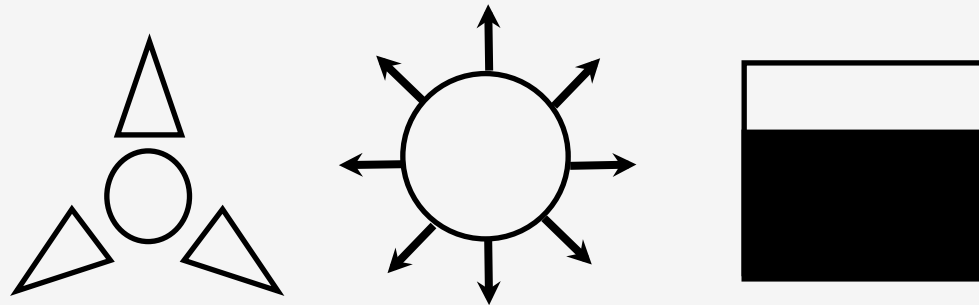




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Στοχαστική προσομοίωση και βελτιστοποίηση υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας



Ιωάννου Χρήστος

Επιβλέπων: Κουτσογιάννης Δημήτρης

Αθήνα
Οκτώβριος 2012

Εισαγωγή

Ανάγκη απεξάρτησης από ορυκτά καύσιμα

- Τα αποθέματα δεν είναι ανεξάντλητα
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- Έντονη μεταβλητότητα των τιμών

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας



- Ανεξάντλητες
- Φιλικές στο περιβάλλον



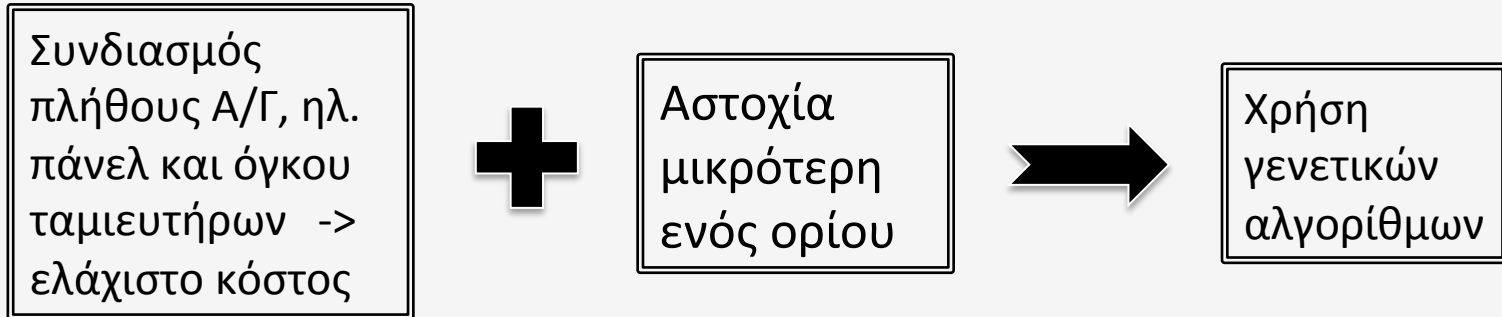
- Ακριβότερες
- Αδυναμία προγραμματισμού παραγωγής

Υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας σύστημα με δύο ή παραπάνω ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Αντλησιοταμίευση για αποθήκευση ενέργειας -> Αντιμετώπιση της χρονικής αναντιστοιχίας παραγωγής και ζήτησης ενέργειας

- Δύο ταμιευτήρες με υψομετρική διαφορά
- Περίσσεια: άντληση
- Έλλειμμα: παραγωγή μέσω στροβίλων

Τοποθέτηση του προβλήματος (2)

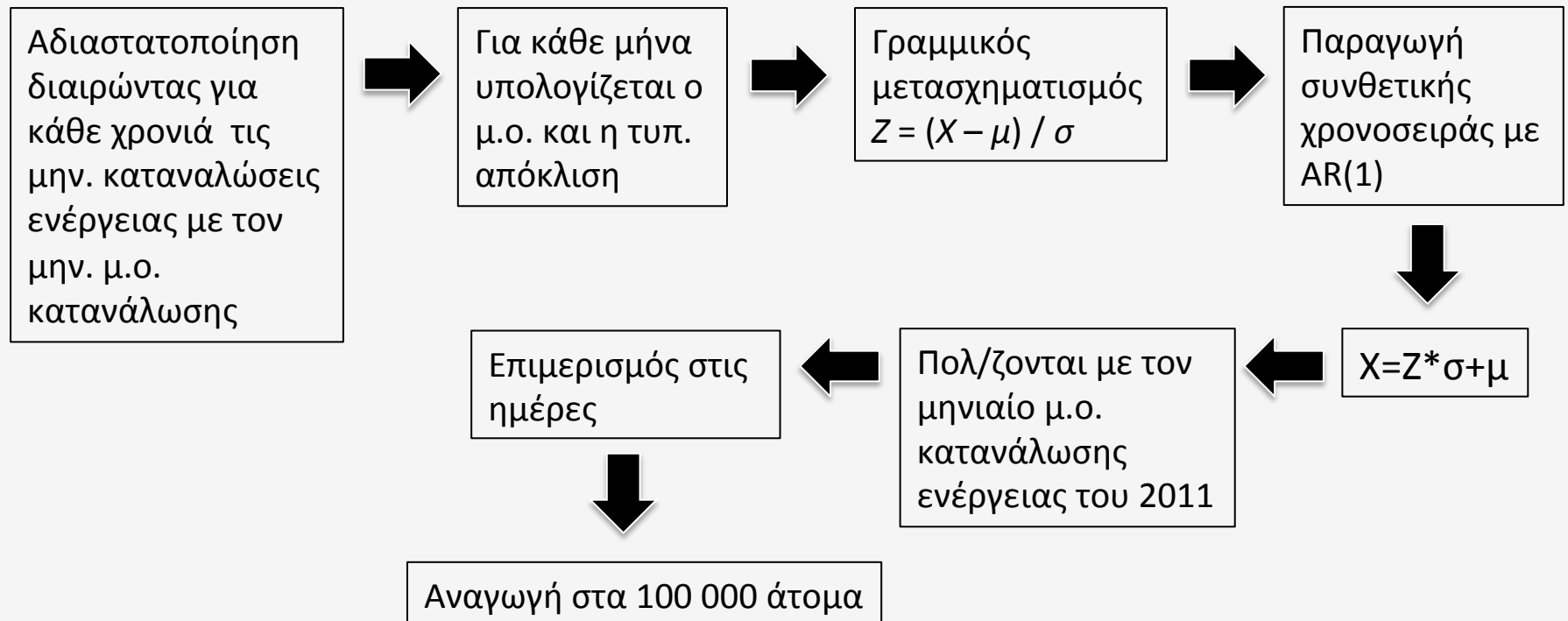


✧ Πιλοτική εφαρμογή

- Μήκος προσομοίωσης 500 χρόνια
- 100 000 άτομα εξυπηρετούμενος πληθυσμός
- Αστοχία μικρότερη ή ίση των 100 ημερών
- Μετεωρολογικά δεδομένα από σταθμό στην νότια Αττική
- Ανεμογεννήτρια E-126 / 7.5 MW της Enercon
- Ηλιακό πάνελ με ισχύ 280 Wp
- Οι δύο ταμιευτήρες έχουν την ίδια χωρητικότητα και χαρακτηριστικά
- Δεν υπάρχουν εισροές και διαφυγές στους ταμιευτήρες

Συνθετικές χρονοσειρές ζήτησης ενέργειας

- ❑ Συλλογή δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας ηπειρωτικής Ελλάδας από ΑΔΜΗΕ
- ❑ Επιλέγεται μηνιαίο χρονικό βήμα



- Η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας των 100 000 ατόμων περίπου 534.8 GWh

Συνθετικές χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας

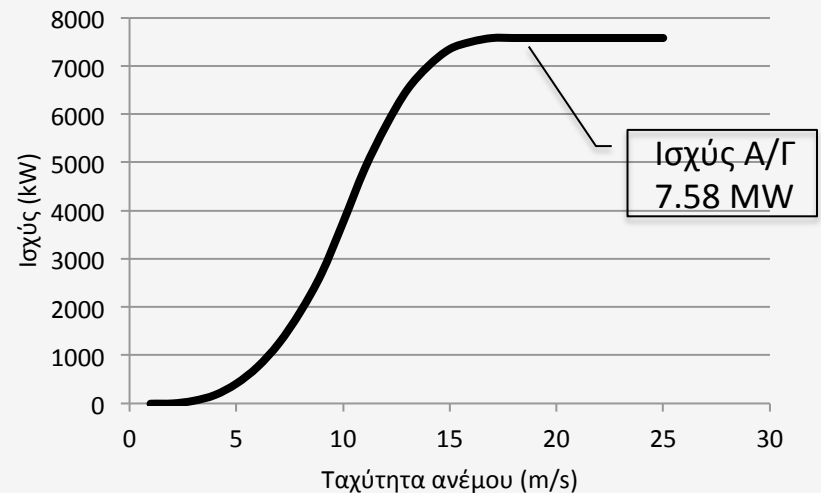
- ❑ Παραγωγή χρονοσειρών με το σύστημα «Κασταλία» μήκους 500 ετών
- ❑ Χρήση πολυμεταβλητού μοντέλου που διατηρεί την εμμονή
- ❑ Στατιστικά χαρακτηριστικά των φαινομένων από μετεωρολογικό σταθμό στην Ν. Αττική
- ❑ Τιμές συντελεστή Hurst και για τα δύο φαινόμενα 0.84 (Τσεκούρας 2012)
- ❑ Ικανοποιητική αναπαραγωγή των στατιστικών χαρακτηριστικών
- ❑ Δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών χωρίς εμμονή

Αιολική ενέργεια (1)

- ❑ Υπολογισμός ταχύτητας ανέμου στο ύψος τοποθέτησης Α/Γ (135 m) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

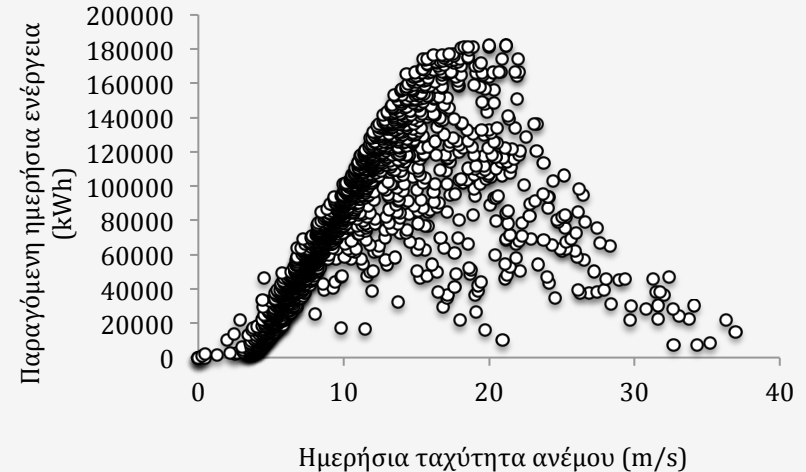
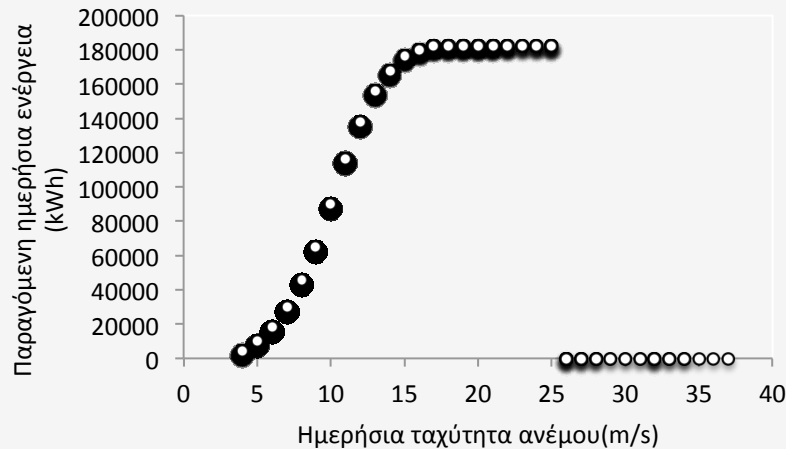
$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}$$

- ❑ Καμπύλη ισχύος Α/Γ
 - Σχέση μη γραμμική
 - Μηδενική ισχύ για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από κάποιο κάτω όριο
 - Μηδενική ισχύ για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από κάποιο πάνω όριο



- ❑ Με χρήση της καμπύλης ισχύος της Α/Γ και των μετεωρολογικών δεδομένων υπολογίζονται:
 - A. Οι ημερήσιες παραγόμενες ενέργειες με χρήση ημερήσιων ταχυτήτων ανέμου
 - B. Οι ημερήσιες παραγόμενες ενέργειες με χρήση ωριαίων ταχυτήτων ανέμου

Αιολική ενέργεια (2)



A. Ημερήσια παραγόμενη ενέργεια με χρήση μέσων ημερήσιων ταχυτήτων ανέμου

B. Ημερήσια παραγόμενη ενέργεια με χρήση μέσων ωριαίων ταχυτήτων ανέμου

- Με χρήση ημερήσιου χρονικού βήματος αμελείται η διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας
- Η διακύμανση οφείλεται στην μη γραμμικότητα της καμπύλης ισχύος ανεμογεννήτριας.

Ημέρες με ίδια μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου



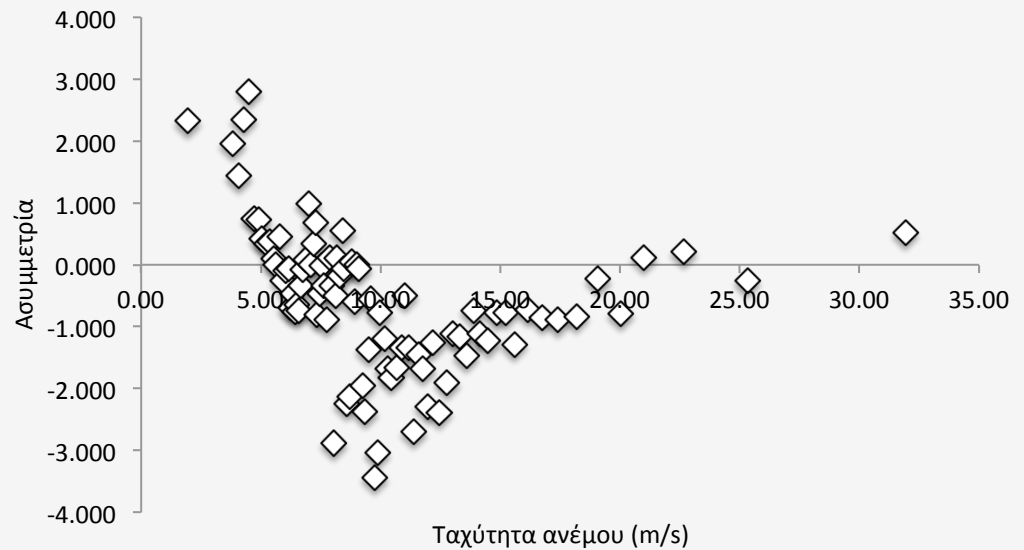
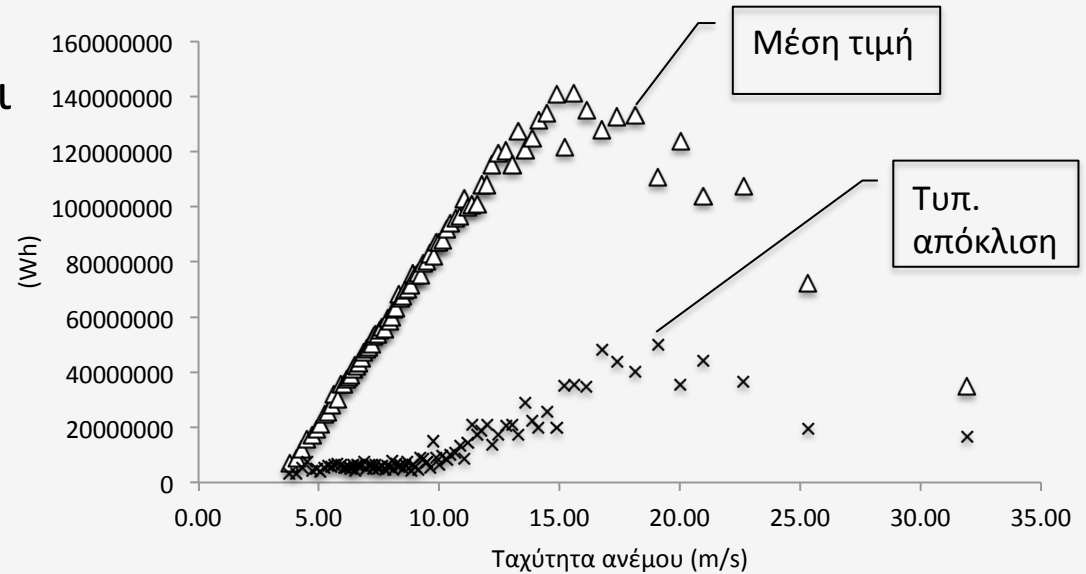
Διαφορετική κατανομή ταχ/των ανέμου



Διαφορετική ημερήσια παραγόμενη ηλ. ενέργεια

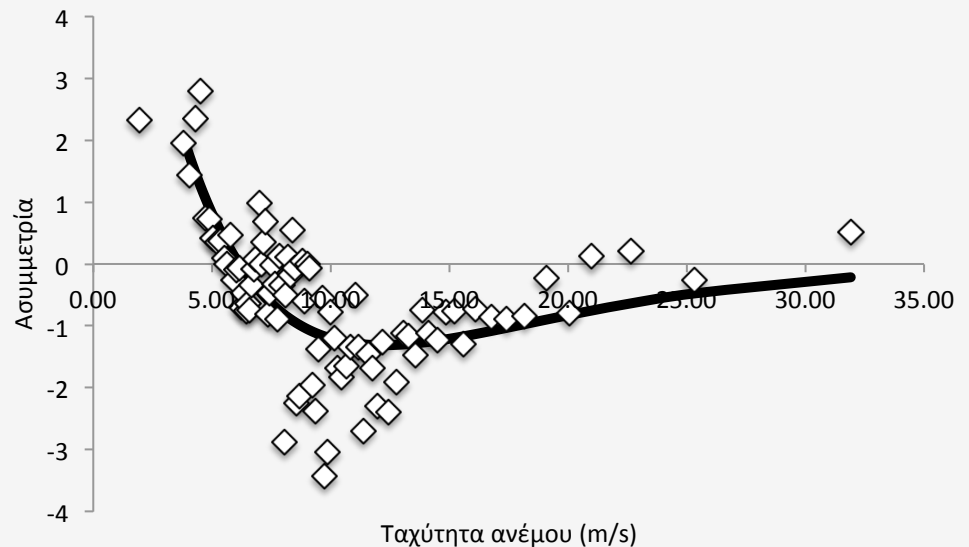
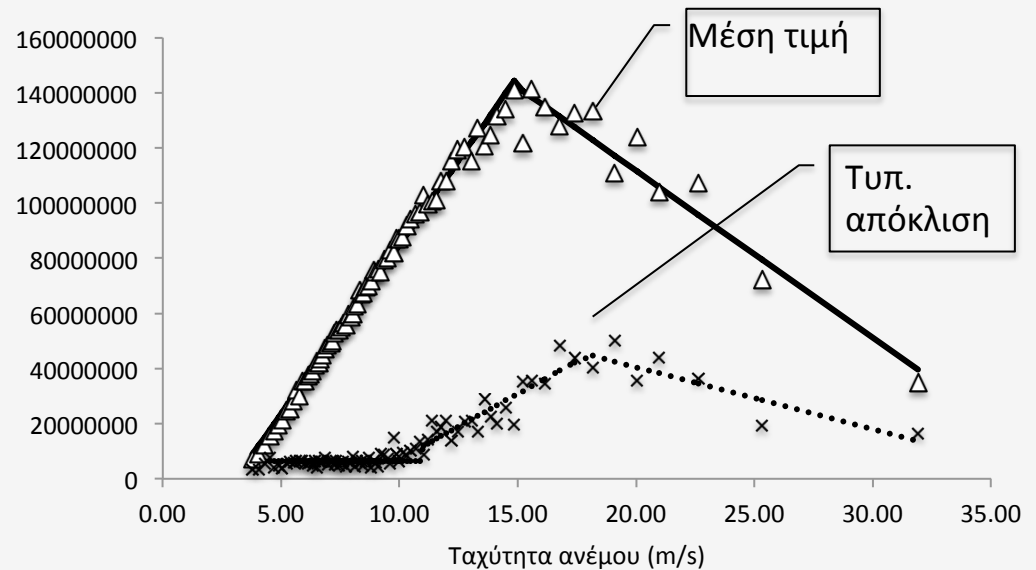
Αιολική ενέργεια (3)

- ❑ Χωρίζονται σε κλάσεις οι τιμές της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας που υπολογίστηκαν με χρήση μέσων ωριαίων ταχυτήτων
- ❑ Για κάθε κλάση υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η ασυμμετρία
- ❑ Η μεταβολή των στατιστικών χαρακτηριστικών έχει κάποια μορφή



Αιολική ενέργεια (4)

- ❑ Προσαρμόζονται συναρτήσεις
- ❑ Θεωρείται πως η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια περιγράφεται από την κατανομή γάμα τριών παραμέτρων
- ❑ Μπορεί να υπολογιστεί η παραγόμενη ενέργεια για κάθε ημερήσια ταχ/τα ανέμου που αντιστοιχεί σε τυχαία πιθανότητα και στα στατιστικά χαρακτηριστικά όπως προκύπτουν

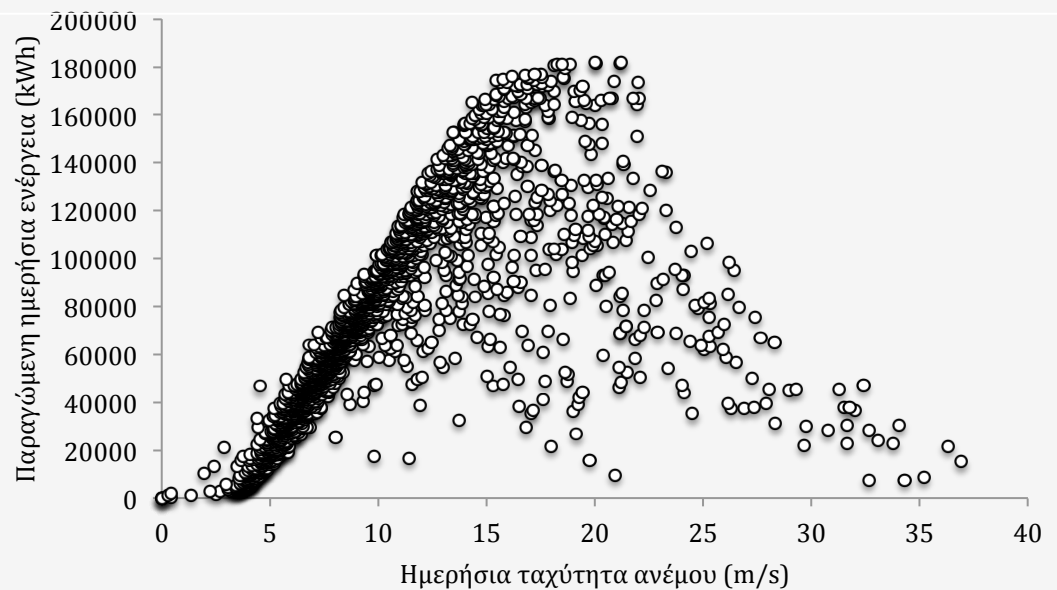
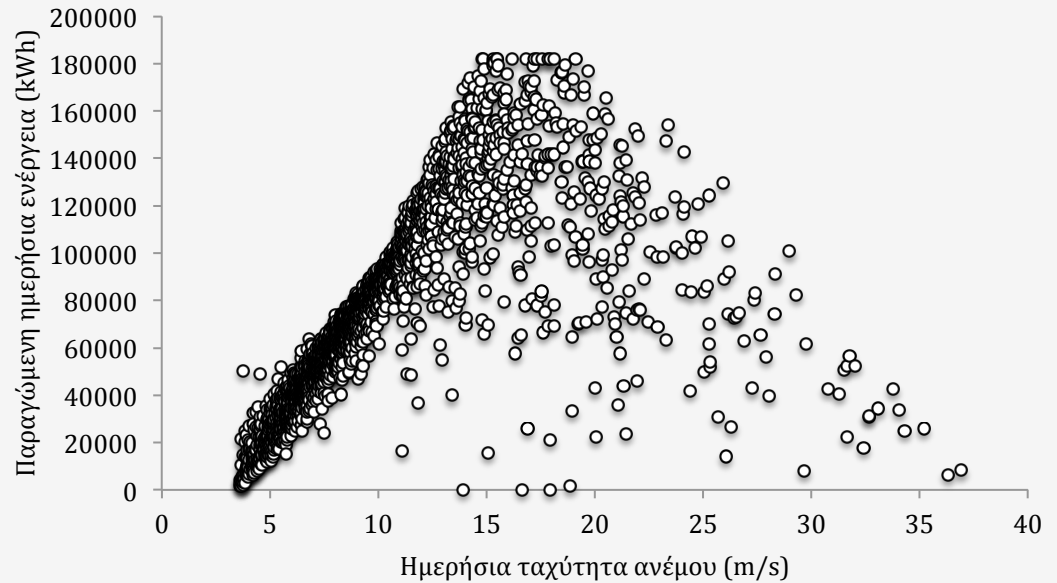


Αιολική ενέργεια (5)

Πάνω: Ημερήσια παραγόμενη ενέργεια με χρήση ημερήσιων ταχυτήτων ανέμου με χρήση της κατανομής γάμα

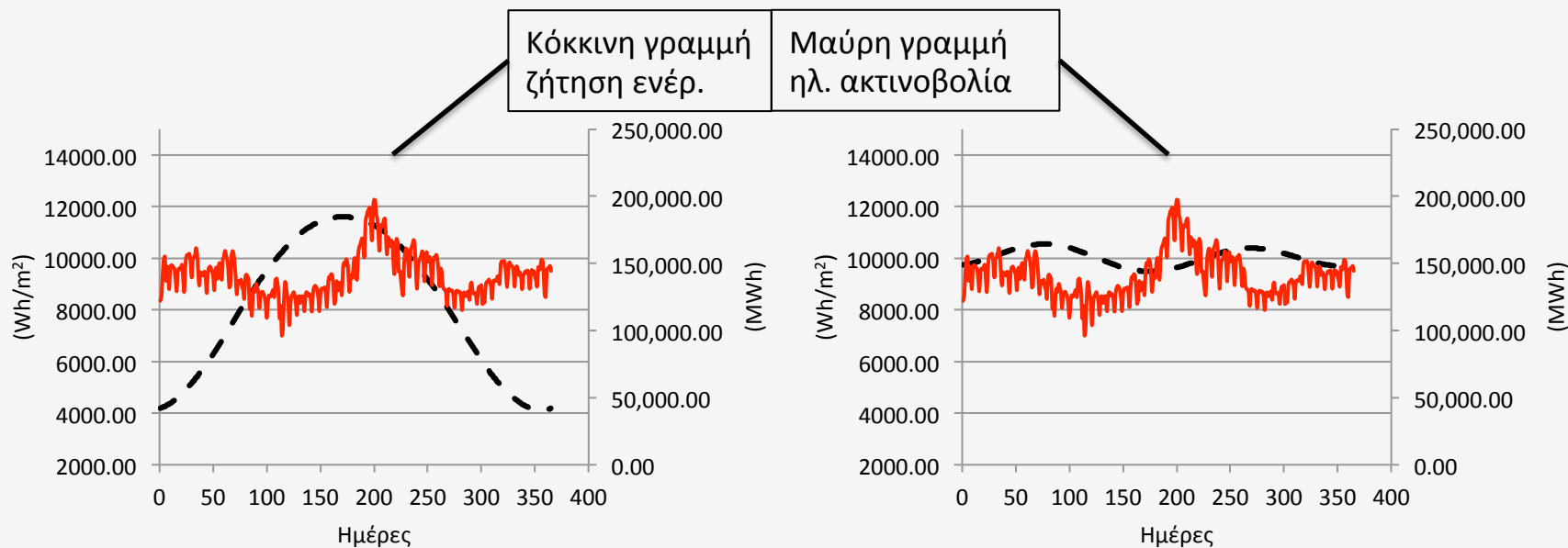
Κάτω: Ημερήσια παραγόμενη ενέργεια με χρήση μέσων ωριαίων ταχυτήτων ανέμου

- Ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας με τις δύο μεθόδους είναι σχεδόν ένα



Ηλιακή ενέργεια (1)

- ❑ Υπολογίζεται η ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία S_0 (Wh/m^2) για επίπεδα διάφορων κλίσεων, (Κολλάρου (2011))
- ❑ Η γωνία που προσπίπτει η μεγαλύτερη ποσότητα ηλ. ακτινοβολίας – για αυτό το γεωγραφικό πλάτος/μήκος – είναι 38°



Ηλ. ακτ. σε κλίση 0° και ζήτηση ενέργειας

Ηλ. ακτ. σε κλίση 38° και ζήτηση ενέργειας

- Χρονική αναντιστοιχία παραγωγής-ζήτησης -> Ανάγκη εξέτασης διάφορων κλίσεων ηλιακού πάνελ

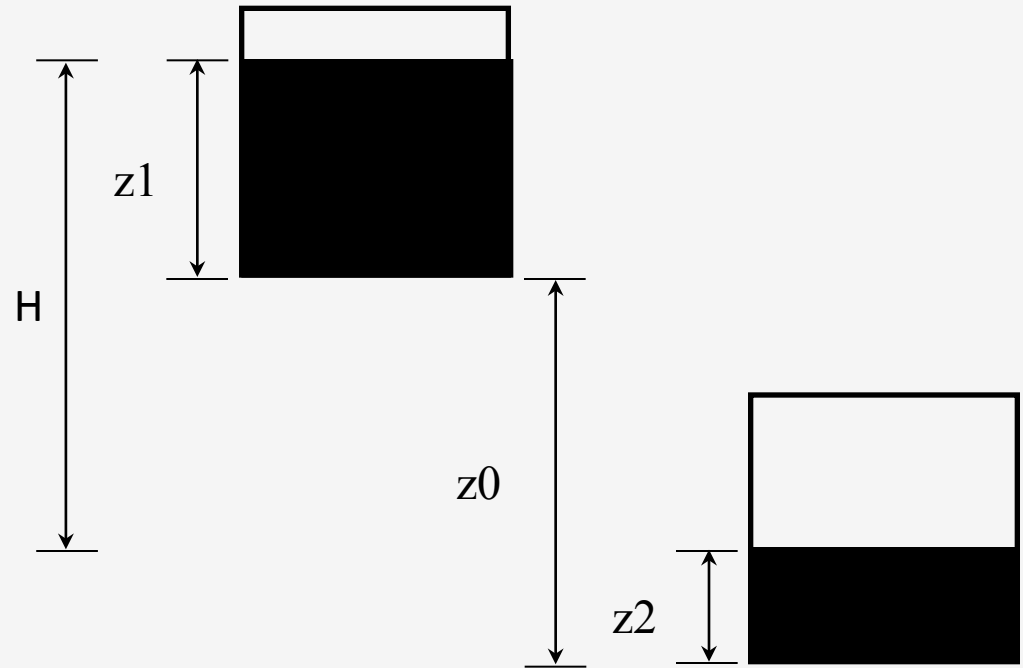
Ηλιακή ενέργεια (2)

- ❑ Η μεταβλητή της συνθετικής χρονοσειράς είναι η διάρκεια ηλιοφάνειας
- ❑ Μετατροπή διάρκειας ηλιοφάνειας σε ηλιακή ακτινοβολία
 - Υπολογισμός αστρονομικής διάρκειας ημέρας N
 - Υπολογισμός συντελεστή απορρόφησης $f_s = a_s + b_s * n / N$ όπου n η διάρκεια ηλιοφάνειας και a_s, b_s συντελεστές
 - Η ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος είναι $S_n = S_0 * f_s$ (Κουτσογιάννης 2000)
- ❑ Υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος για γωνίες κλίσης πάνελ $26^\circ - 38^\circ$
- ❑ Παραγόμενη ηλιακή ενέργεια SE από ένα ηλιακό πάνελ με ισχύ P_{max} και συντελεστή απόδοσης η : $SE = S_n * P_{max} / 1000 * \eta$

- Το κόστος των ηλ. πάνελ ανά MW εγκατεστημένης ισχύος είναι μεγαλύτερο από της αιολικής αλλά το τελικό κόστος επηρεάζεται από:
 - Την διαθεσιμότητα της ενέργειας
 - Την χρονική κατανομή της παραγωγής
 - Την ετεροσυσχέτιση των δύο φαινομένων

Αντλησιοταμίευση (1)

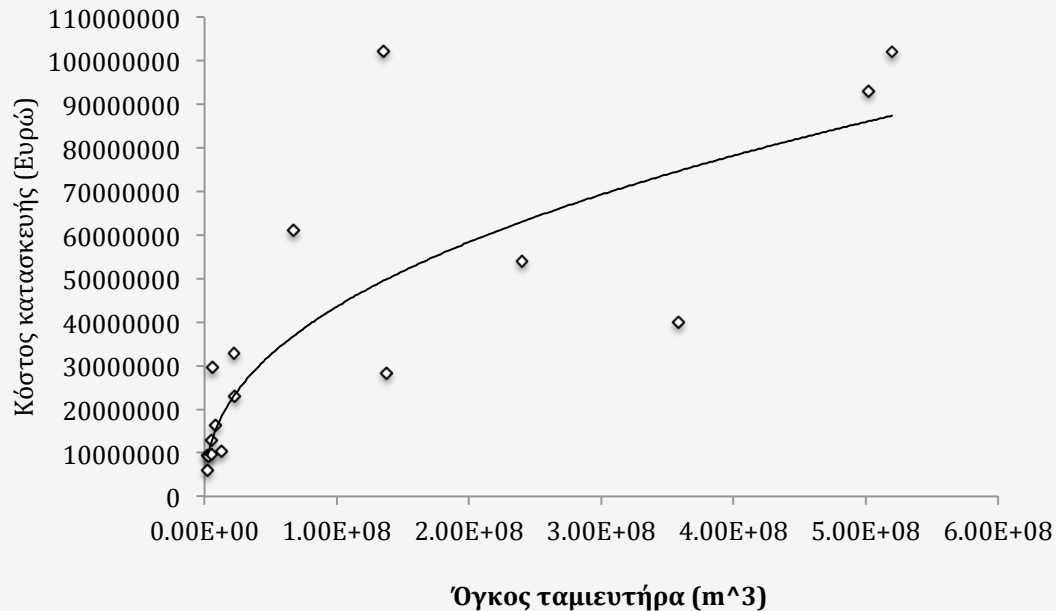
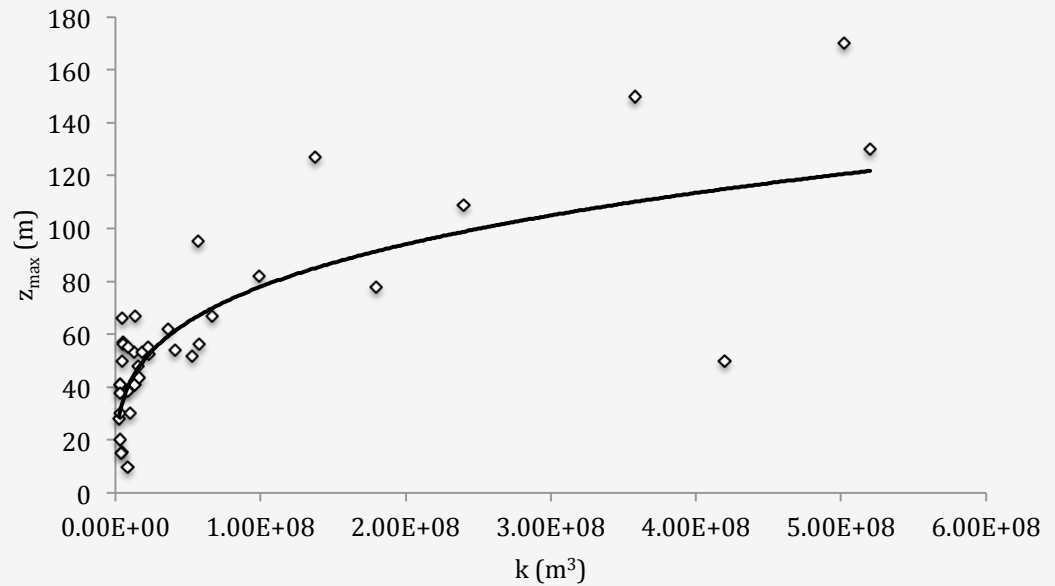
- Ο ανάντη και ο κατάντη ταμιευτήρας έχουν ίδια χωρητικότητα και χαρακτηριστικά
- Αμελούνται εισροές και διαφυγές στους ταμιευτήρες
- Νεκρός όγκος = $0.2 * \text{Χωρητικότητα}$
- Συνολικός όγκος νερού = $1.2 * \text{Χωρητικότητα}$
- $z_0 = 200 \text{ m}$.
- $H = z_0 + z_1 - z_2$
- $s = k * (z / z_{\max})^\zeta$ (Koutsoyiannis & Economou, 2003) όπου s : αποθηκευμένο νερό, k : χωρητικότητα, z : ύψος νερού, z_{\max} : μέγιστο ύψος νερού, ζ : σταθερά
- Συλλογή δεδομένων για τον προσδιορισμό σχέσεων: k - z_{\max} , k -κόστος κατασκευής



Αντλησιοταμίευση (2)

- ❖ Συσχέτιση μέγιστου ύψους και χωρητικότητας ταμιευτήρα:

$$z_{\max} = 0.533 * k^{0.27} \text{ (m)}$$



- ❖ Συσχέτιση κόστους κατασκευής και χωρητικότητας ταμιευτήρα:

$$k_d = 18222 * k^{0.12} \text{ (Ευρώ)}$$

Οικονομική ανάλυση (1)

- ❑ Υπολογίζεται η ετήσια δαπάνη που θα χρειαστεί:
 - Για την απόκτηση και τοποθέτηση του απαραίτητου εξοπλισμού ή την κατασκευή έργων
 - Την αντικατάσταση του εξοπλισμού εάν αυτή χρειάζεται
 - Το κόστος συντήρησης
- ❑ Ωφέλιμος χρόνος ζωής του υβριδικού σταθμού 50 χρόνια
- ❑ Χρόνος απόσβεσης 50 χρόνια
- ❑ Αποπληθωρισμένο επιτόκιο i λαμβάνεται 6%.
- ❑ Αναγωγή σε αρχικό κόστος P που πρέπει να γίνει για τα κεφάλαια F που δαπανούνται ύστερα από την αρχή της λειτουργίας του έργου :

$$P = \frac{F}{(1+i)^n}$$

όπου n τα έτη που μεσολαβούν από την αρχή μέχρι την εκταμίευση του ποσού, (Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης, 2007)

- ❑ Η αναγωγή του αρχικού κόστους P σε ετήσια δαπάνη A :

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

όπου n ο χρόνος απόσβεσης, (Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης, 2007)

Οικονομική ανάλυση (2)

➤ Για τον υπολογισμό του κόστους έγιναν απλοποιητικές παραδοχές

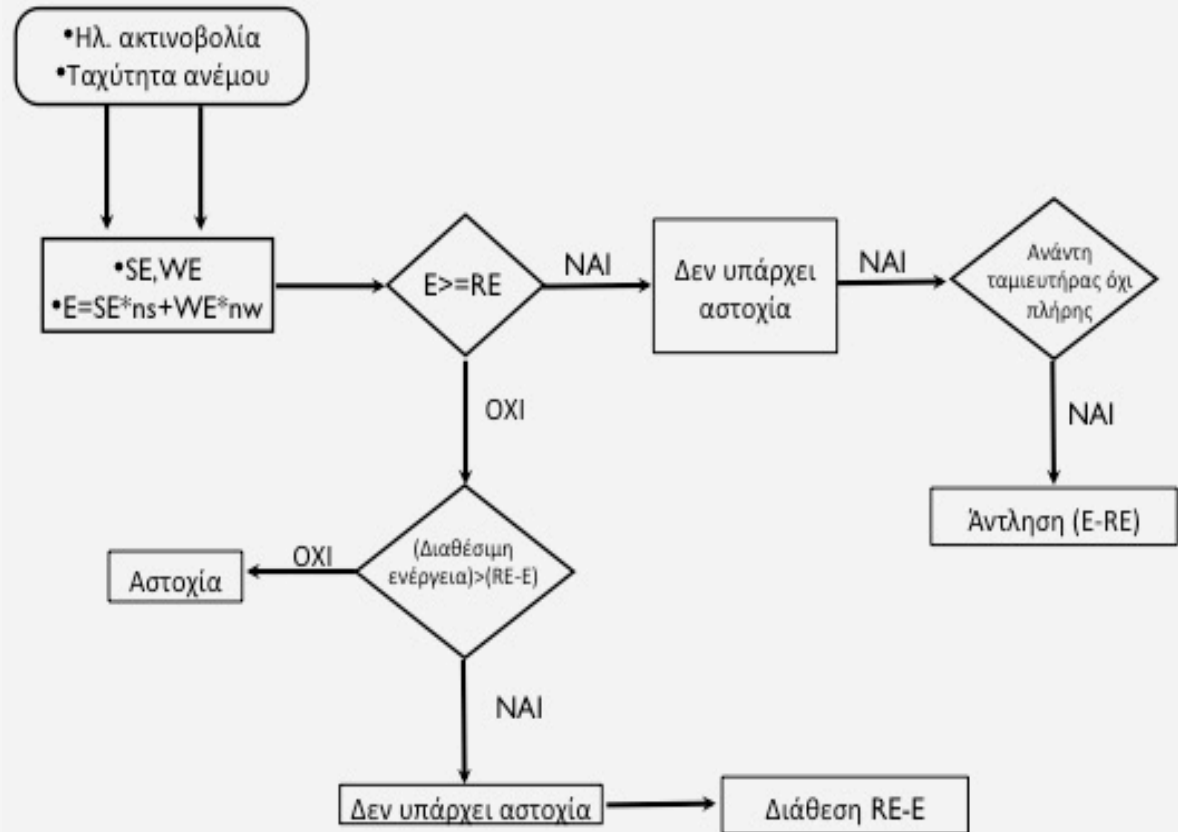
- Κόστος απόκτησης και εγκατάστασης Α/Γ 1 150 000 Ευρώ/MW εγκατεστημένης ισχύος
- Κόστος απόκτησης και εγκατάστασης ηλιακών πάνελ 2 000 000 Ευρώ/MW εγκατεστημένης ισχύος
- Κόστος κατασκευής ταμιευτήρων όπως αναφέρθηκε επί 2
- Κόστος απόκτησης και εγκατάστασης αντλιοστροβίλου 470* (εγκατεστημένη ισχύς άντλησης(KW))+5000*(μέγιστη παροχή άντλησης (m³/s)), (Ι. Στεφανάκος)
- Χρόνος ζωής Α/Γ,ηλιακών πάνελ και αντλιοστροβίλου 25 χρόνια
- Χρόνος ζωής ταμιευτήρων 50 χρόνια
- Ετήσιο κόστος συντήρησης Α/Γ 2% του αρχικού κόστους
- Ετήσιο κόστος συντήρησης ηλιακών πάνελ 1% του αρχικού κόστους
- Ετήσιο κόστος συντήρησης ταμιευτήρων 0.5% του αρχικού κόστους
- Ετήσιο κόστος συντήρησης αντλιοστροβίλου 1% του αρχικού κόστους

Προσομοίωση της λειτουργίας (1)

- ❑ Αλγόριθμος που προσομοιώνει την λειτουργία του συστήματος σε κάθε ημερήσιο χρονικό βήμα
- ❑ Είσοδοι:
 - Αριθμός Α/Γ, ηλ. πάνελ και όγκος ταμιευτήρων
 - Συνθετικές χρονοσειρές μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας
 - Συνθετική χρονοσειρά ζήτησης ενέργειας
- ❑ Έξοδοι:
 - Αστοχία
 - Εγκατεστημένη ισχύς άντλησης
 - Μέγιστη παροχή άντλησης
 - Ετήσιο κόστος
- ❑ Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται 182 621 φορές, δηλ. όσες οι ημέρες των 500 ετών
- ❑ Αρχικά ο ανάντη ταμιευτήρας έχει πληρωθεί κατά το ήμισυ $s = 0.5 \cdot k$ άρα ο κατάντη $s_2 = 0.7 \cdot k$

Προσομοίωση της λειτουργίας (2)

- ❑ Προσδιορίζεται η παραγόμενη ενέργεια E
- ❑ Ελέγχεται αν η παραγόμενη ενέργεια καλύπτει την ζήτηση RE
- ❑ Εάν επαρκεί ή υπάρχει περίσσεια τότε δεν παρατηρείται αστοχία
- ❑ Εάν ο ανάντη ταμιευτήρας δεν είναι πλήρης αντλείται νερό
- ❑ Εάν η παραγόμενη ενέργεια δεν επαρκεί διατίθεται υδροηλεκτρική ενέργεια
- ❑ Εάν η αποθηκευμένη ενέργεια δεν επαρκεί τότε καταγράφεται αστοχία



Βελτιστοποίηση

- ❑ Η διαδικασία της βελτιστοποίησης γίνεται με την μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων
- ❑ Αντικείμενο της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και συντήρησης του υβριδικού σταθμού με τον περιορισμό η αστοχία να είναι μικρότερη ή ίση του 100 σε όλο το μήκος προσομοίωσης
- ❑ Ο γενετικός αλγόριθμος μεταβάλλει τον αριθμό των ανεμογεννητριών n_w και των ηλιακών πάνελ n_s καθώς και τον όγκο των ταμιευτήρων k
- ❑ Για κάθε ένα συνδυασμό n_w, n_s, k που προκύπτει εκτελείται ο επαναληπτικός αλγόριθμος προσομοίωσης
- ❑ Με χρήση των n_w, n_s, k , μέγιστη ισχύς άντλησης και μέγιστη παροχή άντλησης υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δηλαδή το ετήσιο κόστος
- ❑ Έπειτα από πολλές επαναλήψεις ο γενετικός αλγόριθμος συγκλίνει σε μία λύση

Ανάλυση σεναρίων (1)

- ❖ Συνθετικές χρονοσειρές με Hurst που αντιστοιχεί στα φαινόμενα και μειωμένο Hurst:

Hw=0.85, Hs=0.83				Hw=0.64, Hs=0.61			
nw	23	Μαχα (MW)	124	nw	23	Μαχα (MW)	125
ns	0	Μαχq (m ³ /s)	63	ns	0	Μαχq (m ³ /s)	62
k(hm ³)	250	L	89	k(hm ³)	195	L	100
κε (εκ. Ευρώ)	33.6			κε (εκ. Ευρώ)	32.8		

- ❖ Μέγιστος αριθμός ανεμογεννητριών 12:

Γ. πάνελ	26	28	30	32	34	36	38
nw	12	12	12	12	12	12	12
ns	480 000	480 000	480 000	480 000	480 000	480 000	480 000
k (hm ³)	160	150	140	135	130	125	125
Μαχα (MW)	76	76	76	76	76	76	76
Μαχq (m ³ /s)	35	35	34	34	34	34	34
L	95	90	96	94	100	100	95
κε (εκ. Ευρω)	45.5	45.2	45.1	45	44.9	44.7	44.7

Ανάλυση σεναρίων (2)

- Ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος στον εξυπηρετούμενο πληθυσμό

Πληθυσμός	25 000	50 000	100 000	200 000
n _w	6	12	23	46
n _s	0	0	0	0
k (hm ³)	45	90	250	490
κε (εκ. Ευρώ)	10.8	18.7	33.6	61.4

- Δεν εξετάστηκε σενάριο με τις επιδοτούμενες τιμές δηλαδή με στόχο την μεγιστοποίηση της προσόδου. Η τιμή της ηλιακής ενέργειας μικρότερη της αιολικής -> ίδια αποτελέσματα
- Δεν προσεγγίσθηκε με χρήση της νομοθεσίας για τους υβριδικούς σταθμούς καθώς το πνεύμα αυτής είναι η εξασφάλιση μέρους της ενέργειας μέσω του υβριδικού σταθμού και όχι αυτονομία. Ταυτόχρονα η κοστολόγηση της ενέργειας προκύπτει για κάθε περιοχή ξεχωριστά

Τελικά συμπεράσματα

- ❑ Για το βασικό σενάριο της πιλοτικής εφαρμογής προέκυψε ένα έργο μεγάλης κλίμακας ετήσιου κόστους 33.6 εκ. Ευρώ

✧ Ενδεικτικά η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας που προκύπτει αποτελεί περίπου το 11% της ήδη εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ελλάδα

- ❑ Κόστος 63 Ευρώ/MWh, 9% ακριβότερο από την μέση οριακή τιμή συστήματος
- ❑ Αμέληση της εμμολής οδηγεί σε υποδιαστασιολόγηση
- ❑ Η ηλιακή ενέργεια δεν είναι συμφέρουσα για την πιλοτική εφαρμογή
- ❑ Βέλτιστη γωνία τοποθέτησης αυτή που αποδίδει την περισσότερη ενέργεια
- ❑ Με χρήση αιολικής ενέργειας απαιτείται μεγαλύτερος όγκος ταμιευτήρα
- ❑ Ομαλή αύξηση των μεγεθών του σχεδιασμού με την αύξηση του πληθυσμού
- ❑ Ευαισθησία των αποτελεσμάτων στις παραδοχές

Ευχαριστώ πολύ!