



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ Η περίπτωση της Σίφνου

ΖΗΣΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Επιβλέπων: Ευστρατιάδης Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

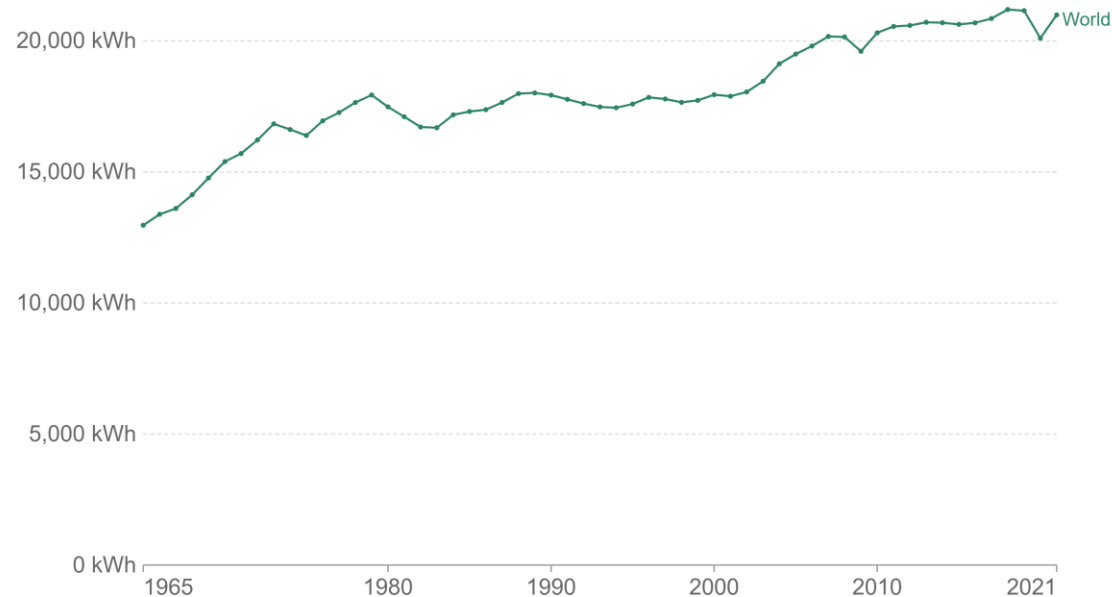
Αθήνα, Μάρτιος 2023

# Κίνητρα

- Συνεχής αύξηση ενεργειακών αναγκών σε συνδυασμό με μη ευνοϊκές συνθήκες εισαγωγών και εξαγωγών ενέργειας → Στροφή ενδιαφέροντος προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)
- Ε.Ε. και Ο.Η.Ε έθεσαν στόχους υπέρ της καθολικής πρόσβασης σε ενέργεια → Συμφωνία του Παρισιού, SDGs

## Energy use per person

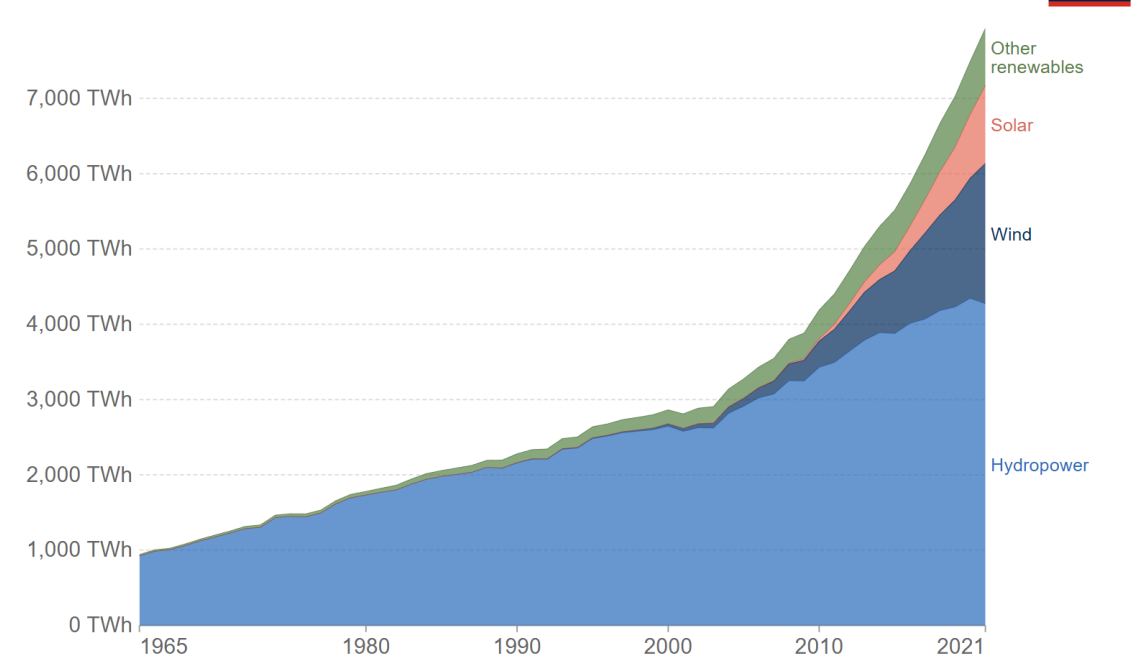
Energy use not only includes electricity, but also other areas of consumption including transport, heating and cooking.



Source: Our World in Data based on BP & Shift Data Portal

OurWorldInData.org/energy • CC BY

## Renewable energy generation, World

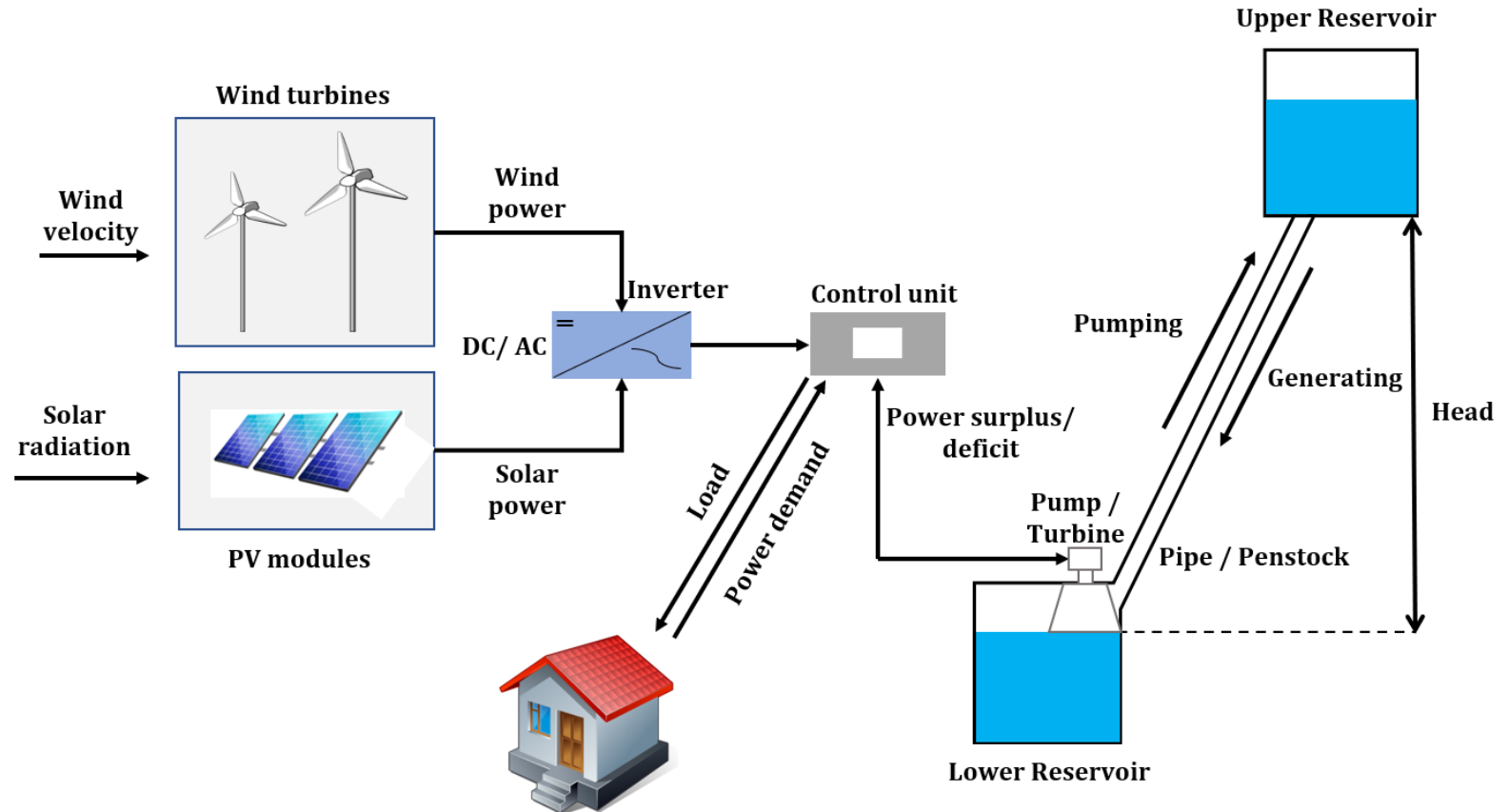


Source: BP Statistical Review of Global Energy

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

# Υβριδικά ενεργειακά συστήματα: Τυπική διάταξη και επιμέρους τμήματα

- Μέσω κατάλληλης μίξης, αξιοποιούν τα επιμέρους πλεονεκτήματα των διαφορετικών μορφών ενέργειας → πιο ευέλικτα
- Συνήθως συμπεριλαμβάνονται και ΑΠΕ, η ευελιξία των οποίων εξασφαλίζεται εφόσον συνδυαστούν με συστήματα αποθήκευσης (μπαταρίες, αντλησοταμίευση)
- Ιδιαίτερη εφαρμοσιμότητα σε απόμερες περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού της χώρας, όπου η ανάγκη ενεργειακής αυτονομίας εντείνεται.



# Υβριδικά ενεργειακά συστήματα σε Ελληνικά νησιά

- Ικαρία (Ναέρας, ΔΕΗ)
  - ❑ Τρεις ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 3×900 kW
  - ❑ Δύο μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί ισχύος 1.05 MW και 3.1 MW
  - ❑ Σύστημα αντλησοταμίευσης
  - ❑ Συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας: 9.8 GWh
  - ❑ Εγκαινιάστηκε τον Ιούνιο του 2019.
- Τήλος (TILOS project, Horizon 2020)
  - ❑ Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 800 kW
  - ❑ Φωτοβολταϊκό πάρκο ονομαστικής ισχύος 160 kW
  - ❑ Συστοιχίες μπαταριών  $\text{NaNiCl}_2$  ονομαστικής αποδιδόμενης ενέργειας 2.8 MWh
  - ❑ Ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 2019.



Πηγή: «Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας: Η συμβολή του στη βιώσιμη τοπική ανάπτυξη.», Σχιζά Μαρία-Βασιλική, 2012

# Η περίπτωση της Σίφνου

---

- Η Σίφνος είναι νησί στα δυτικά του νησιωτικού συμπλέγματος των Κυκλάδων με μόνιμο πληθυσμό 2,755 κατοίκων (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).
- Οι ενεργειακές ανάγκες του νησιού καλύπτονται από:
  - ❑ Συμβατικό θερμικό σταθμό ισχύος 9 MW
  - ❑ Αιολικό πάρκο δύο ανεμογεννητριών συνολικής ισχύος 1.2 MW
  - ❑ Φωτοβολταϊκή μονάδα ισχύος 142 kW
  - ❑ 22 φωτοβολταϊκές μονάδες ισχύος 5 kW σε κατοικίες.
- Ετήσια ζήτηση ενέργειας για το 2020 ήταν 17.30 GWh (ΔΕΔΔΗΕ, 2021)
- Προκαταρκτικός σχεδιασμός υβριδικού συστήματος
  - ❑ Ανεμογεννήτριες, Φ/Β και αντλησοταμίευση με χρήση θαλασσινού νερού
  - ❑ Βασικά μεγέθη δίνονται στην μελέτη των Katsaprakakis & Voumnoulakis (2018), όπου προτείνονται τρία εναλλακτικά σενάρια
  - ❑ Σε όλα τα σενάρια προβλέπεται κατασκευή ταμιευτήρα χωρητικότητας 1,100,00 m<sup>3</sup>.
  - ❑ Ενεργειακή αυτονομία του νησιού μέχρι και 20 μέρες

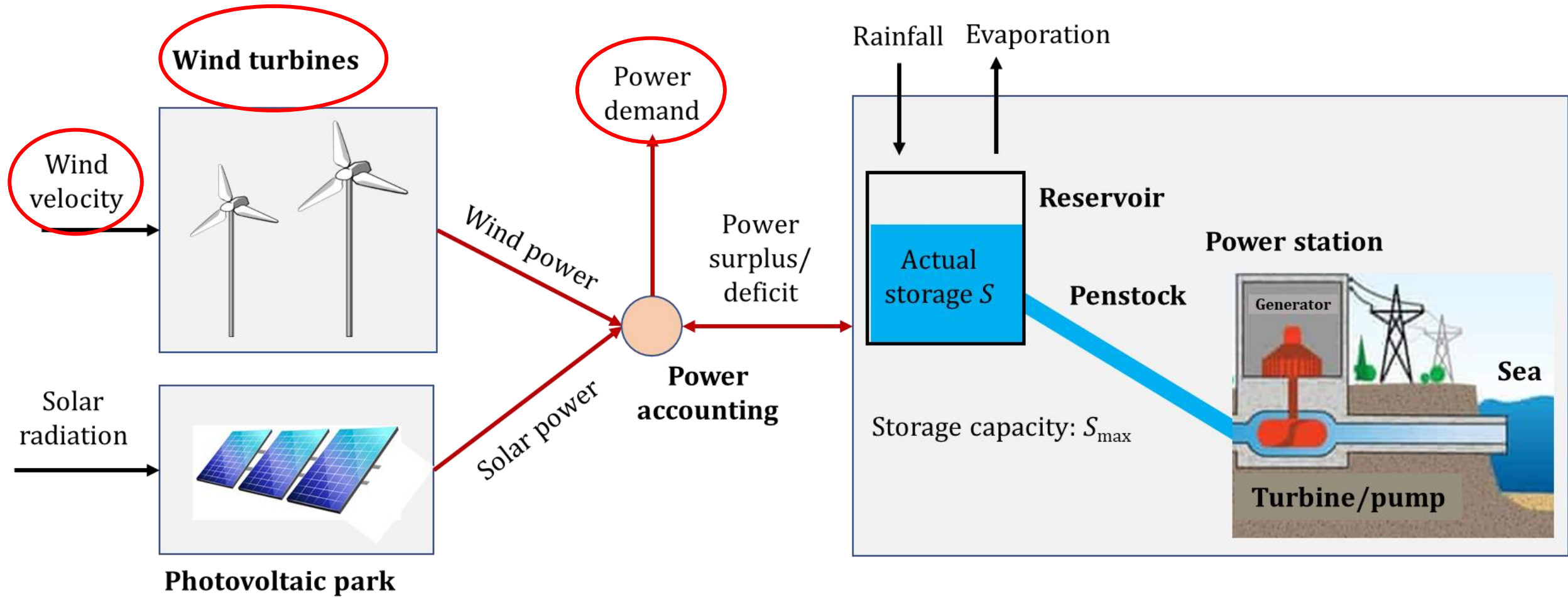


# Ερευνητικά ερωτήματα

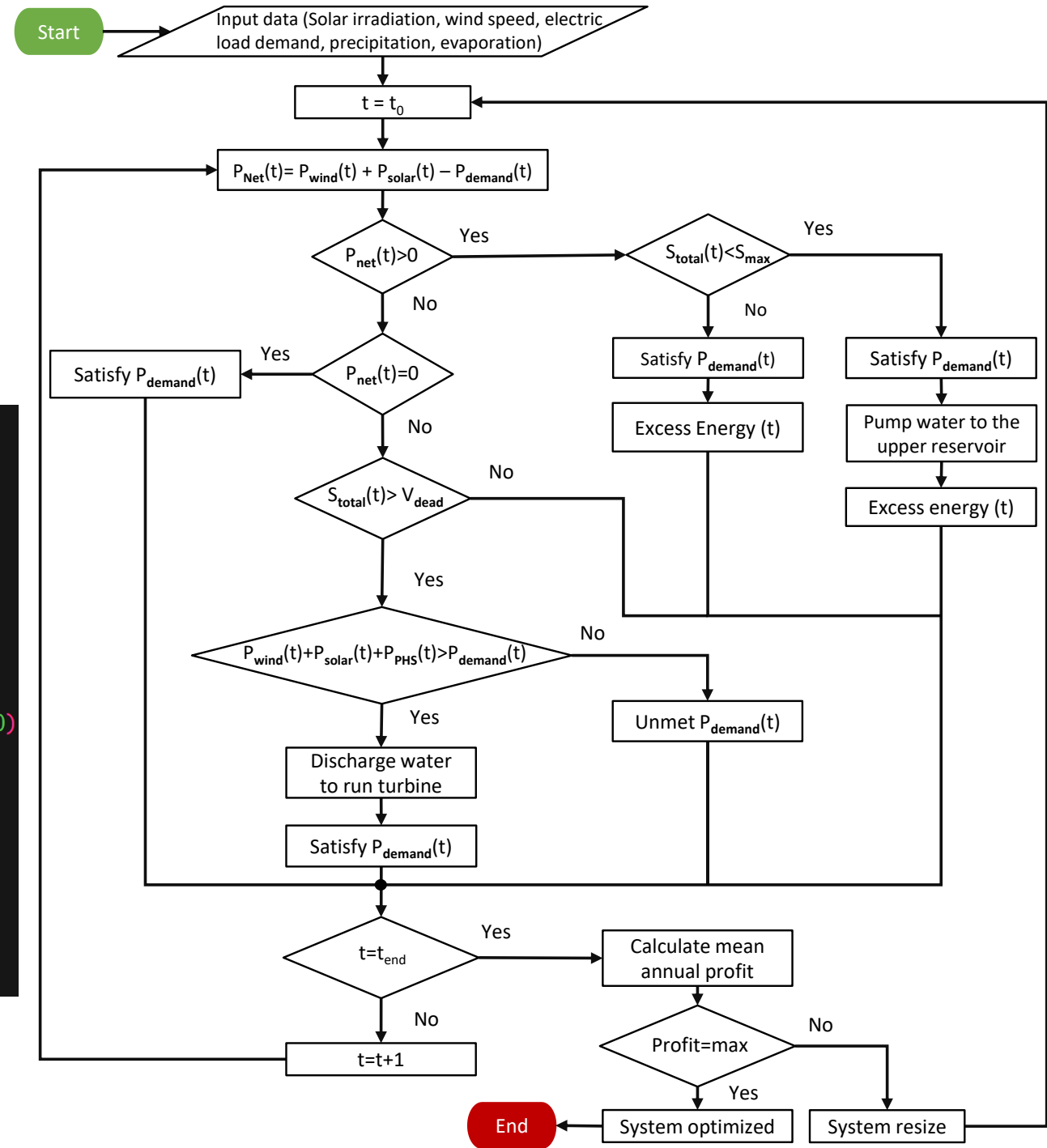
---

- Αξιολόγηση του υφιστάμενου σχεδιασμού υβριδικού ενεργειακού συστήματος
- Προσομοίωση λειτουργίας υβριδικού ενεργειακού συστήματος
- Βελτιστοποίηση σχεδιασμού ως προς πολλαπλά κριτήρια:
  - ❑ κόστος επένδυσης
  - ❑ έσοδα από την πώληση ενέργειας
  - ❑ αξιοπιστία συστήματος
- Ένταξη πολλαπλών πτυχών αβεβαιότητας κατά τον σχεδιασμό:
  - ❑ Φυσικές διεργασίες (άνεμος)
  - ❑ Ανθρωπογενείς διεργασίες (ζήτηση ενέργειας)
  - ❑ «Εσωτερικές» διεργασίες (καμπύλες ισχύος)
- Σύγκριση:
  - ❑ Υφιστάμενων σεναρίων με βελτιστοποιημένο σχεδιασμό
  - ❑ Ντετερμινιστικής και στοχαστικής προσέγγισης

# Προτεινόμενο υβριδικό ενεργειακό σύστημα



# Διάγραμμα ροής μοντέλου προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος



```

for (i in 1:steps){
if(deficits[i]<0){
H_reserv[i]<-(V_equilibr[i-1]+6280.5)/78793
A_reservoir_m2[i]<- 763.89*H_reserv[i] + 74978
Rain[i]<-min(Smax-V_equilibr[i-1],Precip[i]/1000*A_reservoir_m2[i])
Evaporation[i]<-min(V_equilibr[i-1]+Rain[i],Evap[i]/1000*A_reservoir_m2[i])
V_prod[i]<-min(max(V_equilibr[i-1]+Rain[i]-Evaporation[i]-V_dead,0),
-deficits[i]/nturb/9.81/Hm*1000*3600)
V_pump[i]<-0
Surplus_storage[i]<-Smax-(V_equilibr[i-1]-V_prod[i]+Rain[i]-Evaporation[i])
V_equilibr[i]<-max(V_equilibr[i-1]+V_pump[i]-V_prod[i] + Rain[i] - Evaporation[i],0)
}else {
H_reserv[i]<-(V_equilibr[i-1]+6280.5)/78793
reservoir_m2[i]<- 763.89*H_reserv[i] + 74978
V_prod[i]<-0
Rain[i]<-min(Smax-V_equilibr[i-1],Precip[i]/1000*A_reservoir_m2[i])
Evaporation[i]<-min(V_equilibr[i-1]+Rain[i],Evap[i]/1000*A_reservoir_m2[i])
Surplus_storage[i]<-Smax-(V_equilibr[i-1]-V_prod[i]+Rain[i]-Evaporation[i])
V_pump[i]<-min(Surplus_storage[i],P_pump[i]*npump/9.81/Hm*1000*3600)
V_equilibr[i]<-max(V_equilibr[i-1]+V_pump[i]-V_prod[i]+Rain[i]-Evaporation[i],0)}}
  
```



# Δεδομένα και παραδοχές μοντέλου προσομοίωσης

---

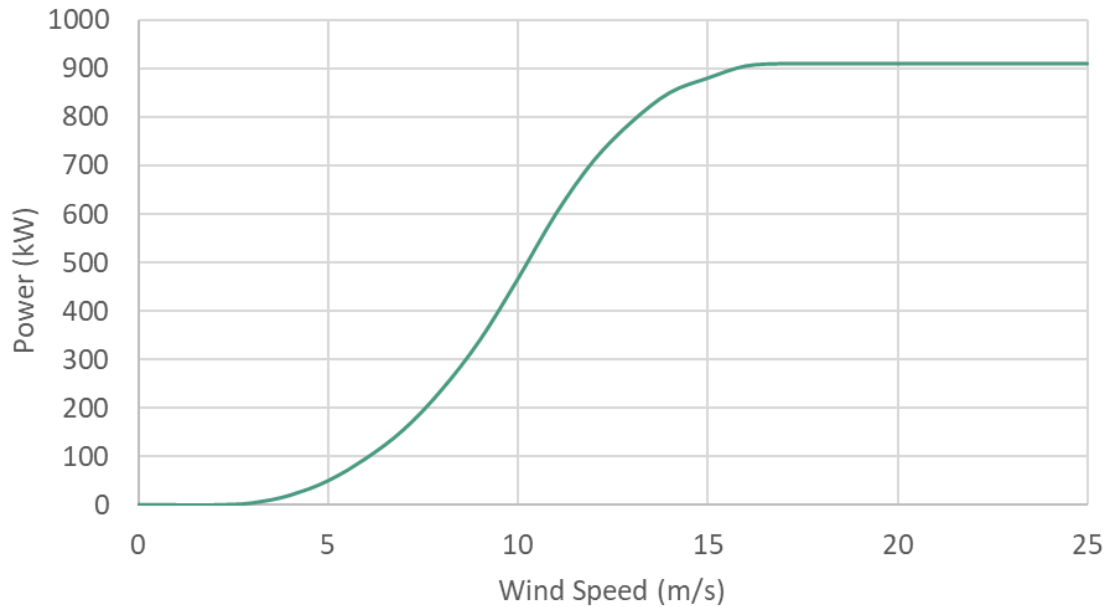
- Θεωρείται τραπεζοειδές σχήμα ταμιευτήρα
- Ύψος υδροληψίας από τον πυθμένα: 1.2 m
- Καθαρό ύψος πτώσης: 320 m (θεωρούνται σταθερές υδραυλικές απώλειες, ίσες με 5% του συνολικού ύψους πτώσης)
- Ισχύς αντλίας: 6 MW (= ισχύς Α/Γ – ελάχιστη ωριαία ζήτηση)
- Ισχύς στροβίλου: 6 MW (= ωριαία αιχμή ζήτησης)
- Ο βαθμός απόδοσης αντλίας 80% και στροβίλου 85% (κατά προσέγγιση σταθεροί)
- Θεωρούμε απομείωση των ταχυτήτων ανέμου στην πτερωτή των μικρών ανεμογεννητριών λόγω αλληλεπίδρασης με τις μεγάλες

$$V_{wind} = V_0 \left( 1 - \frac{2a}{\left( 1 + \frac{2kL}{D_L} \right)^2} \right)$$

# Καμπύλες ισχύος ανεμογεννητριών

$$P_{wind} = P_{min} + \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{V_{wind} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right)^a \right)^b \right) (P_{max} - P_{min}), a=2.2 \text{ \& } b=20$$

Enercon E-44



Wind turbine type	Enercon E-44	Enercon E-70 E4
<b>Rated power</b>	900,0 kW	2.300,0 kW
<b>Minimum power</b>	4 kW	2 kW
<b>Cut-in wind speed</b>	3,0 m/s	2,5 m/s
<b>Rated wind speed</b>	16,50 m/s	15,0 m/s
<b>Cut-out wind speed</b>	34,0 m/s	34,0 m/s
<b>Survival wind speed</b>	59,50 m/s	-
<b>Tower height</b>	55 m	113 m
<b>Rotor</b>		
<b>Diameter</b>	44,0 m	71,0 m
<b>Swept area</b>	1.521 m <sup>2</sup>	3959 m <sup>2</sup>
<b>Number of blades</b>	3	3
<b>Power density 1</b>	591,7 W/m <sup>2</sup>	581 W/m <sup>2</sup>
<b>Power density 2</b>	1,7 m <sup>2</sup> /kW	1,7 m <sup>2</sup> /kW
<b>Generator</b>		
<b>Voltage</b>	690 V	2.000 V
<b>Grid frequency</b>	50 Hz	50 Hz

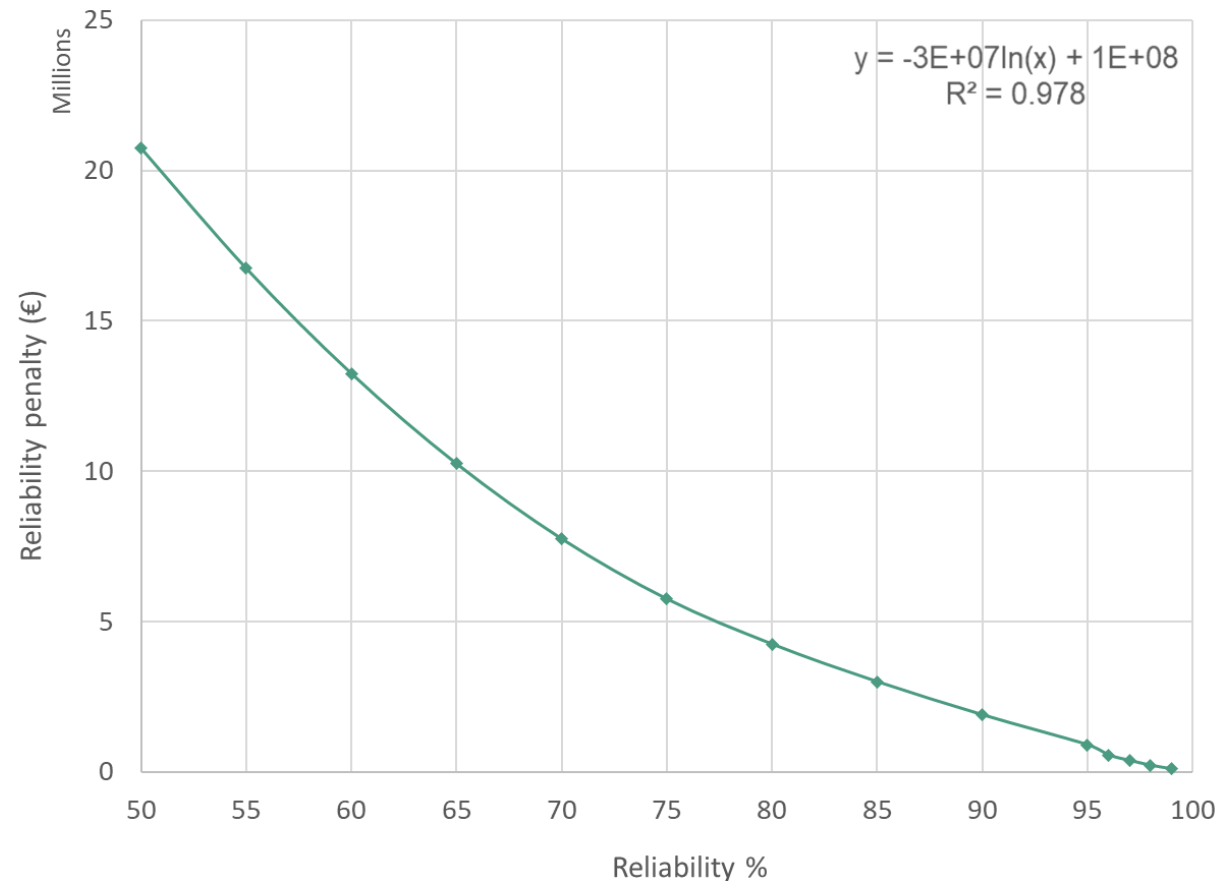
# Αξιολόγηση του συστήματος

- Οικονομική αξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη τρία κριτήρια (κόστος επένδυσης, έσοδα από την πώληση ενέργειας, αξιοπιστία συστήματος).
- Κόστη επένδυσης: κόστη αγοράς και τοποθέτησης Η/Μ εξοπλισμού (Α/Γ, Φ/Β, Υ/Σ, αντλίες), βασικά κατασκευαστικά κόστη ταμιευτήρα (εκσκαφές, στεγάνωση), κόστος αγωγού προσαγωγής

- Σχέση απόσβεσης κεφαλαίου:

$$A = C \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

- Όφελος πώλησης ενέργειας: 300 €/MWh (με επιδοτήσεις)
- Η αξιοπιστία του συστήματος εκφράζεται:
  - ❑ σε όρους ελλείμματος, ορίζοντας ρήτρα 350 €/MWh
  - ❑ σε όρους συχνότητας αστοχιών, εισάγοντας με εμπειρική συνάρτηση ποινής
- Όλα τα παραπάνω μεγέθη εξαρτώνται από τυχαίες μεταβλητές, άρα είναι εξ ορισμού στοχαστικά.



# Αποτελέσματα προσομοιώσεων υφιστάμενου σχεδιασμού

- Σε όλα τα σενάρια προβλέπεται κατασκευή ταμιευτήρα χωρητικότητας 1,100,000 m<sup>3</sup>.
- Αν και ο σχεδιασμός αυτός εμφανίζει υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας, η υλοποίηση έργου τόσο μεγάλης κλίμακας παρουσιάζει αρκετές τεχνικές δυσκολίες.

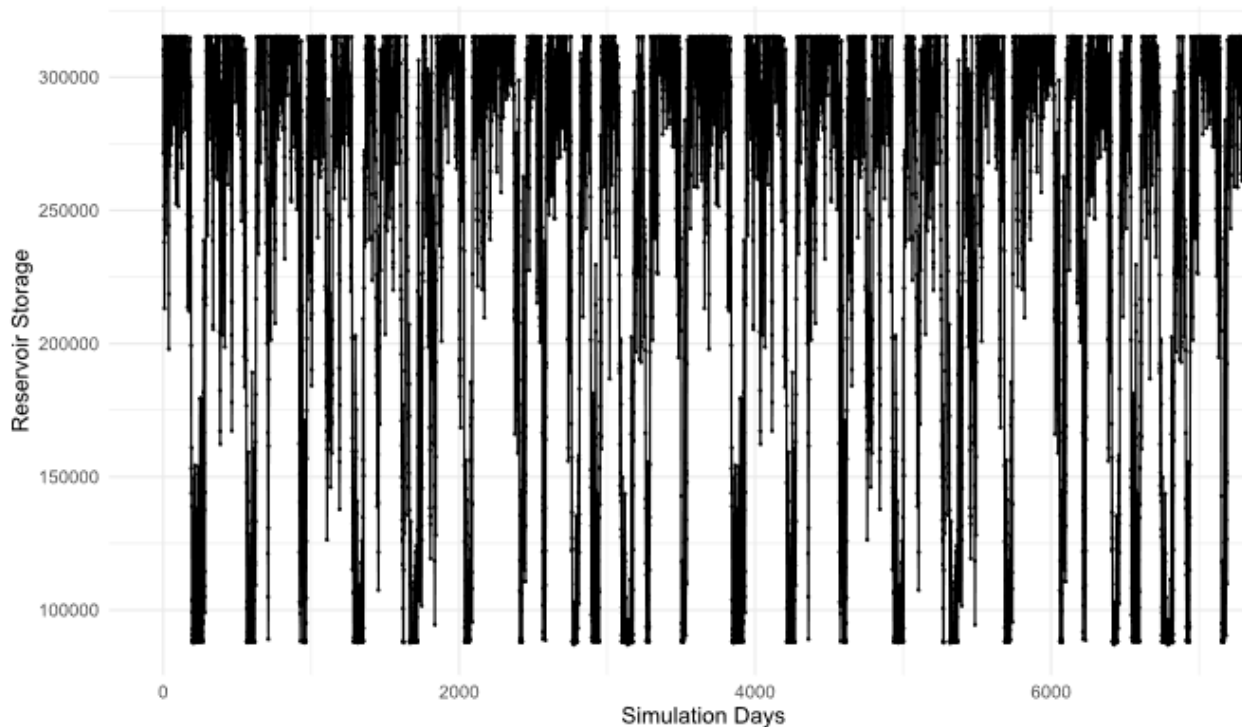
	1° Σενάριο	2° Σενάριο	3° Σενάριο
Εγκατεστημένη Ισχύς Ανεμογεννητριών (MW)	6.90	9.20	11.50
Εγκατεστημένη Ισχύς Φ/Β (MW)	2	0.50	0
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ (GWh)	29.25	35.10	42.75
Μέση ετήσια παραγωγή από αντλησοταμίευση (GWh)	4.90	4.98	4.88
Αξιοπιστία %	99.30	99.40	99.60
Μέσο ετήσιο κέρδος (€)	911,000	760,333	546,700

# Βελτιστοποίηση του συστήματος

---

- Στοχική συνάρτηση αποτελεί η μεγιστοποίηση του μέσου ετήσιου κέρδους
- Βελτιστοποίηση μέσω εξελικτικού αλγόριθμου ανόπτησης - απλόκου (eas) στο προγραμματιστικό περιβάλλον R
- Μεταβλητές ελέγχου:
  - Ωφέλιμο βάθος ταμιευτήρα
  - Πλήθος φωτοβολταϊκών
- Ορίζουμε το διάνυσμα  $(h_{\omega\text{φέλιμο}}, N_{\text{φωτοβολταϊκών}})$  με κάτω όριο (1,100) και άνω όριο (10,5000)
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων : 100

# Αποτελέσματα προσομοίωσης προτεινόμενου ντετερμινιστικού σχεδιασμού



- Για σχεδιασμό έργου αρκετά μικρότερης κλίμακας επιτυγχάνονται υψηλά επίπεδα κέρδους και αξιοπιστίας

Βελτιστοποιημένος προτεινόμενος ντετερμινιστικός σχεδιασμός	
Όγκος ταμιευτήρα (m <sup>3</sup> )	315,195
Εγκατεστημένη Ισχύς Ανεμογεννητριών (MW)	6.40
Εγκατεστημένη Ισχύς Φ/Β (MW)	1.09
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ (GWh)	24.98
Μέση ετήσια παραγωγή από αντλησοταμίευση (GWh)	4.69
Αξιοπιστία %	94.76
Μέσο ετήσιο κέρδος (€)	789,131
Συντελεστής Δυναμικότητας	
Φωτοβολταϊκά	0.207
Μικρές ανεμογεννήτριες	0.304
Μεγάλες ανεμογεννήτριες	0.424
Αντλησοταμίευση	0.108

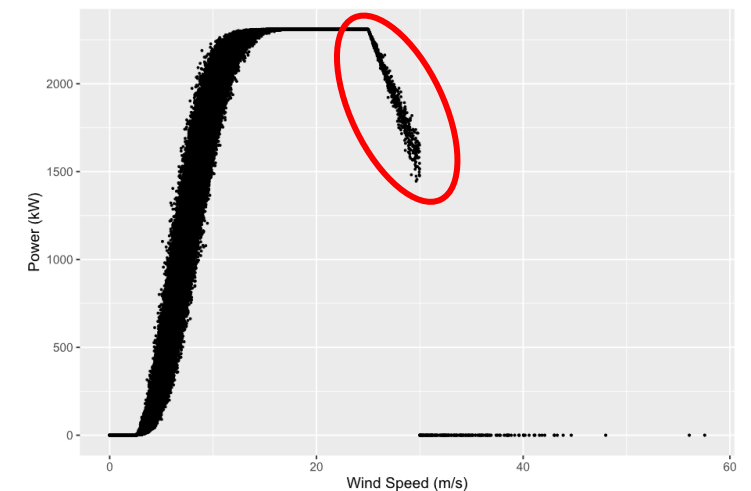
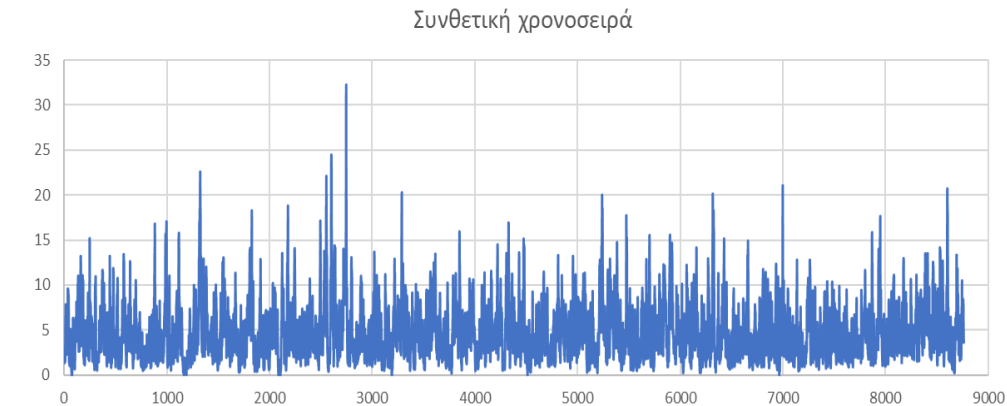
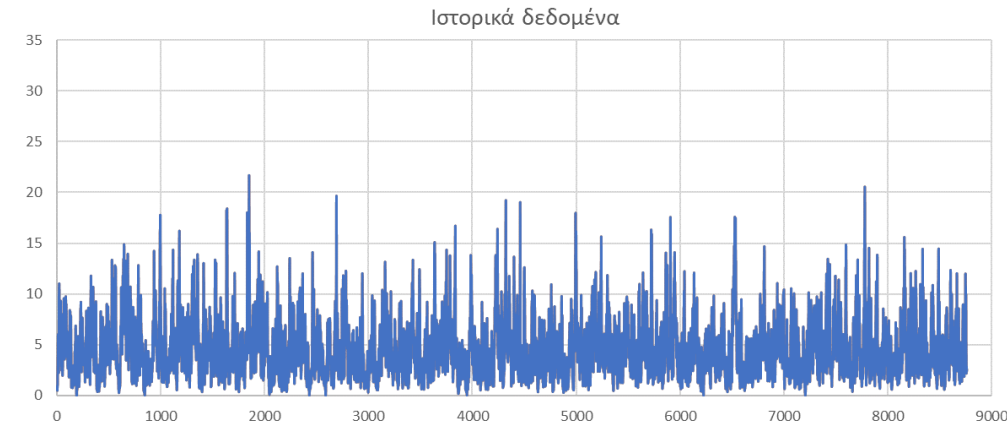
# Πτυχές αβεβαιότητας

- Φυσικές διεργασίες: Ταχύτητα ανέμου
- Ανθρωπογενείς διεργασίες: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

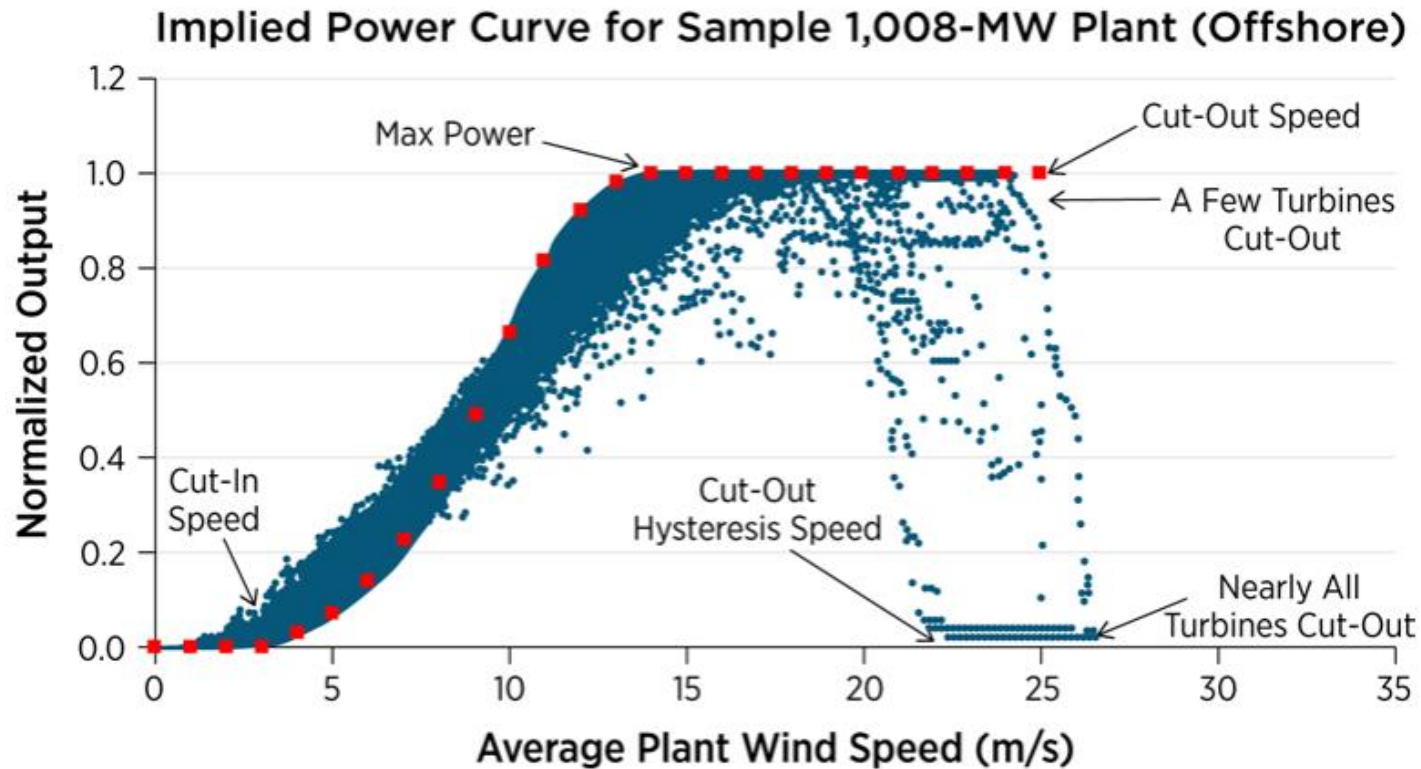
Γέννηση ωριαίων συνθετικών χρονοσειρών μήκους 20 ετών βάσει των ιστορικών δεδομένων (μοντέλο anySim)

- Εσωτερική διεργασία: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας
  - ❑ Αβεβαιότητα στην παραγωγή ενέργειας της καμπύλης
  - ❑ Αβεβαιότητα στη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας για υψηλές ταχύτητες ανέμου (άνω των 25 m/s)

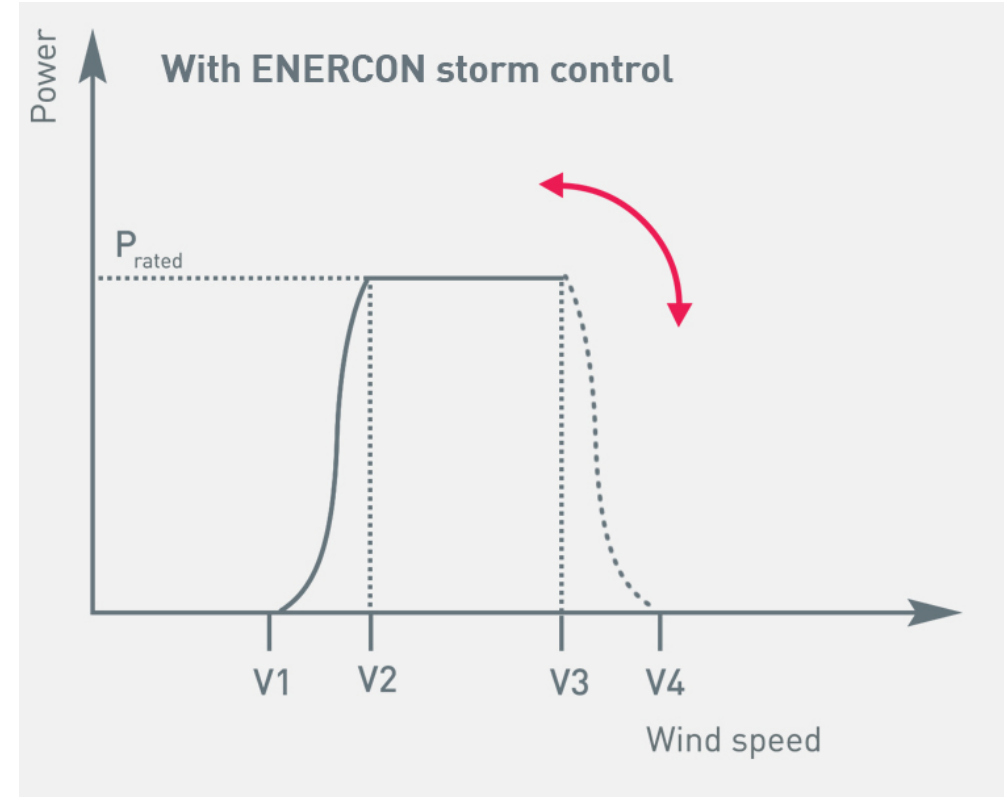
1. Στοχαστική προσομοίωση καμπύλης ισχύος
2. Εφαρμογή της “soft cut-out” στρατηγικής



# Παραγωγή ενέργειας στο πεδίο vs. εμπειρικές καμπύλες ισχύος



Πηγή: King, J., A. Clifton, and B.-M. Hodge, *Validation of power output for the WIND toolkit*, National Renewable Energy Laboratory, 2014.

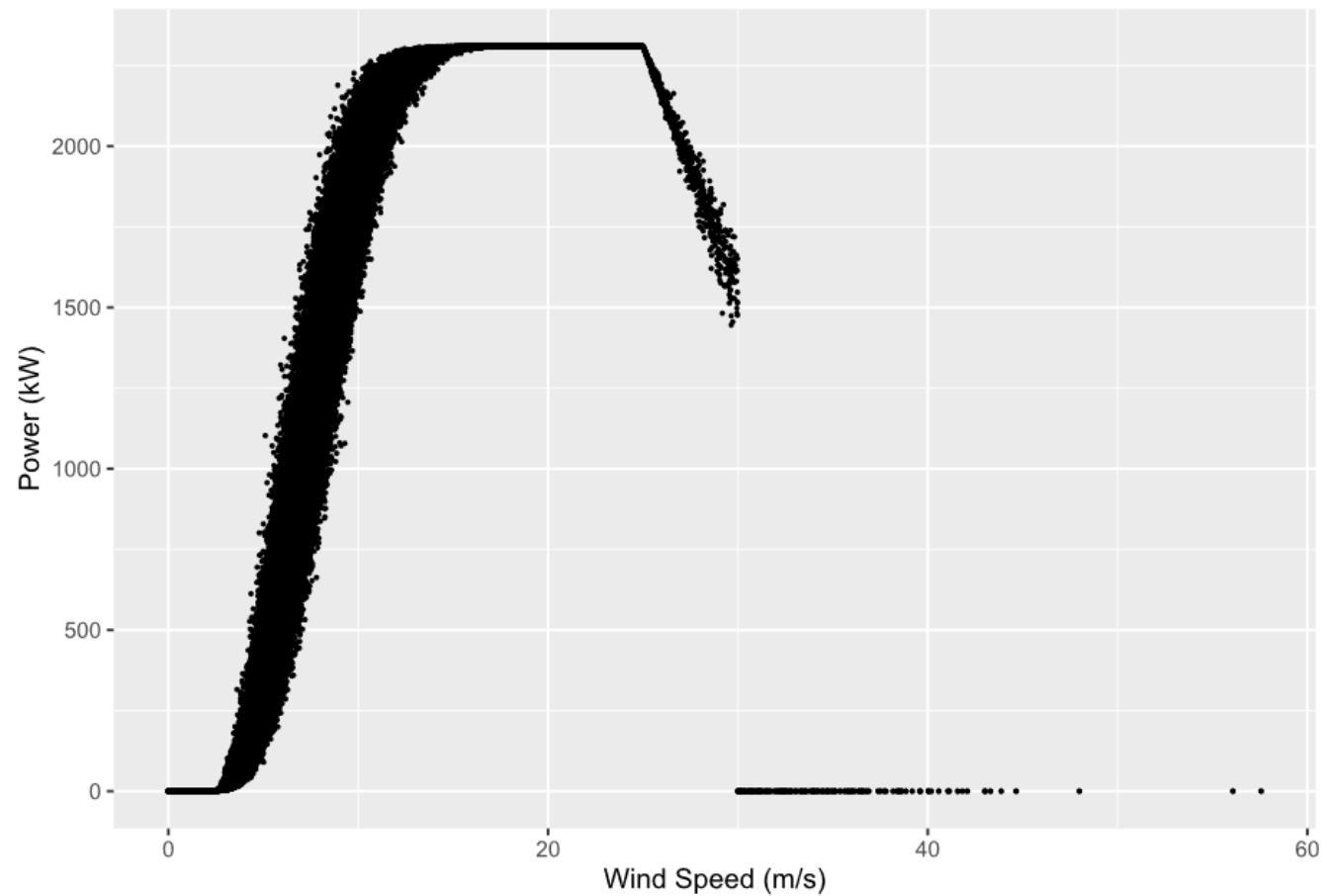
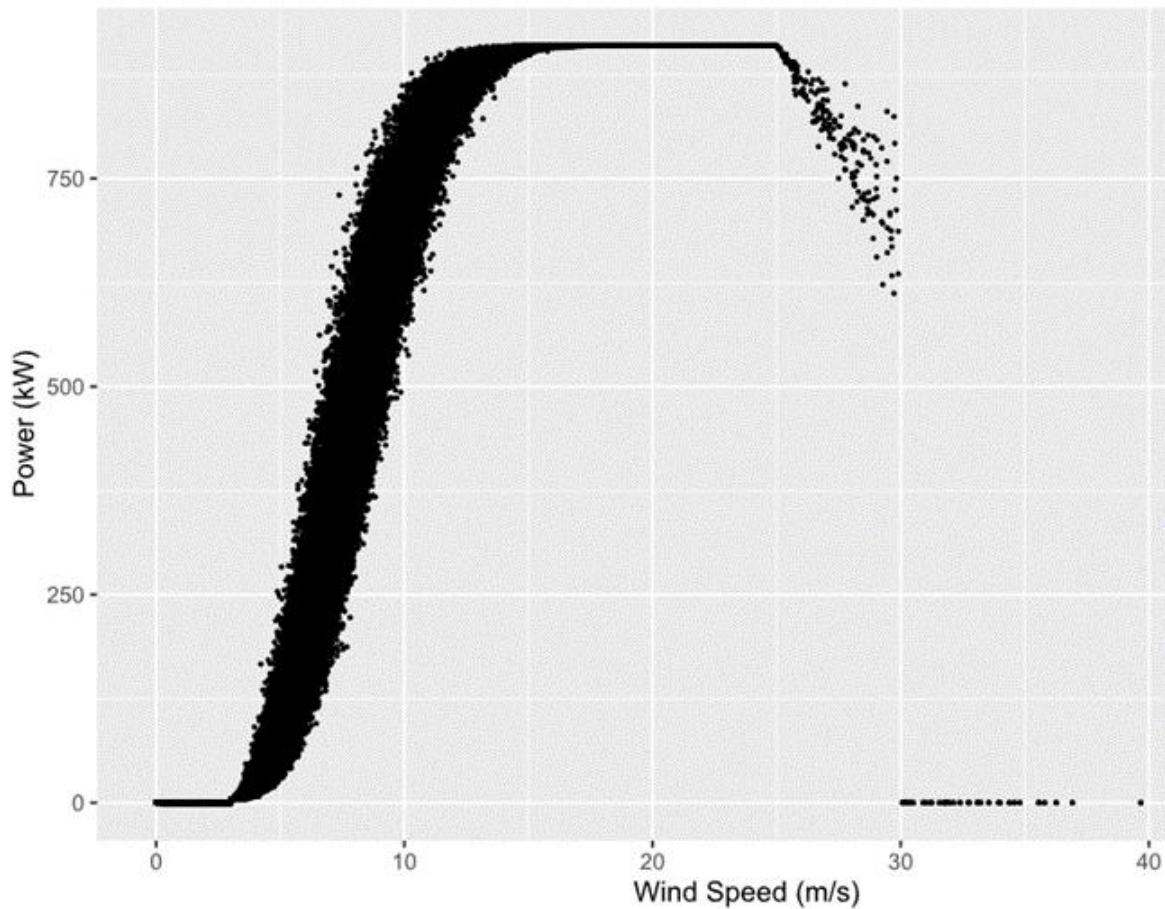


Πηγή: <https://www.enercon.de/en/technology/wec-features/#ReiterStation>



# Πτυχές αβεβαιότητας

- Μέση απόκλιση από την θεωρητική καμπύλη των κατασκευαστών της τάξης του 15%
- Σε όλα τα σενάρια η εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών είναι ίδια (6.4 MW)

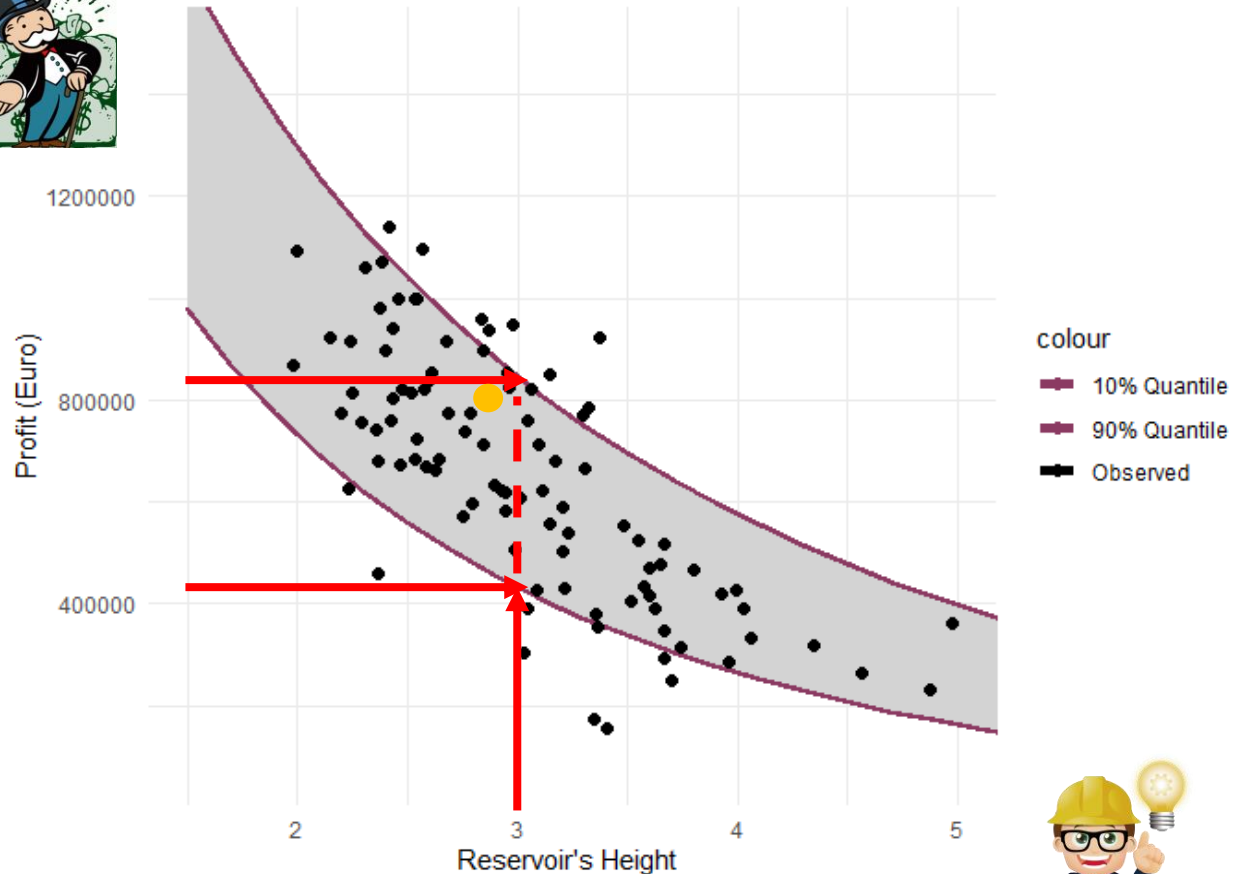


# Αποτελέσματα βελτιστοποίησης υπό αβεβαιότητα (100 σενάρια προσομοίωσης)

	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	90% ποσοστημόριο	Διάμεσος	10% ποσοστημόριο
Όγκος ταμιευτήρα (m <sup>3</sup> )	329,882	53,370	400,282	323,278	274,583
Εγκατεστημένες Φ/Β μονάδες	4981	74.4	5000	5000	4981
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας ΑΠΕ (GWh)	24.24	1.90	26.78	24.43	21.86
Μέση ετήσια παραγωγή από αντλησοταμίευση (GWh)	4.93	0.19	5.16	4.95	4.69
Μέσες ετήσιες ώρες ελλειμμάτων (hours)	447	131	618	431	288
Αξιοπιστία %	94.89	1.50	96.75	95.11	92.98
Μέσο ετήσιο κέρδος (€)	640,234	255,052	959,029	669,924	315,269
Συντελεστής Δυναμικότητας Μικρών Α/Γ	0.292	0.033	0.339	0.295	0.252
Συντελεστής Δυναμικότητας Μεγάλων Α/Γ	0.411	0.034	0.459	0.414	0.367
Συντελεστής Δυναμικότητας Αντλησοταμίευσης	0.089	0.006	0.096	0.090	0.082

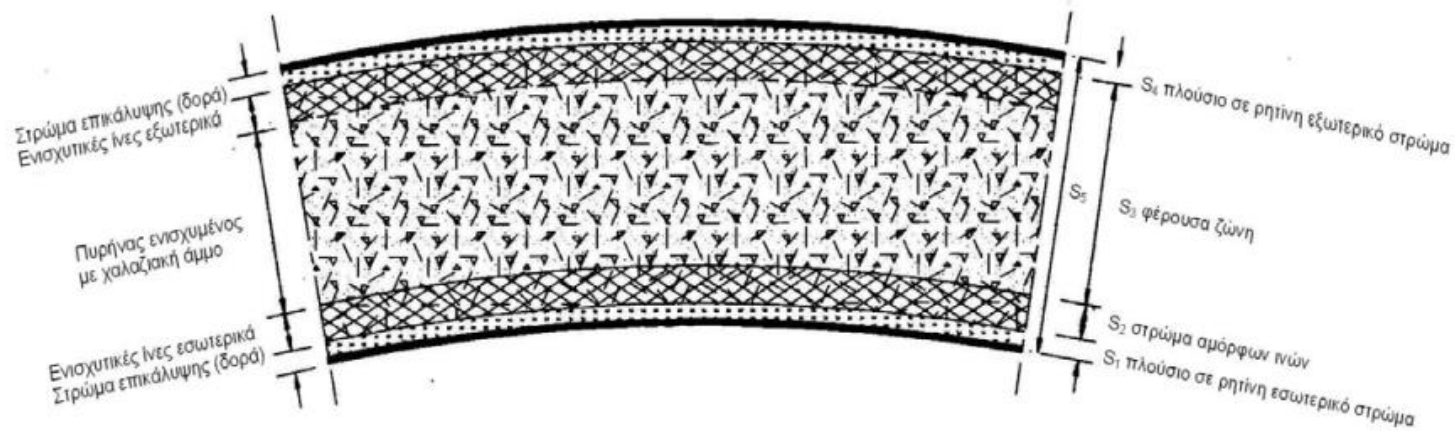
# Ποσοτικοποίηση εύρους αβεβαιότητας

- Από κοινού πολυμεταβλητή κανονική κατανομή (Gaussian Copula)
- Συσχέτιση μέσου ετήσιου κέρδους με το ωφέλιμο βάθος ταμιευτήρα
- Συντελεστής συσχέτισης  $R^2 = -0.75$
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποστηρικτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων, για τον σχεδιασμό υπό αβεβαιότητα



# Αντιμετώπιση τεχνικών προκλήσεων (= αβεβαιότητα!)

- Χρήση αγωγών GRP για την αποφυγή διάβρωσης λόγω θαλασσινού νερού. Πρόκειται για αγωγούς που αποτελούνται από ακόρεστες πολυεστερικές ρητίνες, ίνες γυαλιού και χαλαζιακή άμμο.
- Χρήση μηχανολογικού εξοπλισμού από ανοξείδωτο χάλυβα. Η δημιουργία κραμάτων χάλυβα με χρώμιο, νικέλιο και μολυβδαίνιο παρουσιάζουν αυξημένο δείκτη PREN (pitting resistance equivalent number), ο οποίος ορίζεται ως μέτρο αντοχής σε διάβρωση
- Η στεγανοποίηση του ταμιευτήρα κρίνεται απαραίτητη διαδικασία και επιτυγχάνεται με την χρήση γεωμεμβράνων, κατασκευασμένες από HDPE.



# Τεχνολογικές και ερευνητικές προοπτικές

---

- Ζητήματα που αφορούν τον σχεδιασμό
  - Διερεύνηση εγκατάστασης πλωτών Φ/Β στον ταμιευτήρα
- Ζητήματα που αφορούν το μοντέλο προσομοίωσης
  - Λειτουργία των αντλιών και στροβίλων με μεταβαλλόμενο βαθμό απόδοσης
  - Αξιολόγηση της επίδρασης του θαλασσινού νερού στο έργο
- Ζητήματα που αφορούν άλλες πτυχές αβεβαιότητας
  - Ηλιακή ακτινοβολία (φυσική διεργασία)
  - Καμπύλη παραγωγής ηλιακής ενέργειας (εσωτερική διεργασία)
  - Χρηματιστήριο ενέργειας (κοινωνικό-οικονομικές παράμετροι)
- Άλλες ερευνητικές προοπτικές
  - Αξιοποίηση της περίσσειας ενέργειας όταν ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος



ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!