στο δείγμα  $S_{99}$ .



**Σχήμα Α.11.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για τους μήνες Ιούλιο έως Δεκέμβριο στο δείγμα  $S_{99}$ .



**Σχήμα A.12.** Σύγκριση ανά δύο των τριών κατανομών που προσαρμόστηκαν για το σύνολο των δεδομένων στο δείγμα  $S_{99}$ .