

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

*Στοχαστική Μελέτη Ακραίων Τιμών της Ταχύτητας του
Ανέμου σε Παγκόσμια Κλίμακα με χρήση Κ-ροπών*

Φαίδων Διακομόπουλος

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δημητριάδης, Δρ Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ



Αθήνα, Ιούλιος 2020



Περιεχόμενα

1.

Εισαγωγή-Ιστορική αναδρομή

2.

Βάσεις δεδομένων

3.

Στατιστικά εργαλεία

4.

Αποτελέσματα

5.

Εφαρμογή ανεμογεννητριών

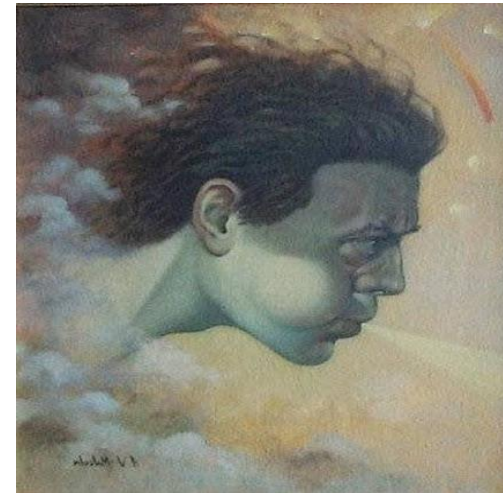
6.

Συμπεράσματα



ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ (1/2)

Στον άνεμο αποδιδόταν ιδιαίτερη σημασία από την αρχαιότητα.



«... ο Αίολος, ανέμων βασιλέας... σε ψήλωμα εκείνος
θρονιασμένος σκήπτρο κρατεί, μετριάζει το θυμό, το
ανεμικό τους φρόνιμα γλυκαίνει»

Βιργίλιος, Αινειάδα βιβλίο 1, στ 52-58.

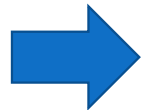


ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ (2/2)

Από τον ανεμόμυλο στην ανεμογεννήτρια.



Οι πρώτοι ανεμόμυλοι στην Περσία (6^ο με 9^ο αιώνα μ.Χ)
Κατακόρυφου άξονα



Ο ανεμόμυλος P. La Cour στη Δανία, 1890. Τοπικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής του χωριού Askov.
Οριζόντιου άξονα



Σύγχρονη ανεμογεννήτρια



ΓΙΑΤΙ ΜΕΛΕΤΑΜΕ ΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ;

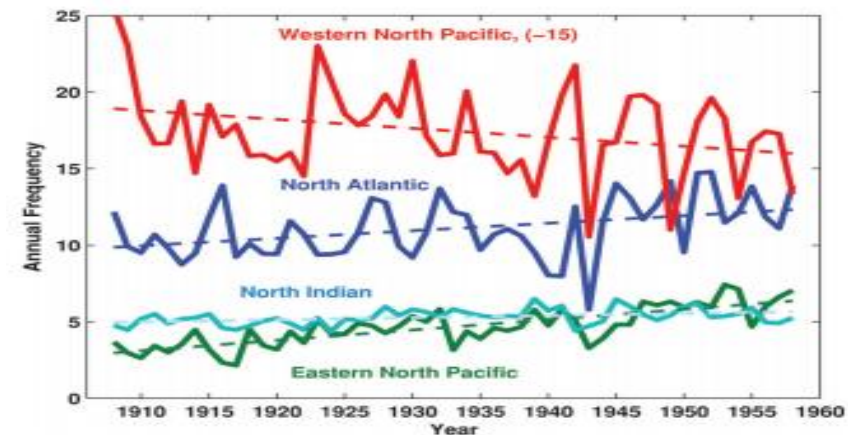
Από το σχεδιασμό στους τροπικούς κυκλώνες

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

- ✓ Υπολογισμός μέγιστης ταχύτητας ανέμου για την περίοδο επαναφοράς σχεδιασμού της κατασκευής (συνήθως 50 χρόνια).
- ✓ Ιδανικός σχεδιασμός αναφορικά με την ασφάλεια και την οικονομία.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΟΠΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝΩΝ

- Φαινόμενα ταχύτητας μεγαλύτερης των 35m/s στην κλίμακα Saffir-Simpson.
- Φαινόμενα με δύσκολη εκτίμηση της τάσης τους (Emanuel, 2010).





Περιεχόμενα

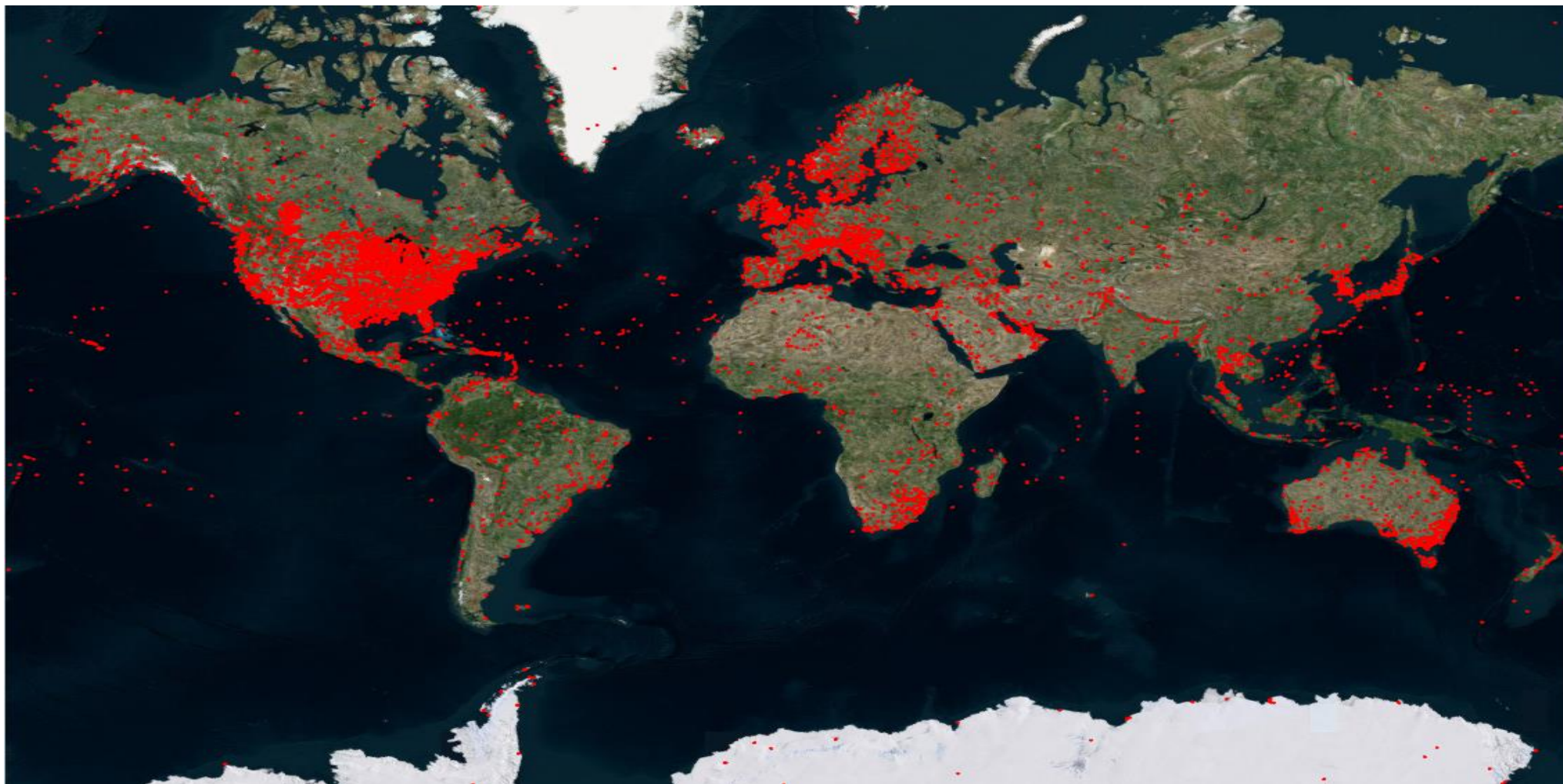
2.

Βάσεις δεδομένων



ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (1/3)

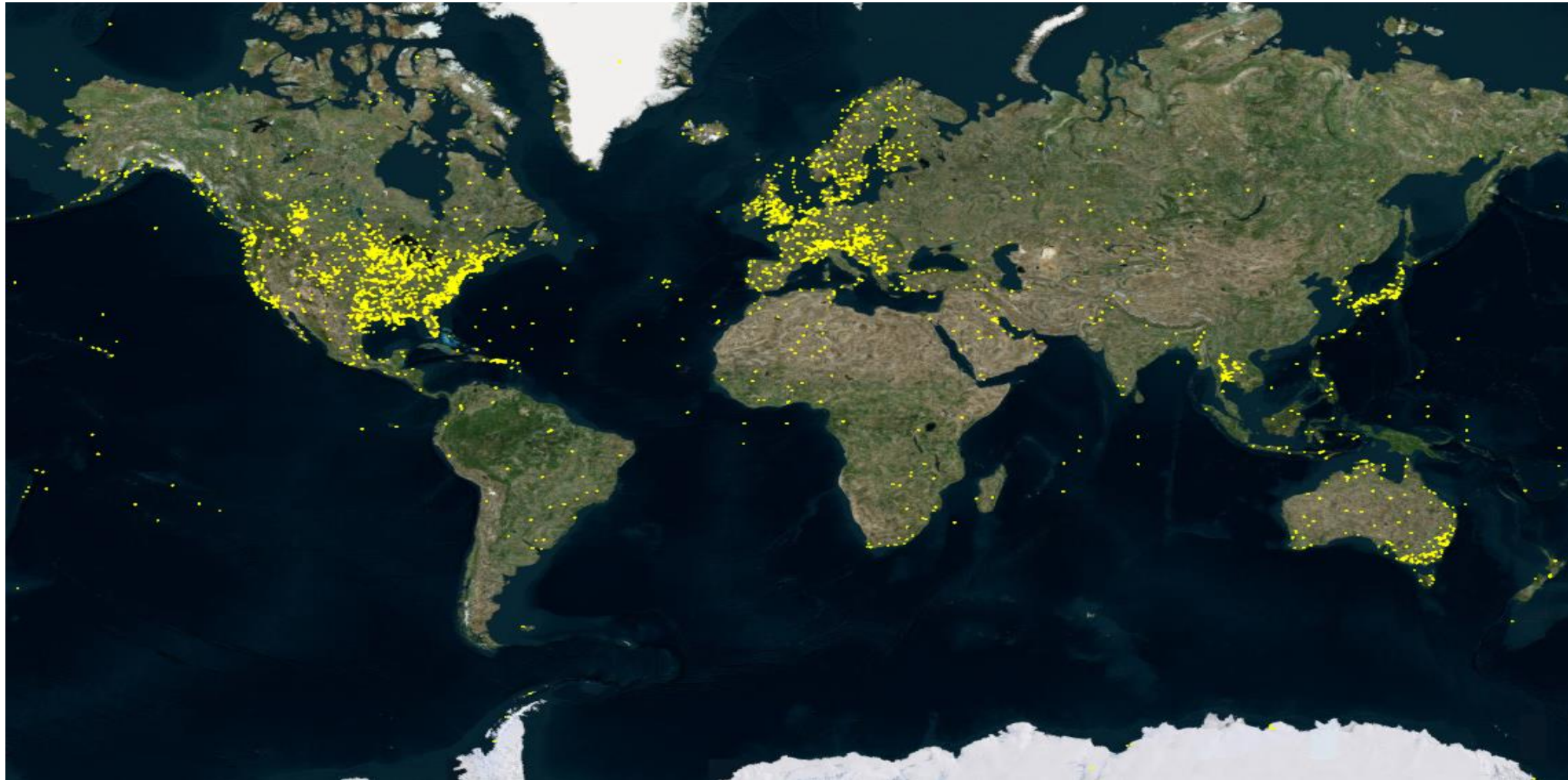
Συνολικοί Σταθμοί (7198)





ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (2/3)

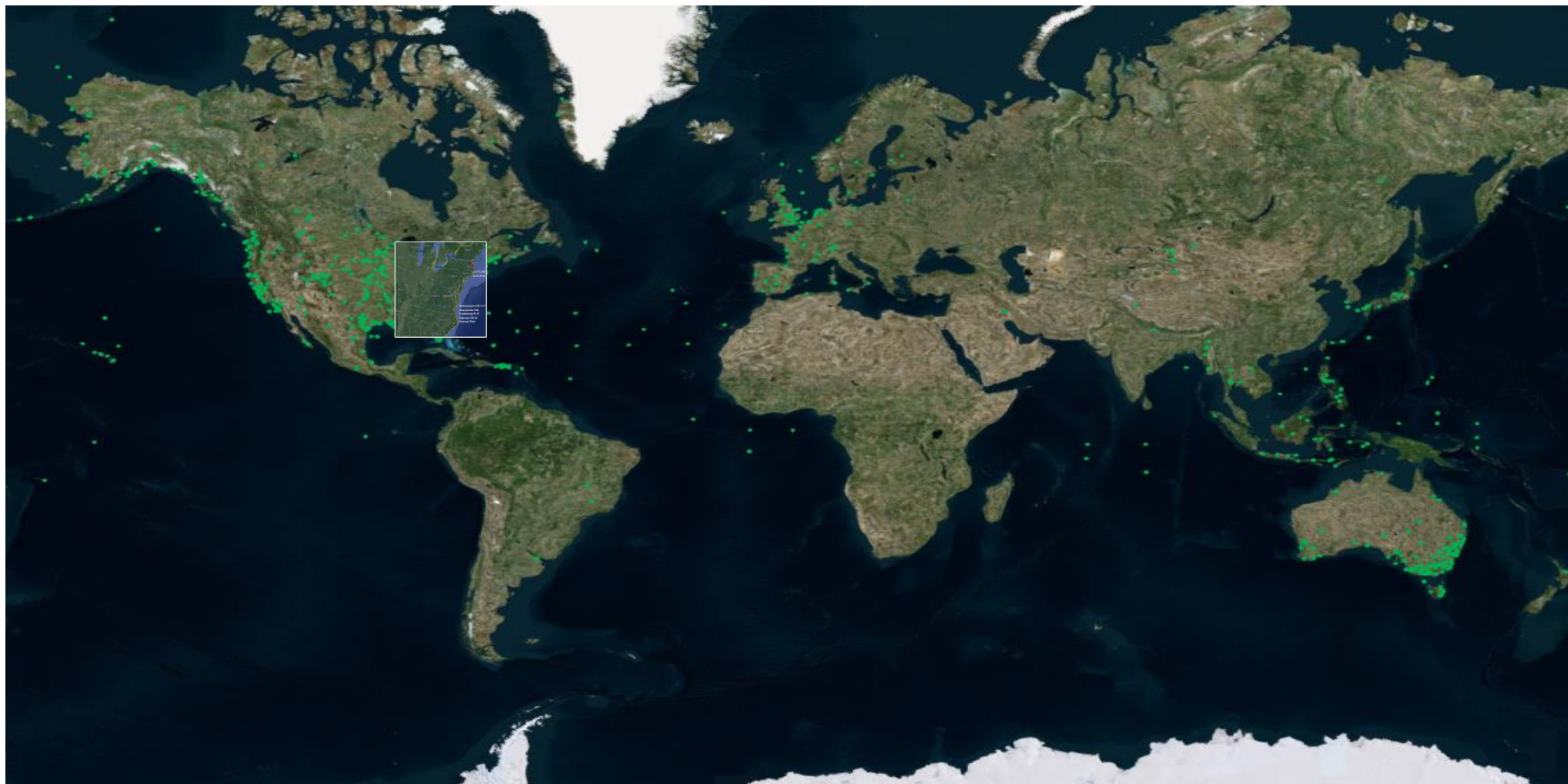
Σταθμοί μετά τον έλεγχο (2709)

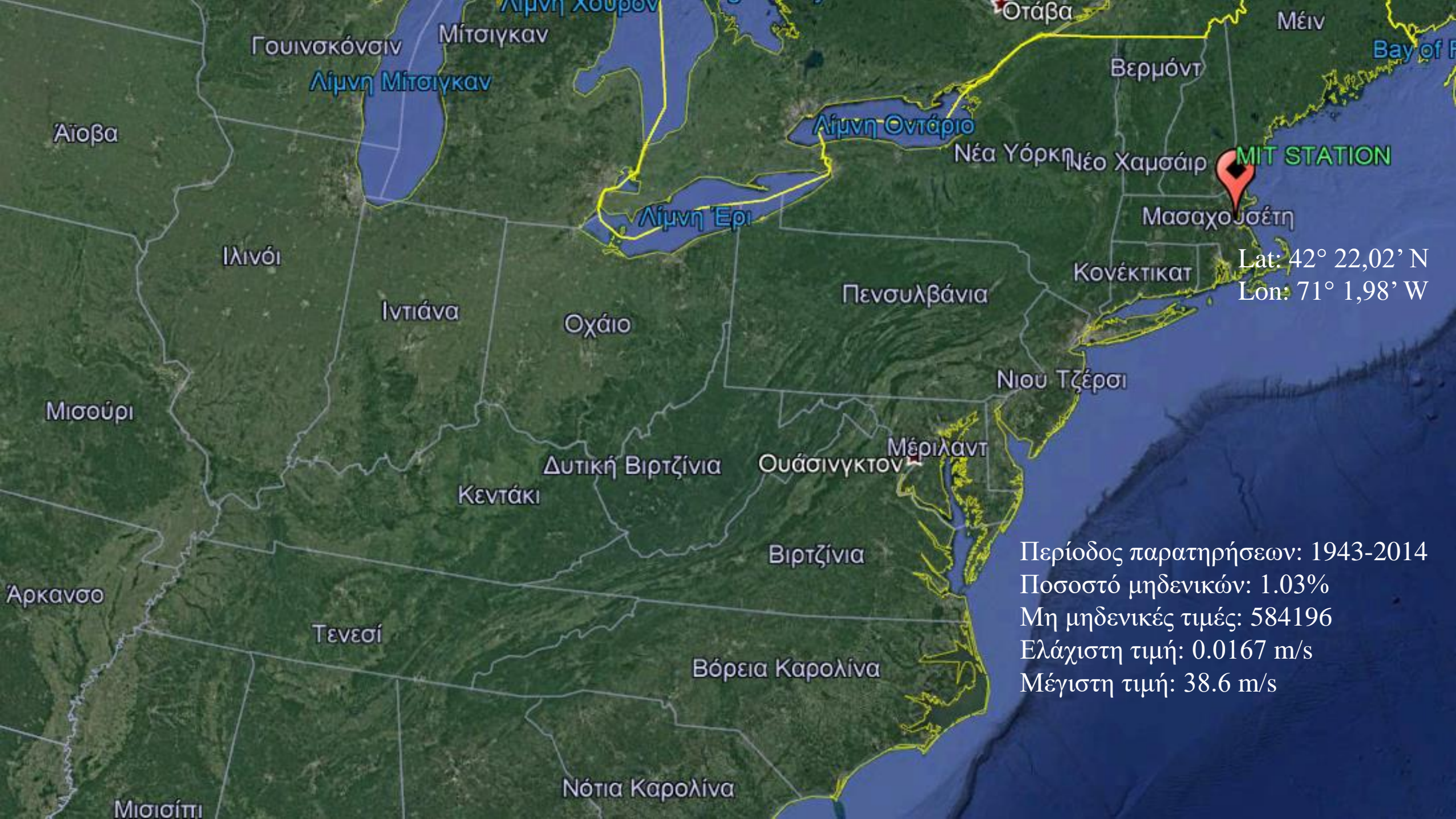




ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (3/3)

Σταθμοί με τουλάχιστον 30 έτη παρατηρήσεων (251)





MIT STATION

Lat: 42° 22,02' N
Lon: 71° 1,98' W

Περίοδος παρατηρήσεων: 1943-2014
Ποσοστό μηδενικών: 1.03%
Μη μηδενικές τιμές: 584196
Ελάχιστη τιμή: 0.0167 m/s
Μέγιστη τιμή: 38.6 m/s



Περιεχόμενα

3. Στατιστικά εργαλεία



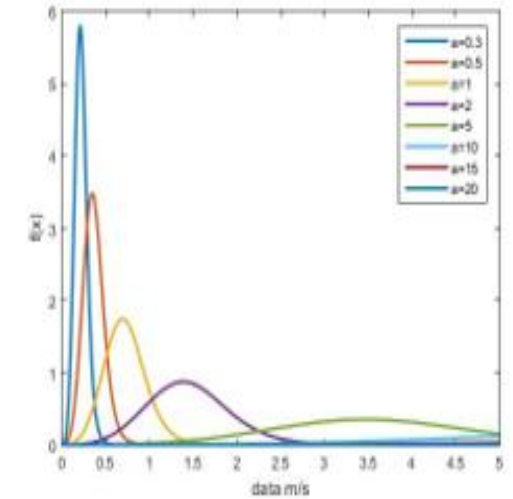
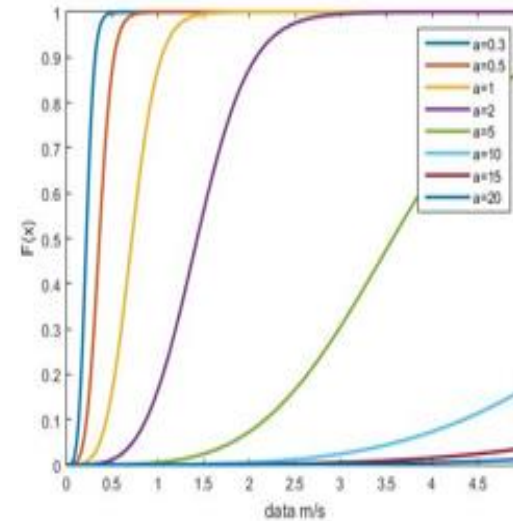
Κατανομές μελέτης (1/4)

Παρουσίαση CDF (Αθροιστικής Συνάρτησης Κατανομής) και PDF (Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας)

➤ Pareto Burr Feller (PBF)

$$\text{CDF: } F(x; a, c, k) = 1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^c\right)^k}$$

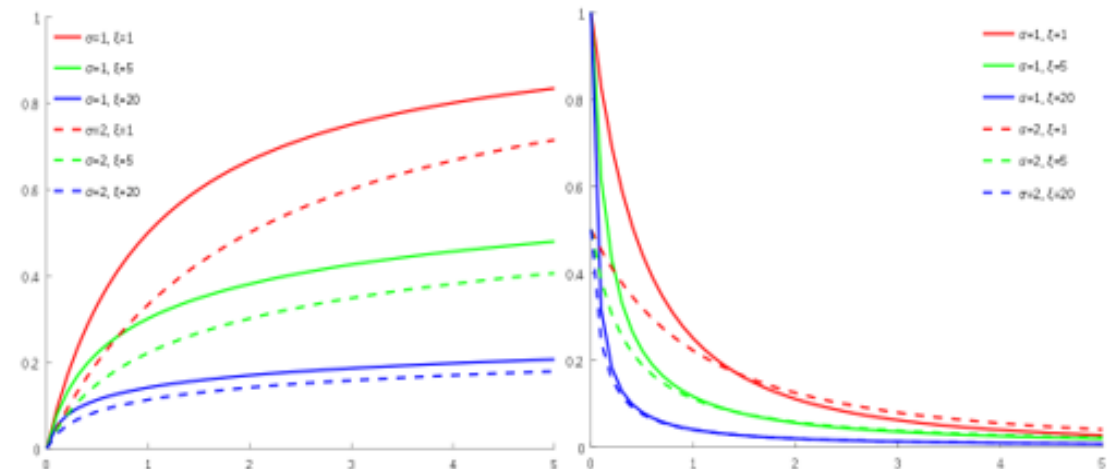
$$\text{PDF: } f(x; a, c, k) = \frac{\frac{kc}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{c-1}}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^c\right)^{k+1}}$$



➤ Γενικευμένη Pareto

$$\text{CDF: } F(x; \sigma, \xi) = 1 - \left(1 - \xi x / \sigma\right)^{1/\xi}$$

$$\text{PDF: } f(x; \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left(1 - \frac{\xi x}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\xi} - 1}$$





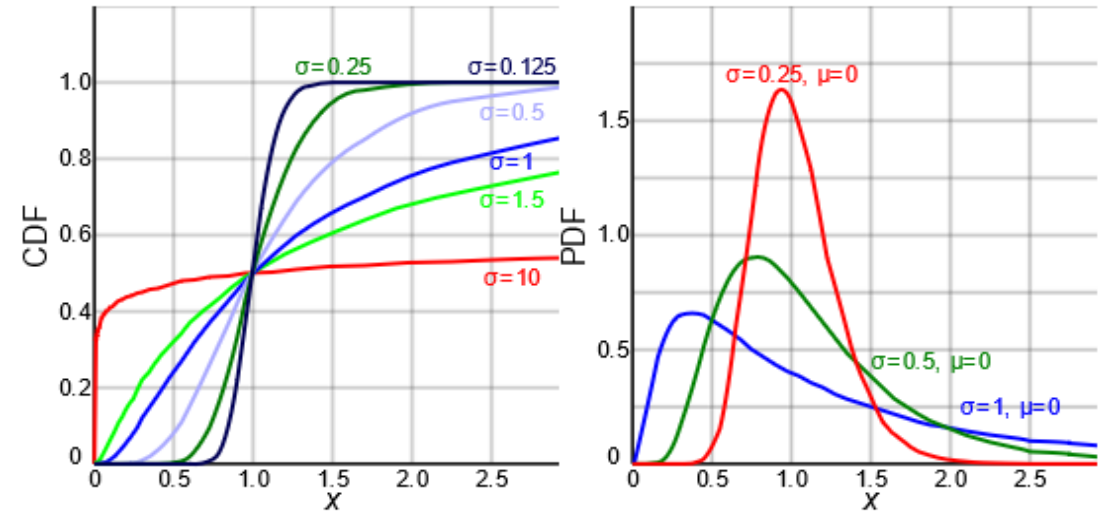
Κατανομές μελέτης (2/4)

Παρουσίαση CDF (Αθροιστικής Συνάρτησης Κατανομής) και PDF (Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας)

➤ Lognormal

$$\text{CDF: } F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

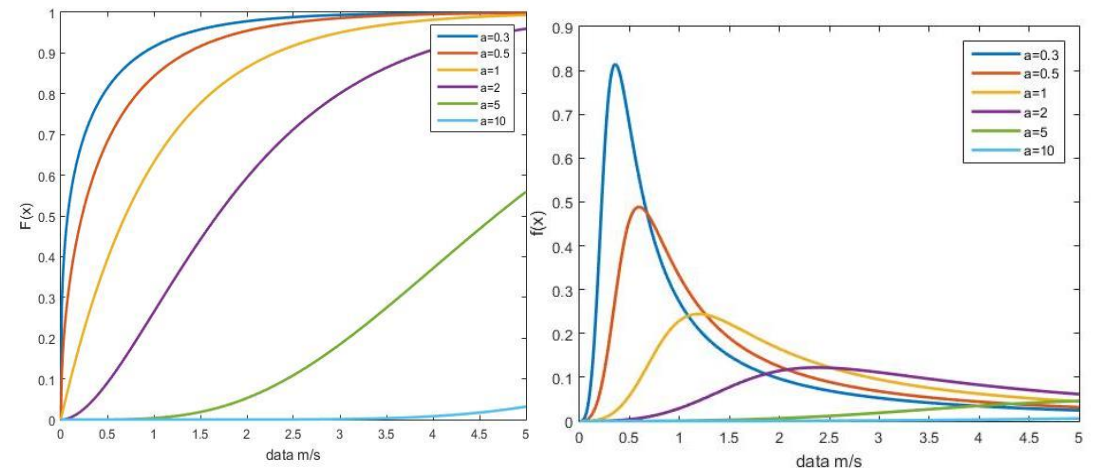
$$\text{PDF: } f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$



➤ Generalized Gamma

$$\text{CDF: } F(x; a, b, k) = \gamma\left(\frac{x}{b}\right)^k / \Gamma(a)$$

$$\text{PDF: } f(x; a, b, k) = kx^{a-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{b}\right)^k\right) / \left(b^{ka} \Gamma(a)\right)$$





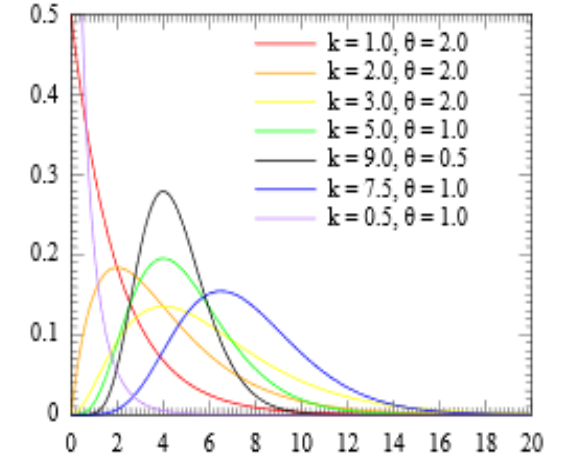
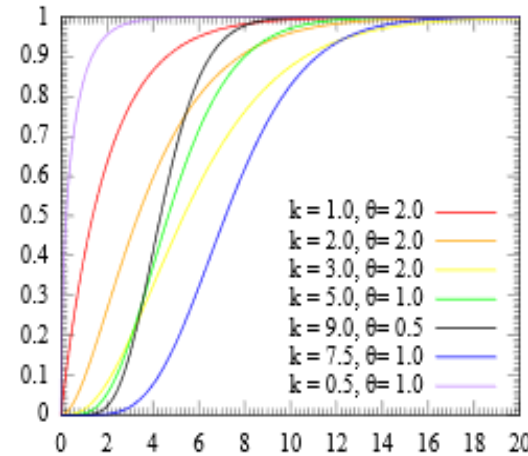
Κατανομές μελέτης (3/4)

Παρουσίαση CDF (Αθροιστικής Συνάρτησης Κατανομής) και PDF (Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας)

➤ Gamma

$$\text{CDF: } F(x; k, \theta) = \gamma(k, \theta, x) / \Gamma(k)$$

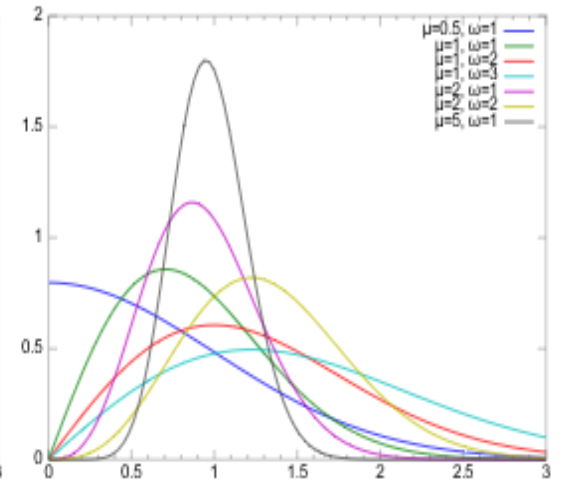
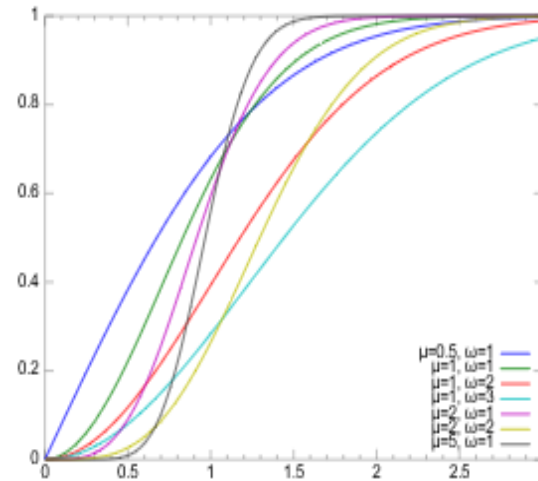
$$\text{PDF: } f(x; k, \theta) = \frac{\theta^k x^{k-1} e^{-\theta x}}{\Gamma(k)}$$



➤ Nakagami

$$\text{CDF: } F(x; m, \Omega) = 1 - \gamma(m, m x^2 / \Omega) / \Gamma(m)$$

$$\text{PDF: } f(x; m, \Omega) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} x^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}x^2}$$





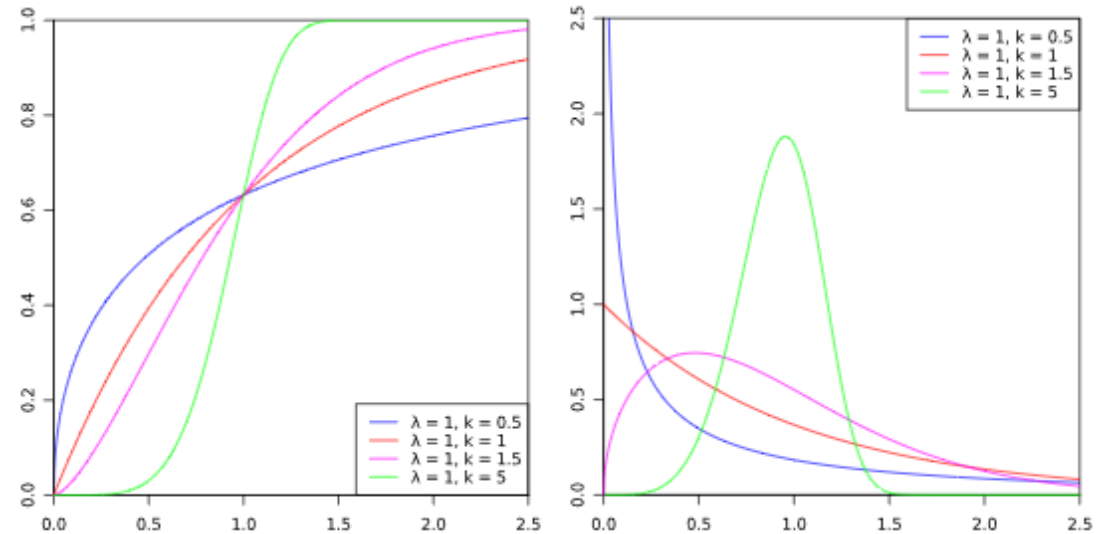
Κατανομές μελέτης (4/4)

Παρουσίαση CDF (Αθροιστικής Συνάρτησης Κατανομής) και PDF (Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας)

➤ Weibull

$$\text{CDF: } F(x; \alpha, b) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{b}\right)^\alpha\right)$$

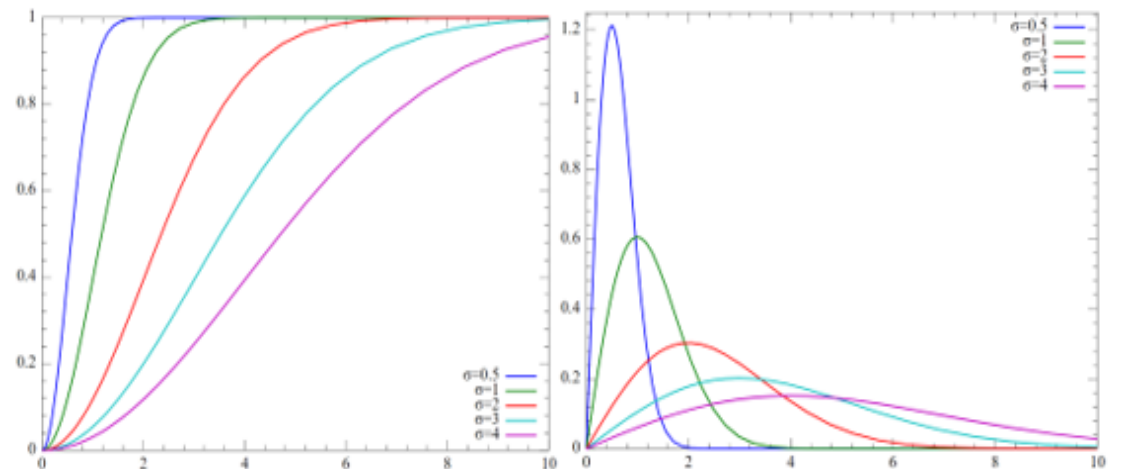
$$\text{PDF: } f(x; a, b) = \frac{a}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{a-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{b}\right)^a\right)$$



➤ Rayleigh

$$\text{CDF: } F(x; \sigma) = 1 - e^{-x^2/(2\sigma^2)}$$

$$\text{PDF: } f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}$$





Κ-ροπές (1/4)

Ορισμός και Αμερόληπτες Εκτιμήτριες

Μη κεντρικές Κ-ροπές

$$K'_{\rho q} := (p - q + 1)E \left[\left(F(\underline{x}) \right)^{p-q} \underline{x}^q \right], \quad p \geq q$$

Αμερόληπτη Εκτιμήτρια

$$\hat{K}'_{\rho q} = \frac{p - q + 1}{n} \sum_{i=1}^n \left(F(\underline{x}_{(i:n)}) \right)^{p-q} \underline{x}_{(i:n)}^q, \quad p \geq q$$

Όπου:

$\underline{x}_{(i:n)}$: το i στοιχείο ενός δείγματος \underline{x} με μήκος n , διατεταγμένο σε αύξουσα σειρά



Κ-ροπές (2/4)

Αμερόληπτες Εκτιμήτριες

Αμερόληπτη Εκτιμήτρια (με ιδιότητα των order statistics)

$$\hat{K}'_{pq} = \sum_{i=1}^n b_{i,n,p-q+1} x_{(i:n)}^q$$

Όπου:

$$b_{inp} = \begin{cases} 0, & i < p \\ \frac{p}{n} \frac{\Gamma(n-p+1)}{\Gamma(n)} \frac{\Gamma(i)}{\Gamma(i-p+1)}, & i \geq p \geq 0 \end{cases}$$



Κ-ροπές (3/4)

Περίοδοι Επαναφοράς

Περίοδος Επαναφοράς Κ-ροπών

$$\frac{T(K'_{p1})}{D} = \Lambda_p p$$

Όπου:

D : η χρονική αναφορά για τη συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς

Λ_p : συντελεστής που σχετίζεται με την τιμή της τάξης p και την κατανομή που χρησιμοποιείται.

Μία ικανοποιητική προσέγγιση:

$$\frac{T(K'_p)}{D} = \Lambda_p p \approx \Lambda_\infty p + (\Lambda_1 - \Lambda_\infty)$$

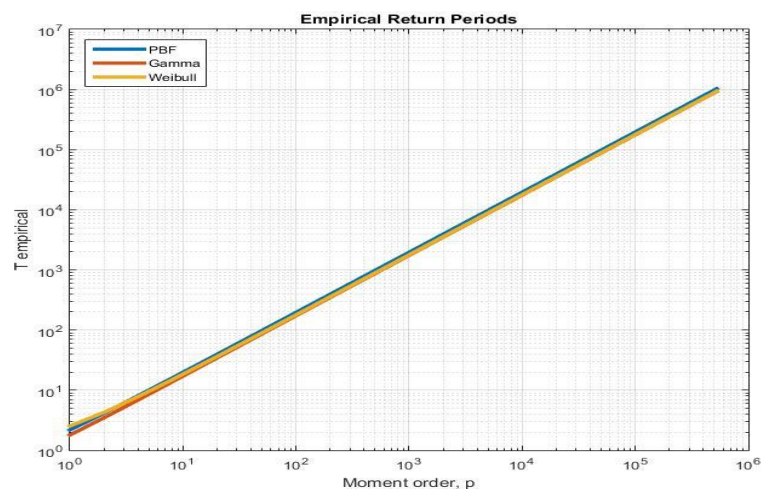


Κ-ροπές (4/4)

Περίοδοι Επαναφοράς

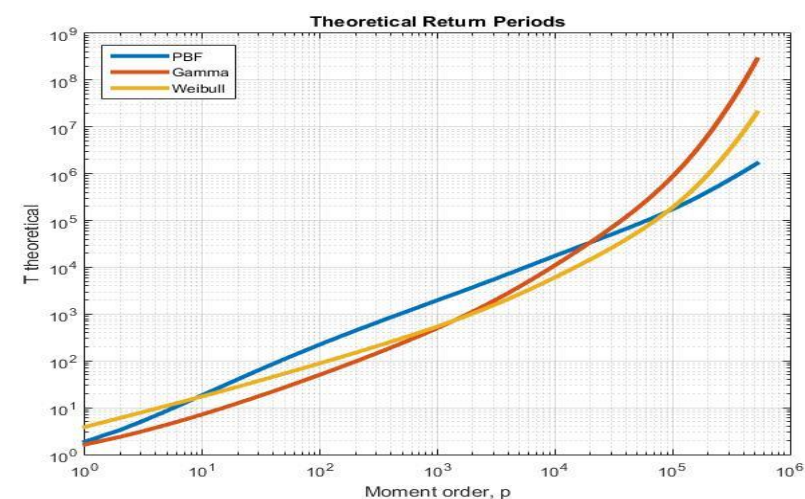
ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ

$$\frac{\hat{T}(\hat{K}'_p)}{D} = \Lambda_p p$$



ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ

$$\frac{T(\hat{K}'_p)}{D} = \frac{1}{1 - F(\hat{K}'_p)}$$



ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ!!



Δείκτες Αξιολόγησης

Οι 4 δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των κατανομών

Mean Square Error (MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{theor} - X_{obs})^2}{n}$$

Λαμβάνει τιμές >0 , με την τιμή 0 να δείχνει την απόλυτη αντιστοίχιση του μοντέλου με τις παρατηρήσεις.

Root Mean Square Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{theor} - X_{obs})^2}{n}}$$

Λαμβάνει τιμές >0 , με την τιμή 0 να δείχνει την απόλυτη αντιστοίχιση του μοντέλου με τις παρατηρήσεις.

Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{obs,max} - X_{obs,min}}$$

Στη μελέτη μας χρησιμοποιείται ως, $1 - NRMSE$, δεχόμενο τιμές $-\infty < 1 - NRMSE < 1$. Με το 1 να δείχνει την άριστη σύγκλιση.

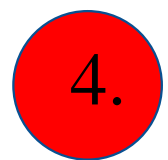
Nash Sutcliffe Efficiency (NSE)

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}$$

Λαμβάνει τιμές από $-\infty$ μέχρι 1 με την τιμή του 1 να δείχνει την απόλυτη αντιστοίχιση του μοντέλου με τις παρατηρούμενες τιμές.



Περιεχόμενα

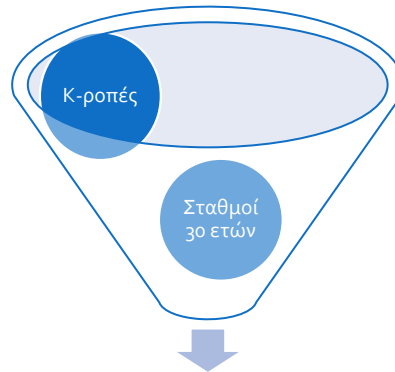


Αποτελέσματα

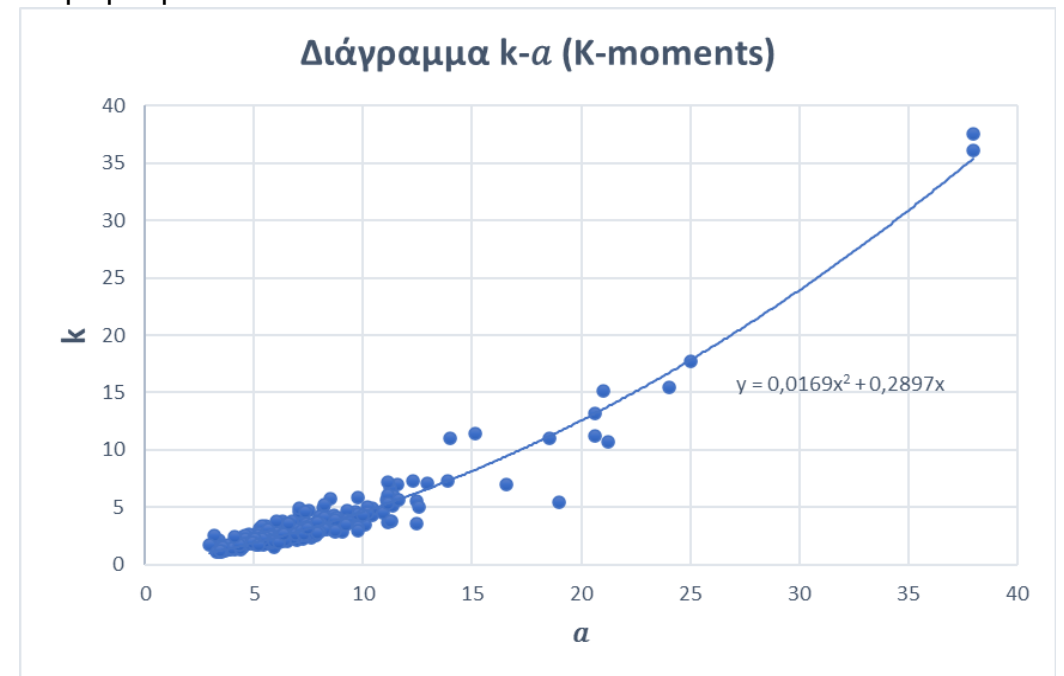
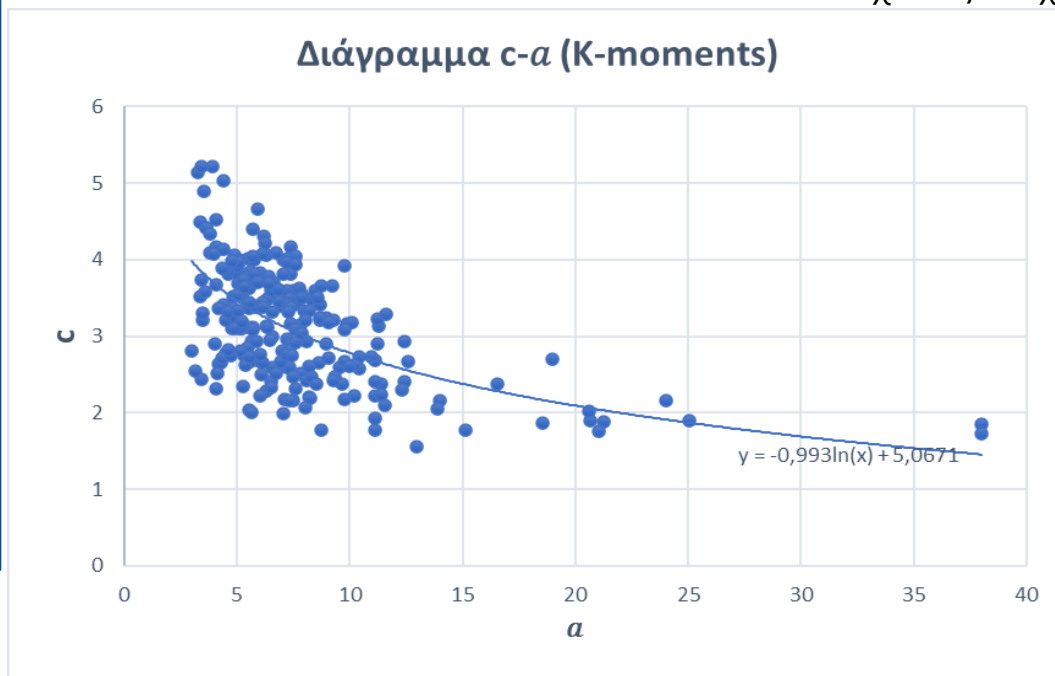


ΡΒF με 1 ελεύθερη παράμετρο (1/2)

Δημιουργία της κατανομής



Σχέσεις Συσχετίσεων των παραμέτρων





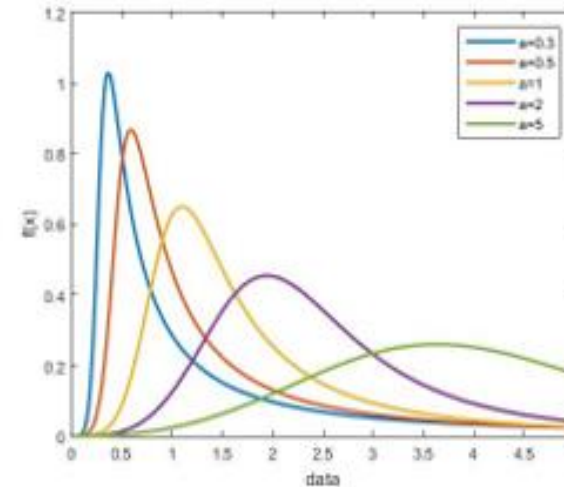
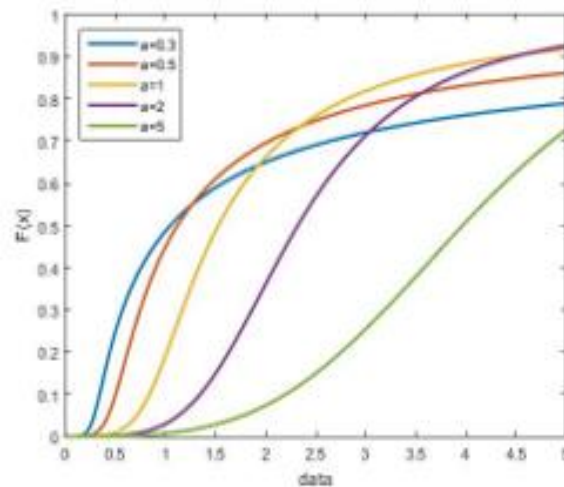
PBF με 1 ελεύθερη παράμετρο (2/2)

Παρουσίαση CDF (Αθροιστικής Συνάρτησης Κατανομής) και PDF (Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας)

➤ PBF με 1 ελεύθερη παράμετρο

$$\text{CDF: } F(x; a) = 1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^{-0.9993 \ln(a) + 5.0671}\right)^{0.0169a^2 + 0.2897a}}$$

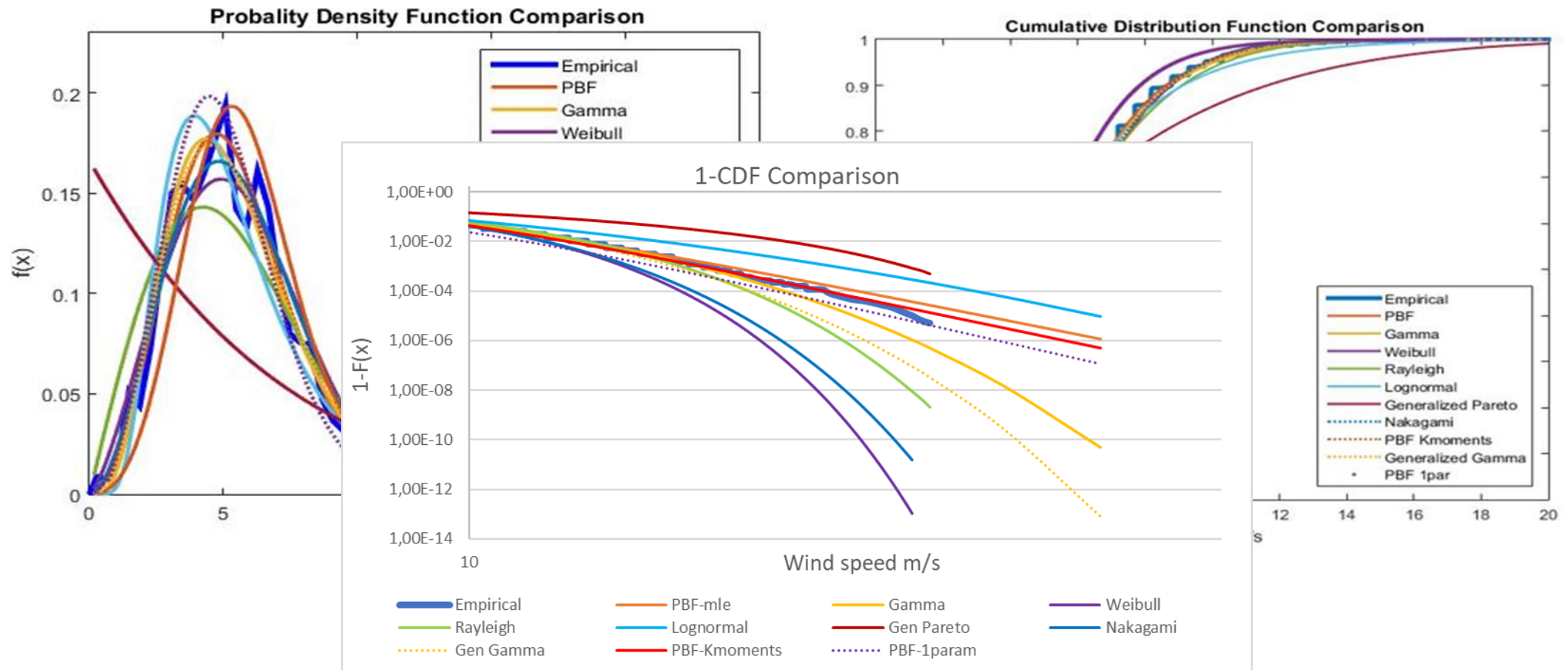
$$\text{PDF: } f(x; a) = \frac{(0.0169a^2 + 0.2897a)(-0.9993 \ln(a) + 5.0671) \left(\frac{x}{a}\right)^{-0.9993 \ln(a) + 4.0671}}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^{-0.9993 \ln(a) + 5.0671}\right)^{0.0169a^2 + 0.2897a + 1}}$$





Αποτελέσματα σταθμού MIT(1/3)

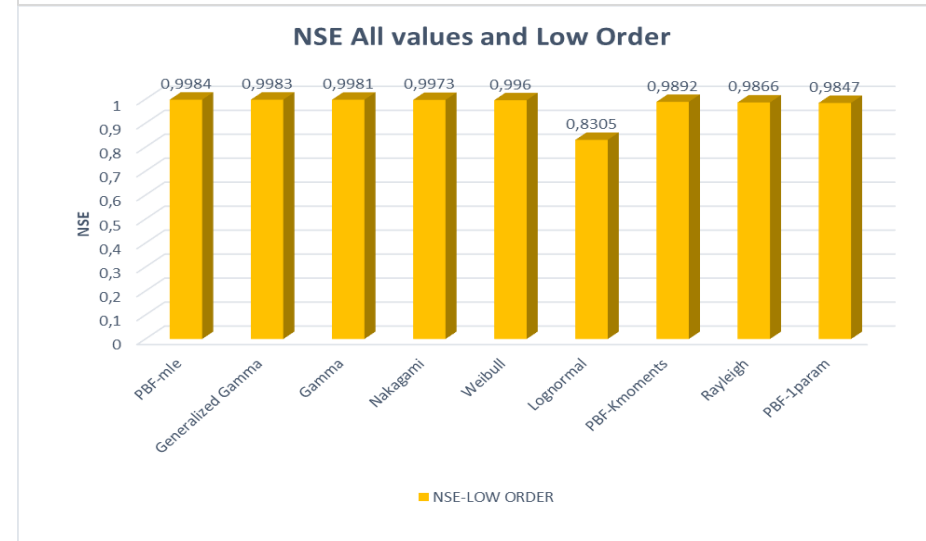
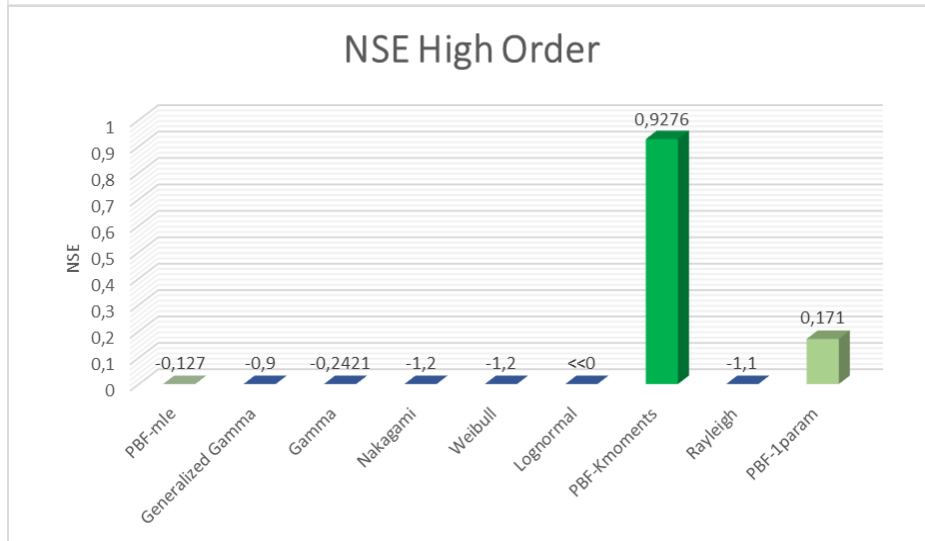
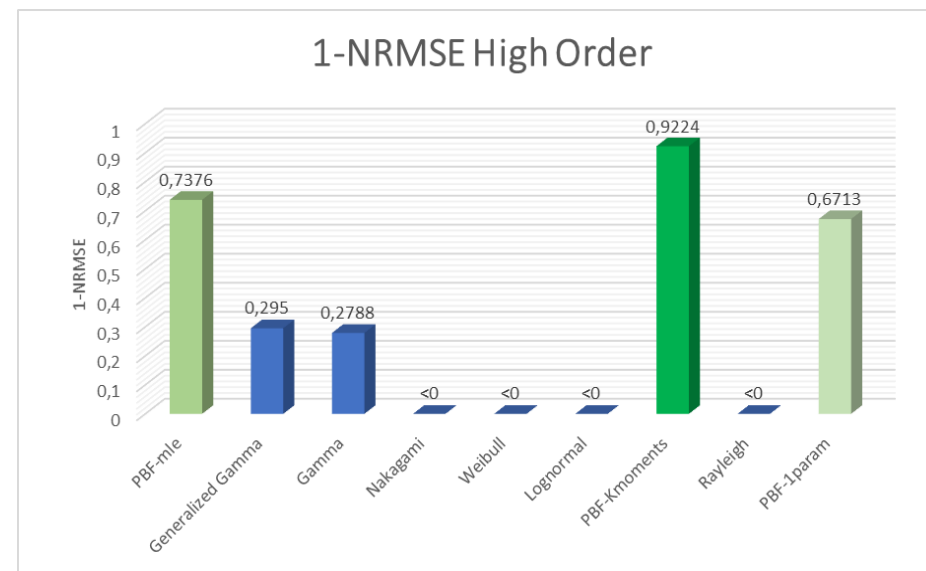
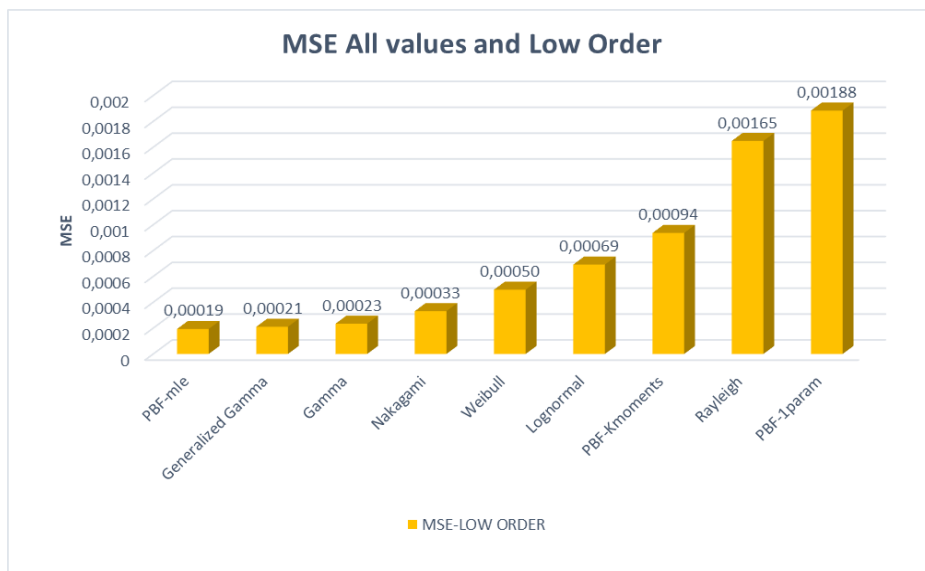
Γραφική αναπαράσταση κατανομών





Αποτελέσματα σταθμού MIT(2/3)

Δείκτες αξιολόγησης





Αποτελέσματα σταθμού ΜΙΤ(3/3)

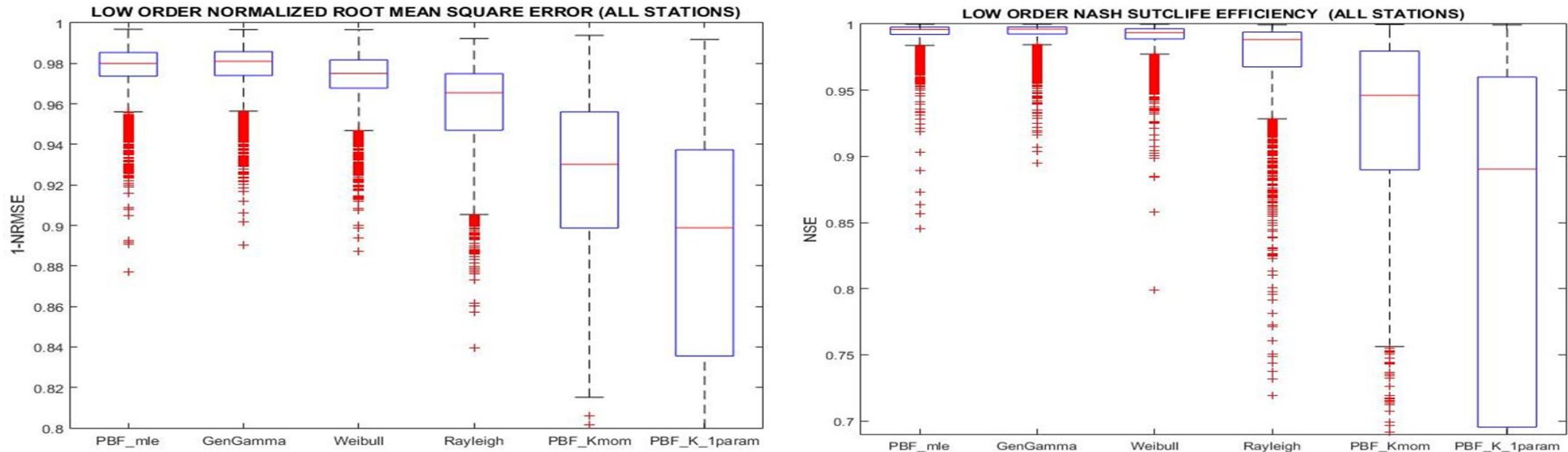
Γραφική αναπαράσταση κατανομών





Αποτελέσματα σε παγκόσμια κλίμακα (1/5)

Μελέτη στο σώμα της κατανομής



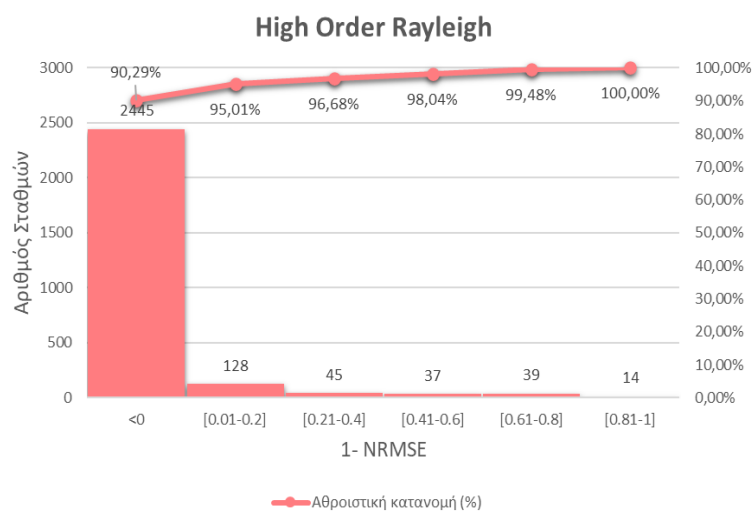
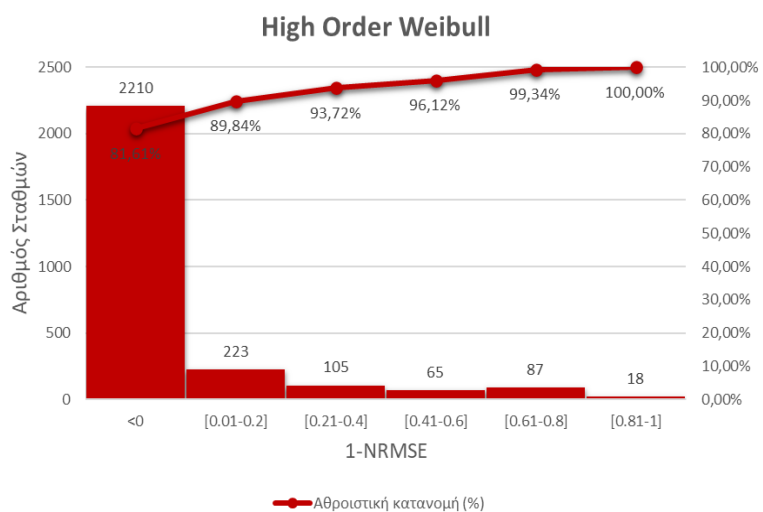
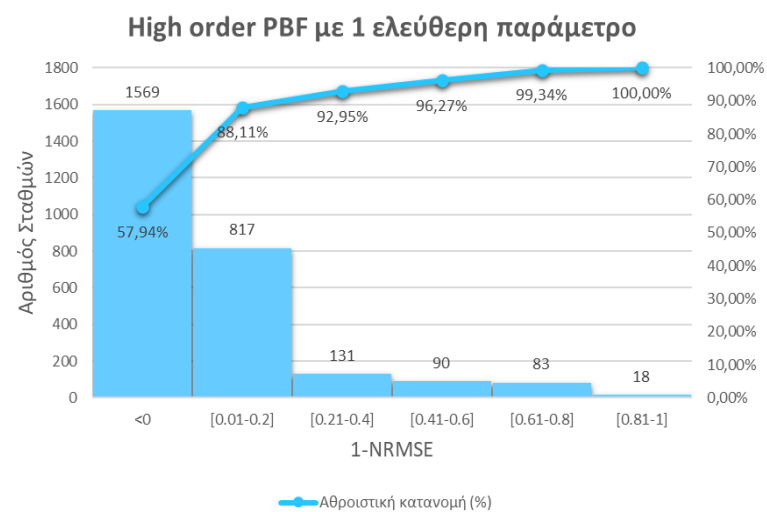
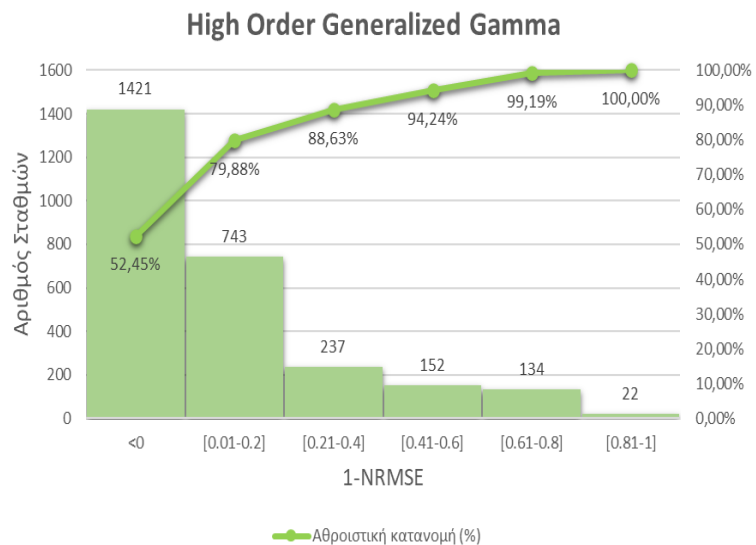
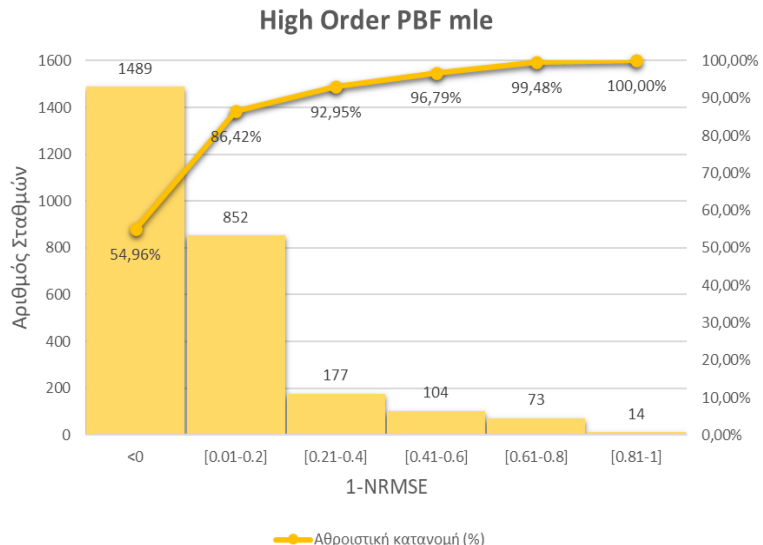
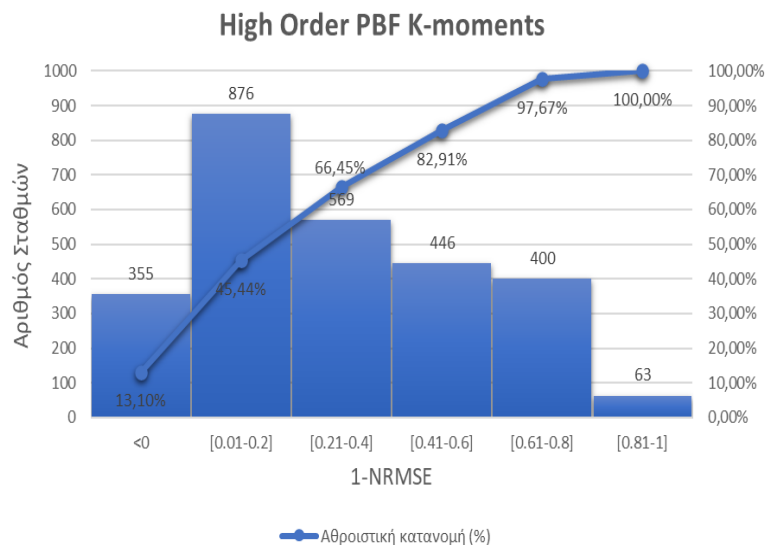
Οι κατανομές PBF και Generalized Gamma με παραμέτρους από μέγιστη πιθανοφάνεια παρουσιάζουν τα μικρότερα σφάλματα ($4 \cdot 10^{-4}$) στο MSE. Τα μεγαλύτερα σφάλματα παρουσιάζουν οι κατανομές με K-ροπές αλλά είναι πολύ μικρά με τη **διαφορά σφάλματος της PBF με μία ελεύθερη παράμετρο με την Weibull να είναι μόνο $5 \cdot 10^{-3}$ για το MSE !!!**

Τα ίδια ευρήματα και για τους δείκτες 1-NRMSE και NSE. **Με την PBF με μία ελεύθερη παράμετρο να παρουσιάζει την ίδια τιμή ≈ 0.9 στους δύο δείκτες, που για το δείκτη NSE σημαίνει άριστη σύγκλιση με τα δεδομένα, αφού είναι >0.75 (Moriassi et al, 2007).**



Αποτελέσματα σε παγκόσμια κλίμακα (2/5)

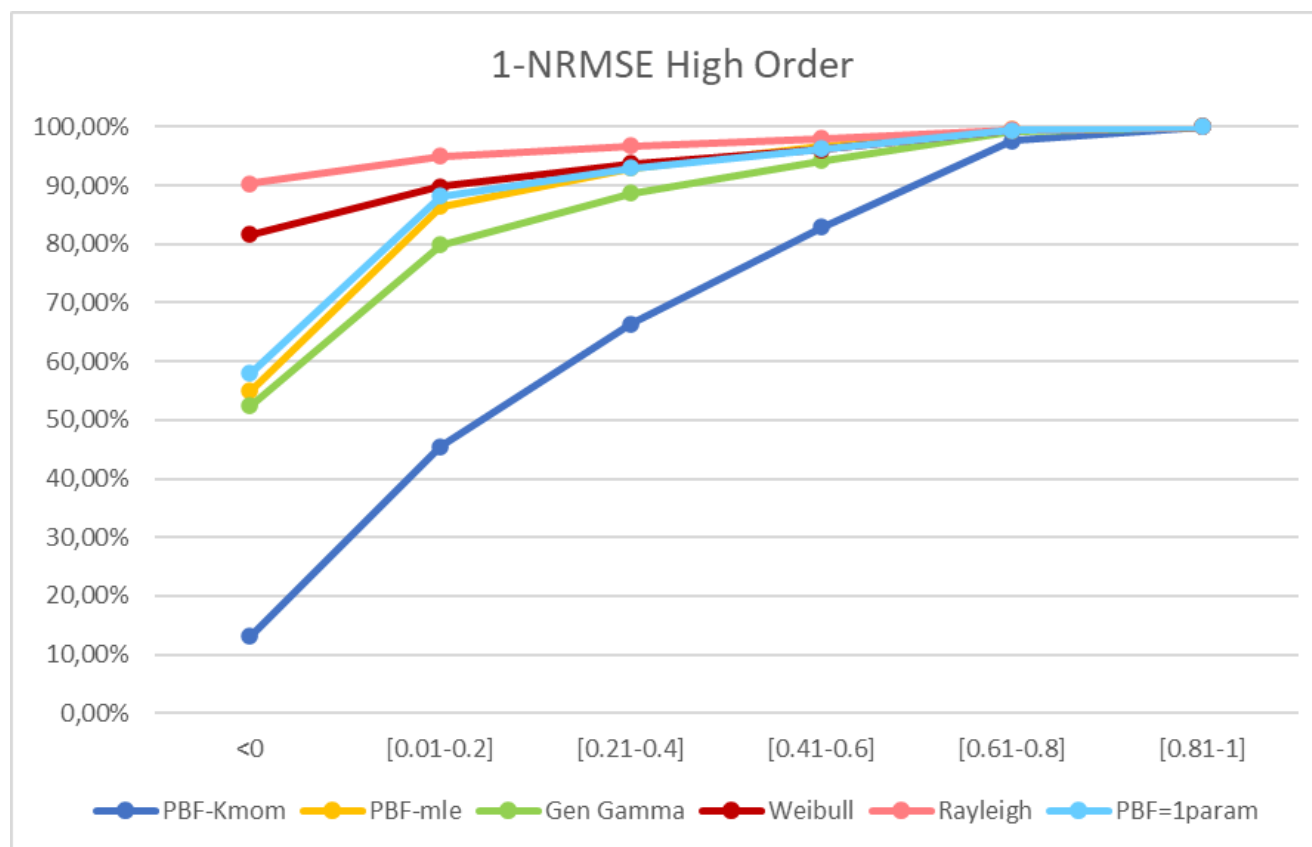
Μελέτη ακραίων τιμών





Αποτελέσματα σε παγκόσμια κλίμακα (3/5)

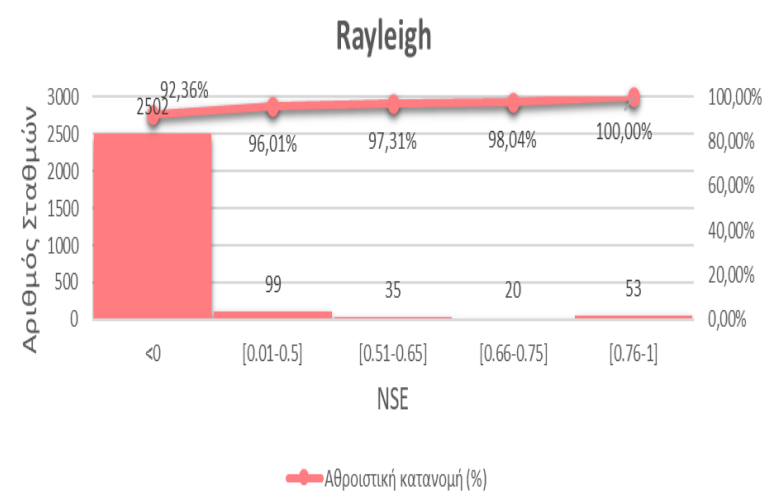
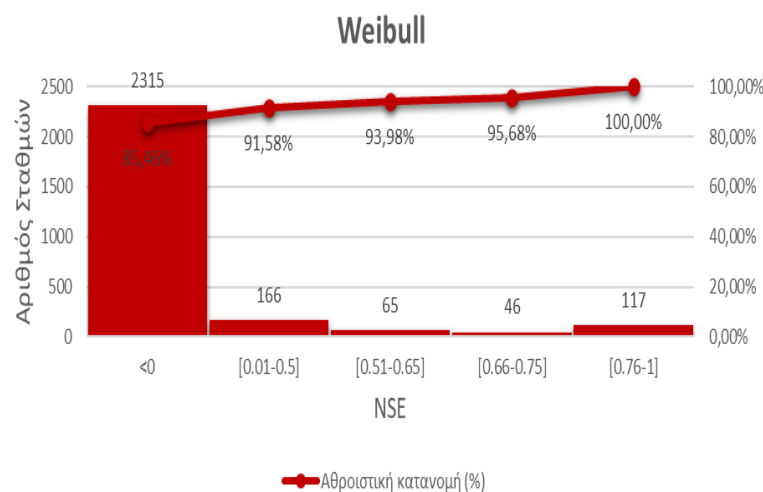
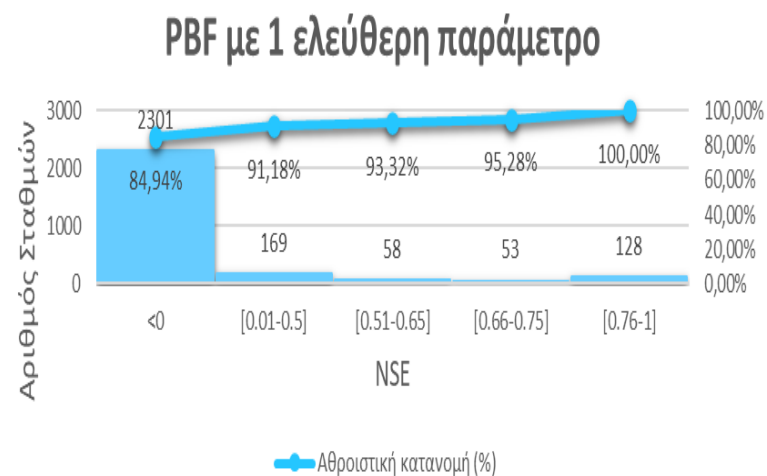
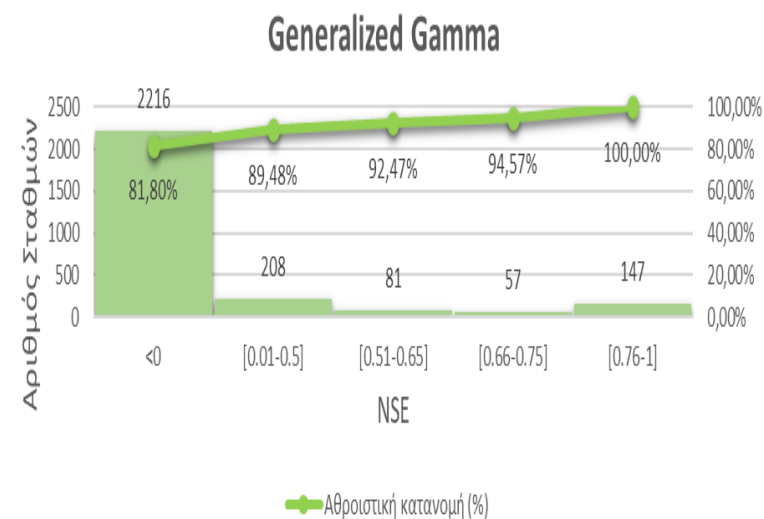
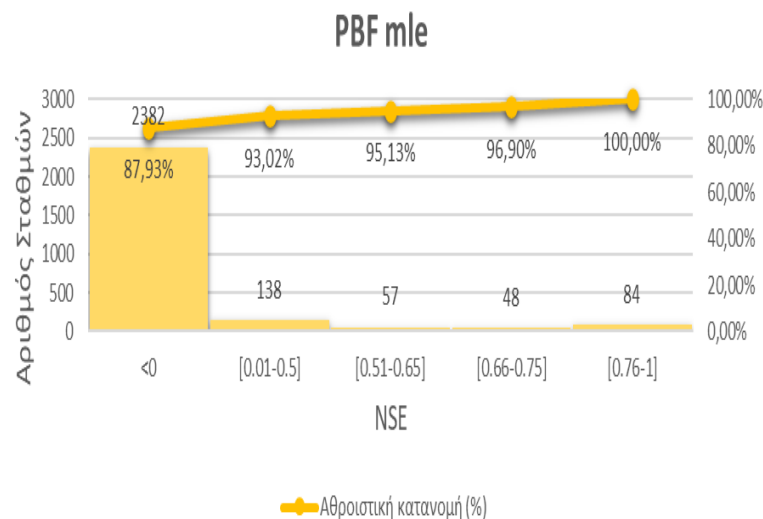
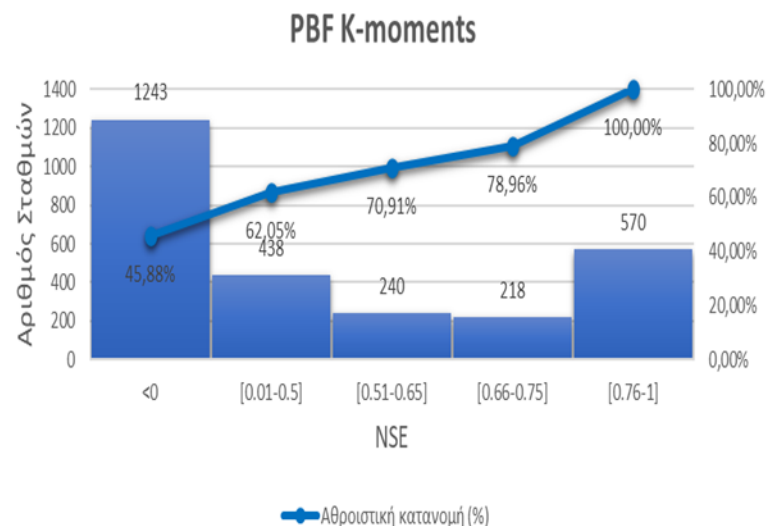
Μελέτη ακραίων τιμών





Αποτελέσματα σε παγκόσμια κλίμακα (4/5)

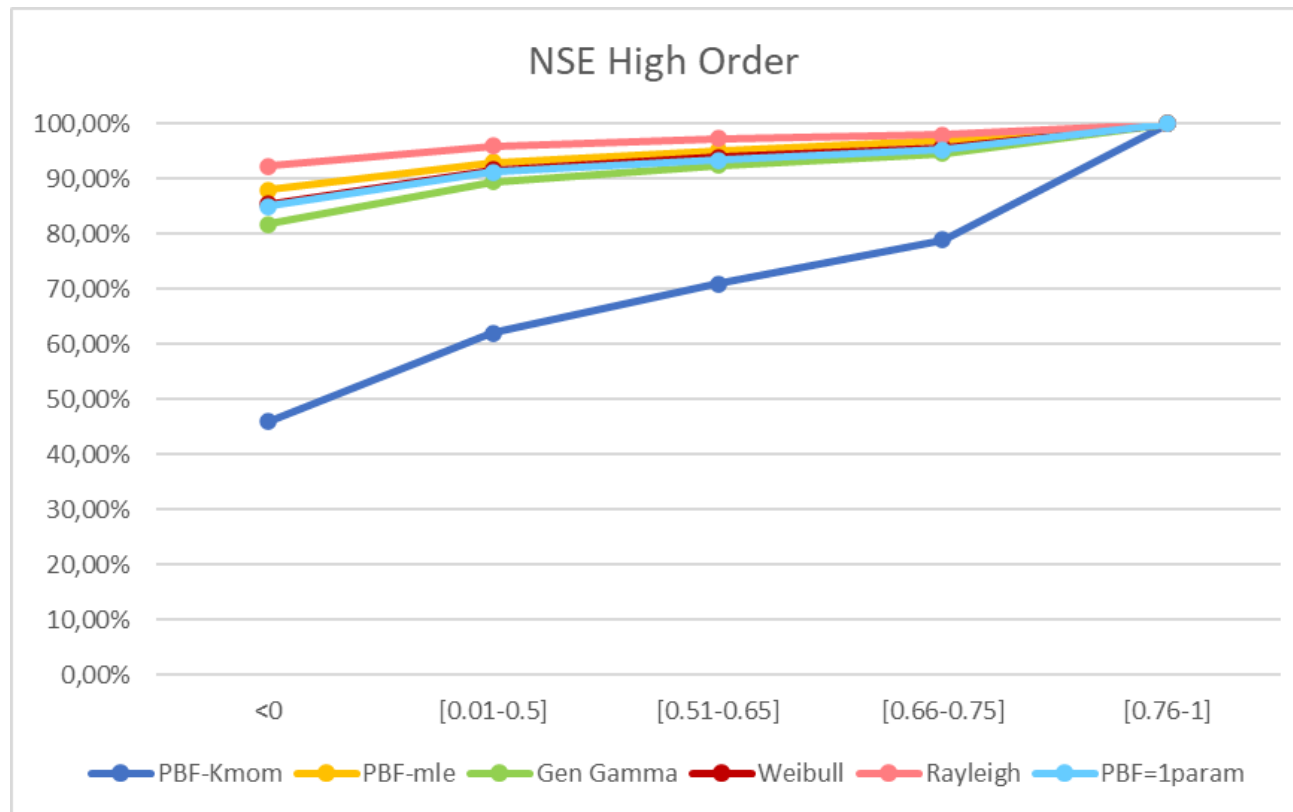
Μελέτη ακραίων τιμών





Αποτελέσματα σε παγκόσμια κλίμακα (5/5)

Μελέτη ακραίων τιμών





Περιεχόμενα

5.

Εφαρμογή ανεμογεννητριών



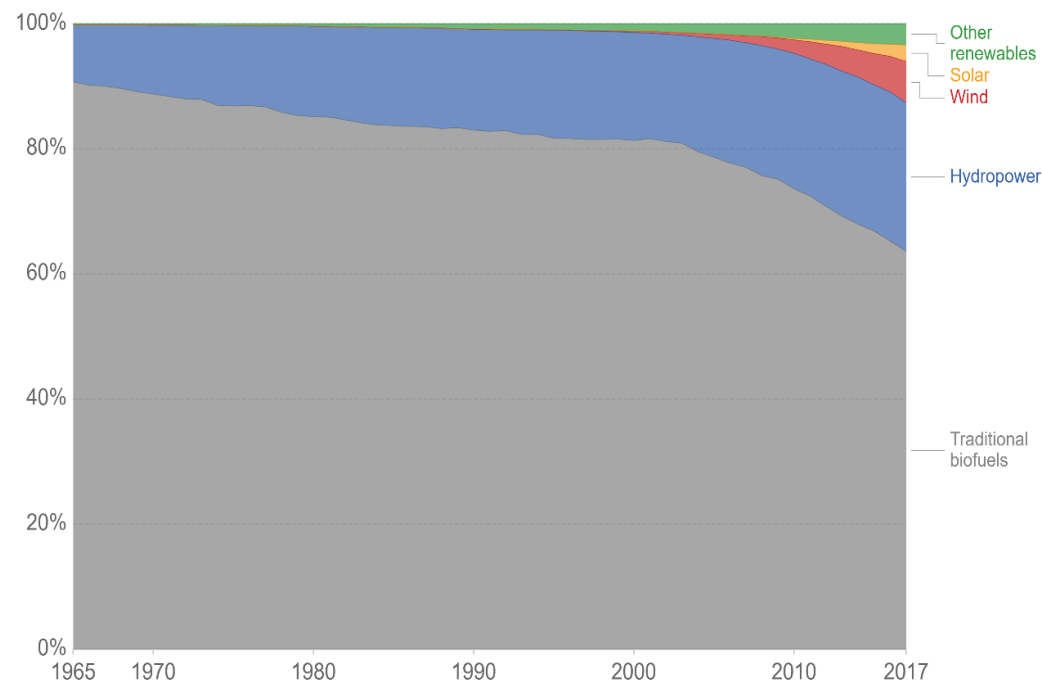
Γενικά στοιχεία

Παγκόσμια στοιχεία

Global renewable energy consumption, World, 1800 to 2018

Renewable energy consumption measured in terawatt-hours (TWh) per year. Traditional biofuels refer to the consumption of fuelwood, forestry products, animal and agricultural wastes.

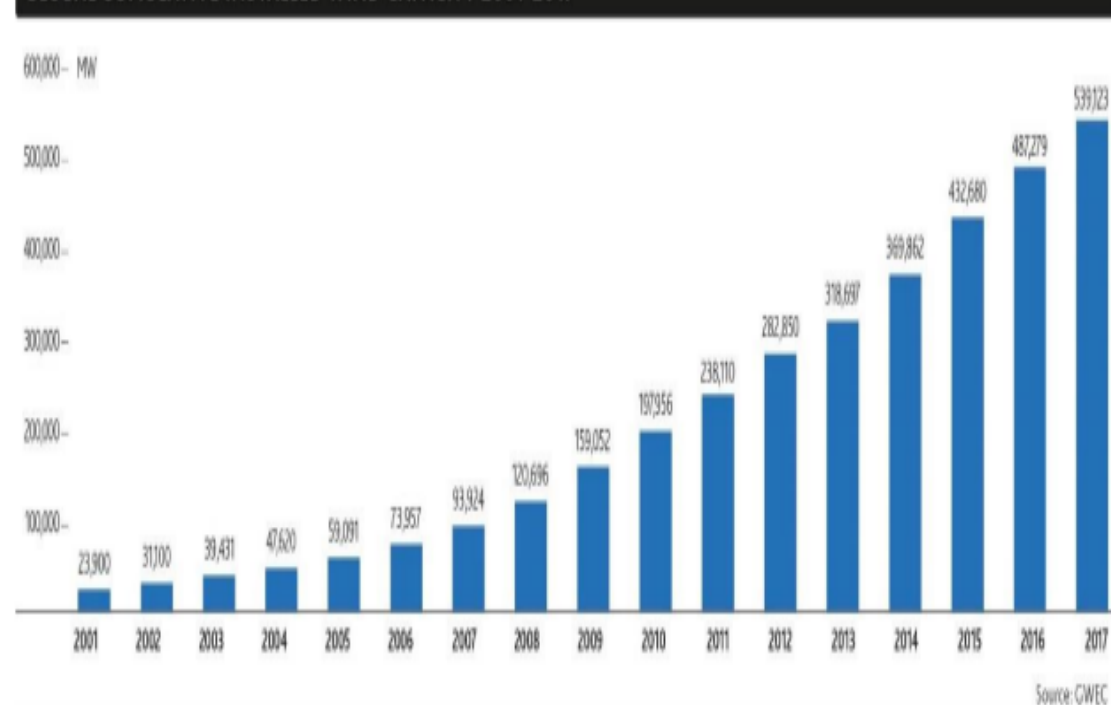
Our World
in Data



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of Global Energy (2019)

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017



Source: GWEC



Ενεργειακή μελέτη(1/3)

Θεωρητικό υπόβαθρο

$$V(z_2) = V(z_1) \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}$$

Όπου:

$V(z_2)$: η ταχύτητα ανέμου στο ύψος z_2

$V(z_1)$: η ταχύτητα ανέμου στο ύψος αναφοράς z_1

z_0 : παράμετρος τραχύτητας

$z_1=10\text{m}$

Επιλέχθηκε $z_2=135\text{m}$

$$V(135) = V(z_1) \frac{\ln\left(\frac{135}{0.1}\right)}{\ln\left(\frac{10}{0.1}\right)} = 1.565V(z_1)$$

ΦΥΣΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΤΙΜΗ z_0
Πάγος	0.001
Ασφαλτοστρωμένη επιφάνεια	0.002
Υδάτινη επιφάνεια	0.01-0.06
Χλόη ύψους μέχρι 1cm	0.1
Χλόη ύψους 1-10cm	0.1-0.2
Χλόη-σιτηρά κλπ ύψους 1-10cm	2-5
Φυτοκάλυψη ύψους 1-2m	20
Δένδρα ύψους 10-15m	40-70



$$P = \frac{1}{2} C_P \rho A (V)^3$$

Όπου:

C_P : ο συντελεστής απόδοσης

ρ : 1.225 kg/m³ η πυκνότητα του αέρα

A : επιφάνεια αναφοράς (m²)

V : ταχύτητα ανέμου (m/s)



Ενεργειακή μελέτη (2/3)

Τύποι ανεμογεννητριών

Enercon E-138 EP3

- Ανεμολογική κλάση: IIIa (IEC 61400-1)
- Εγκατεστημένη ισχύς: 3MW
- Διάμετρος πτερωτής: 138m
- Cut in speed: 3m/s
- Cut out speed: 25 m/s

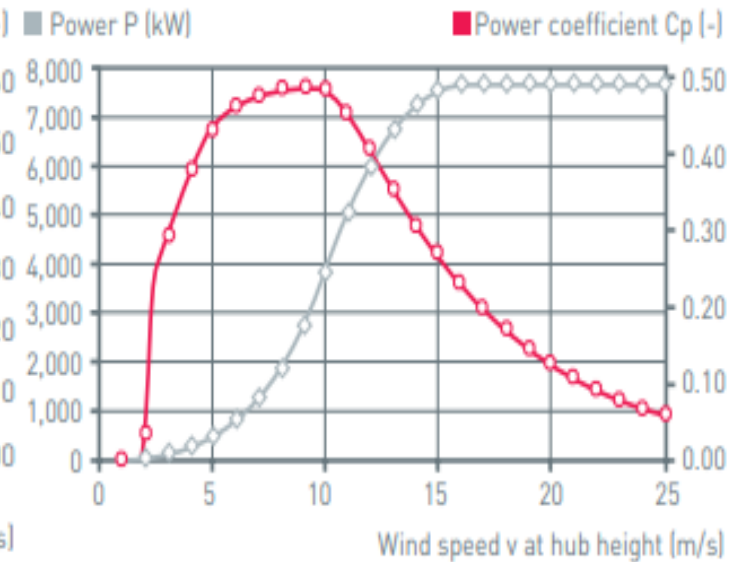
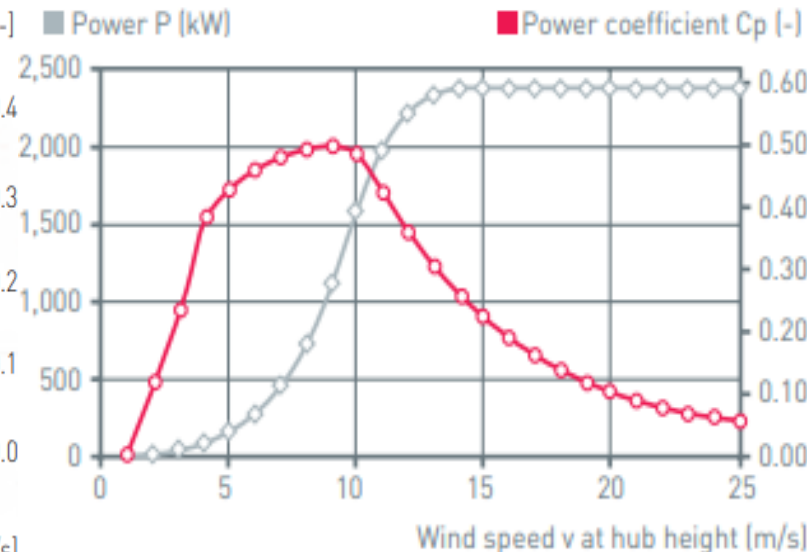
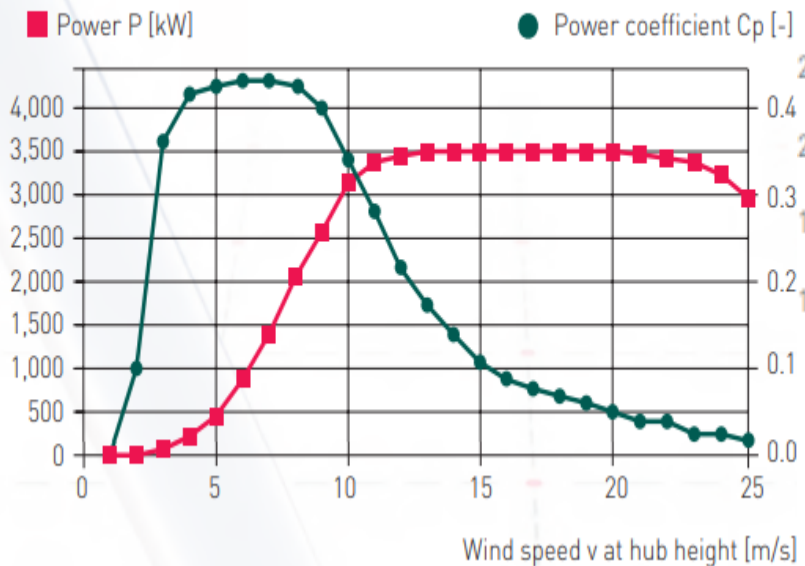
Enercon E-82 E4

- Ανεμολογική κλάση: IIa
- Εγκατεστημένη ισχύς: 2.35MW
- Διάμετρος πτερωτής: 82m
- Cut in speed: 3m/s
- Cut out speed: 30 m/s

Enercon E-126

- Ανεμολογική κλάση: Ia
- Εγκατεστημένη ισχύς: 7.58MW
- Διάμετρος πτερωτής: 126m
- Cut in speed: 3m/s
- Cut out speed: 34 m/s

E-138 EP3 power curve

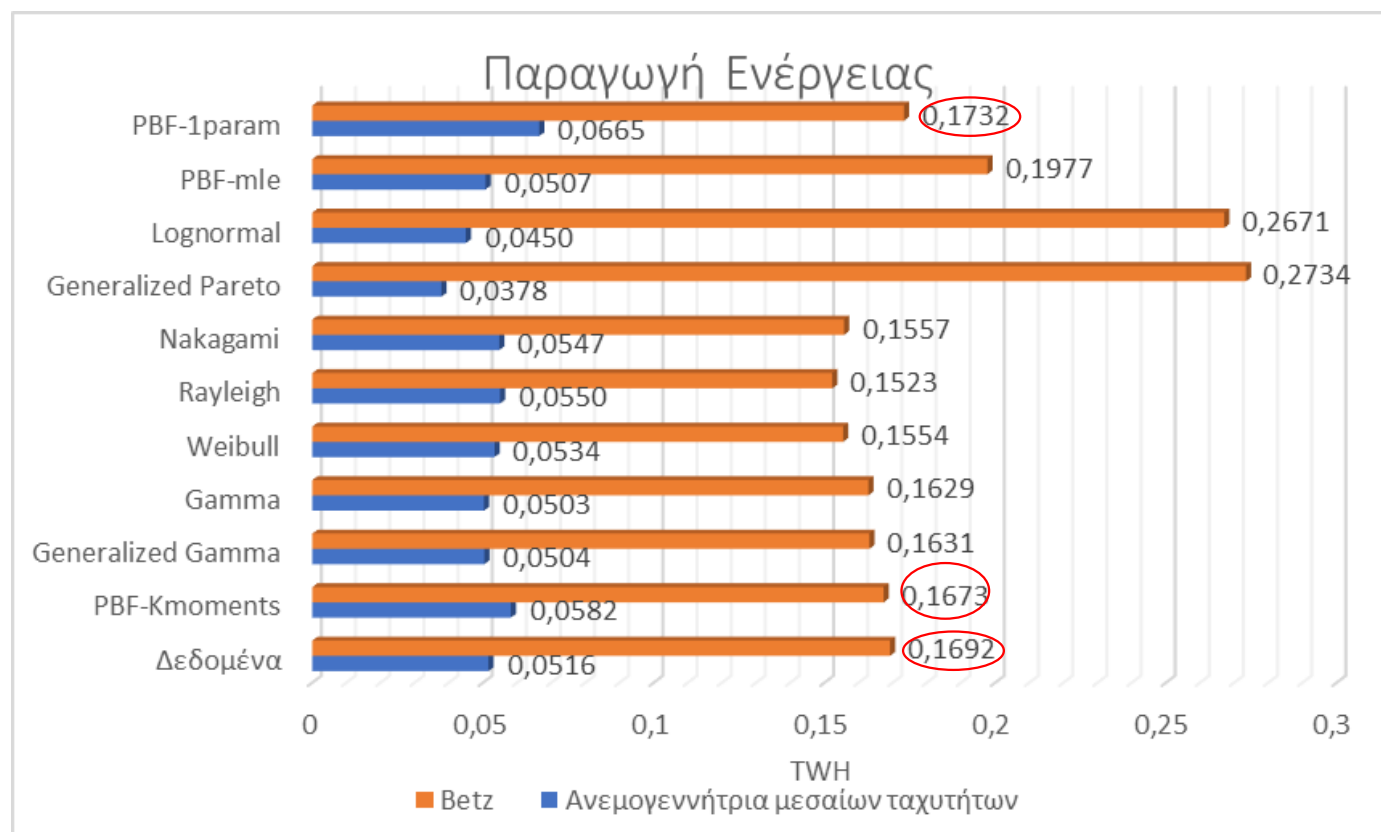


+ Monte Carlo προσομοίωση για κάθε κατανομή, για όλο το μήκος καθενός από τους 2709 σταθμούς



Ενεργειακή μελέτη(3/3)

Αποτελέσματα

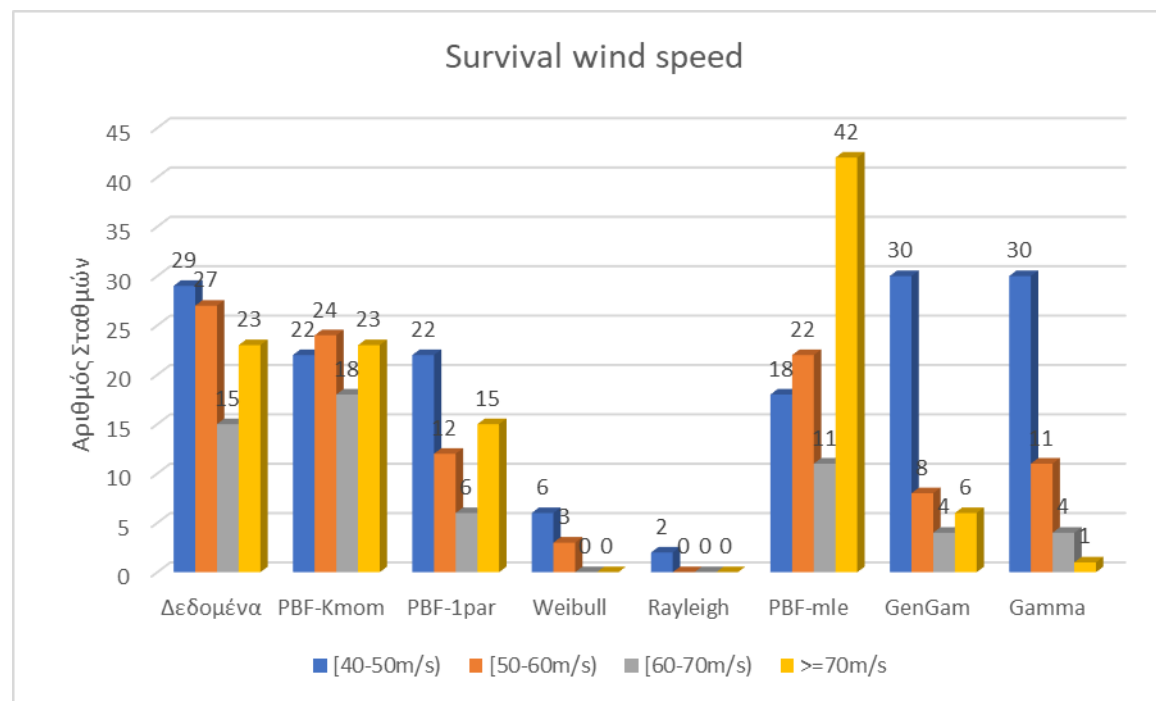




Μέγιστη ταχύτητα αντοχής (1/2)

Αποτελέσματα

Η κατασκευή των ανεμογεννητριών συνήθως σχεδιάζεται για περίοδο επαναφοράς 50 ετών και με γνώμονα τη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου που θα μπορούσαν να αντέξουν σε αυτό το χρονικό διάστημα. Η ταχύτητα αυτή είναι η survival wind speed, που εκτιμάται από το μελετητή και η τιμή της συνήθως βρίσκεται στο εύρος [40-70m/s].

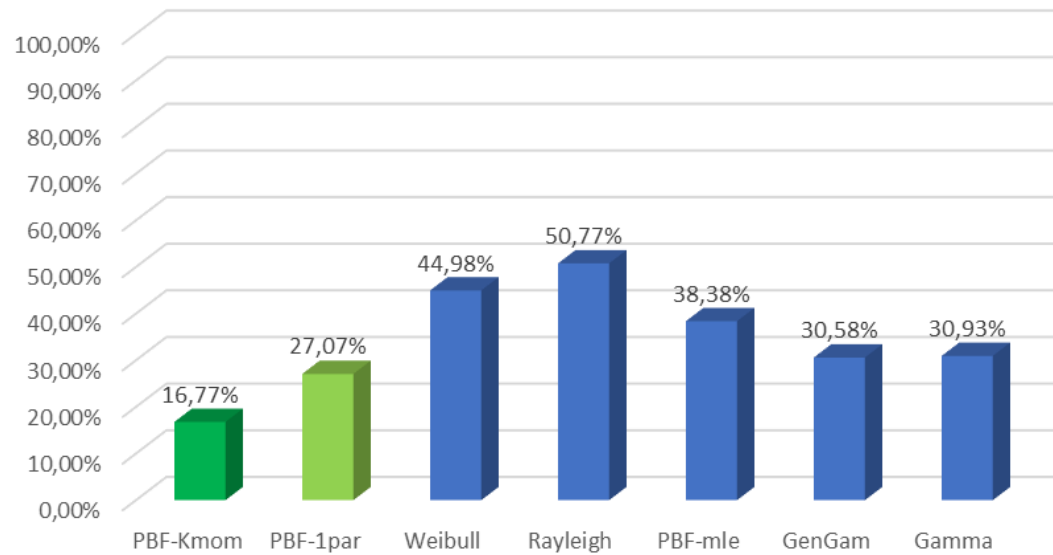




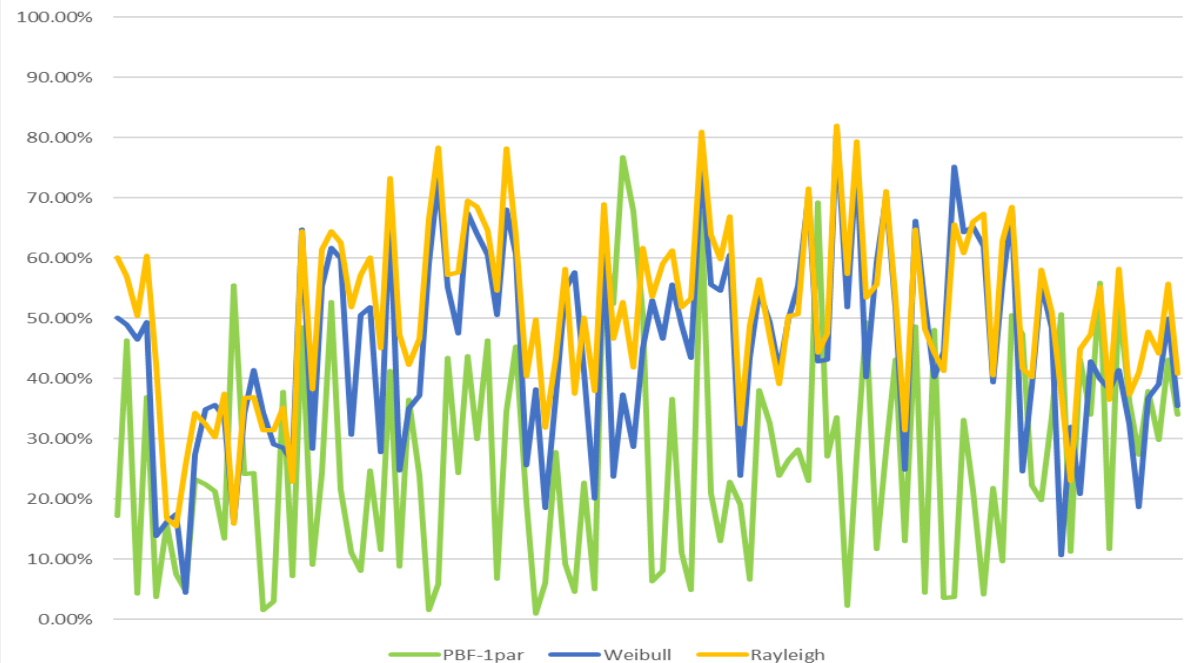
Μέγιστη ταχύτητα αντοχής (2/2)

Αποτελέσματα

Σφάλματα κατανομών για survival speed



Το σφάλμα της Weibull είναι 1,7 φορές μεγαλύτερο από της PBF με μία ελεύθερη παράμετρο!!





Περιεχόμενα

6.

Συμπεράσματα



Συμπεράσματα

- Οι K-ροπές είναι εντυπωσιακά καταλληλότερες για την περιγραφή των ακραίων τιμών από τη μέγιστη πιθανοφάνεια.
- Υστερούν ελαφρώς στο σώμα της κατανομής, ωστόσο οι τιμές των κατανομών με παραμέτρους από K-ροπές έχουν πολύ μικρά σφάλματα.
- Η επιθυμία για πιο εύχρηστες κατανομές λιγότερων παραμέτρων που μπορούν να εκτιμηθούν πιο εύκολα μας στρέφει στην επιλογή μίας εκ των PBF με μία ελεύθερη παράμετρο και Weibull, Rayleigh (που προτείνονται από τη νομοθεσία).
- Κρίνοντας από την εκτιμώμενη παραγωγή ενέργειας η Weibull είναι πιο αξιόπιστη καθότι η εκτίμηση της ενέργειας είναι πιο κοντά στα δεδομένα.
- Συνεκτιμώντας όμως την αξία της αξιόπιστης εκτίμησης της μέγιστης ταχύτητας αντοχής (survival wind speed) για οποιαδήποτε κατασκευή, για την εύρεση της ασφαλέστερης και συνάμα οικονομικότερης λύσης η PBF με μία ελεύθερη παράμετρο υπερτερεί σημαντικά! Και έτσι προτείνεται ως η ικανότερη κατανομή για να περιγράψει την ταχύτητα του ανέμου, συνολικά!

ΤΕΛΟΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ!