



*ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ*

***Πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης για την  
αναπαράσταση των υδατικών, ενεργειακών και  
οικονομικών ροών σε ένα μη διασυνδεδεμένο νησί***

**Μαυριτσάκης Παναγιώτης**

Επιβλέπων: Ευστρατιάδης Ανδρέας, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΔΙΠ ΕΜΠ

Υπεύθυνος Καθηγητής: Μαμάσης Νικόλαος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2019

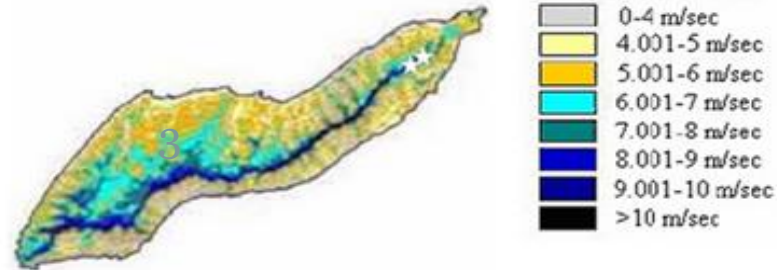
Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί:

- η **μοντελοποίηση** και **βελτιστοποίηση** του Υβριδικού Συστήματος Ενέργειας (ΥΒΕ) της -μη διασυνδεδεμένης με το ηπειρωτικό δίκτυο- Ικαρίας και
- η **προσομοίωση** υποθετικού χρηματιστηρίου ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του νησιού.

Ερευνητικοί στόχοι:

- Αντιμετώπιση της **στοχαστικής συμπεριφοράς** των ΑΠΕ στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο
- Βελτιστοποίηση κρίσιμων μεγεθών του συστήματος
- Αντιμετώπιση του **μονοπωλιακού χαρακτήρα** του πετρελαϊκού σταθμού
- Προσομοίωση χρηματιστηρίου ενέργειας τριών παικτών
- Σύγκριση υφιστάμενου μοντέλου "εγγυημένης τιμής" ΑΠΕ με τη λειτουργία ενός υποθετικού χρηματιστηρίου ενέργειας
- Μείωση της τιμής της προσφερόμενης ενέργειας σε μη διασυνδεδεμένο νησί
- Καθορισμός προσφορών των ενεργειακών παικτών
- Ανάπτυξη **μοντέλου πρόβλεψης** της παραγόμενης αιολικής ενέργειας έως και 36 ώρες μπροστά
- Βελτιστοποίηση χρηματιστηρίου ενέργειας με στόχο την επίτευξη κέρδους από τους τρεις αντισυμβαλλόμενους, με μείωση της Οριακής Τιμής Συστήματος

# Περιοχή Μελέτης: Ικαρία



- Έκταση: 255 km<sup>2</sup>;
- 8.423 μόνιμοι κάτοικοι (απογραφή 2011), έως και 20.000 κατά τη θερινή περίοδο;
- Κυρίως ορεινό ανάγλυφο (υψηλότερη κορυφή 1051 m).



- Ετήσια αρδευτική ζήτηση: 448.000 m<sup>3</sup>;
- Ήπιο κλίμα, ισχυροί καλοκαιρινοί άνεμοι, που ονομάζονται Μελτέμια.



Ταμιευτήρας ωφέλιμου όγκου 910.000 m<sup>3</sup> (+721,0 m, η μέγιστη στάθμη);

Δύο δεξαμενές, 80.000 m<sup>3</sup> η καθεμία (μέγιστες στάθμες +554,0 m και +50,0 m);

ΥΗΣ Προεσπέρας, ονομαστικής ισχύος 1,05 MW;

ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, ονομαστικής ισχύος 3,10 MW;

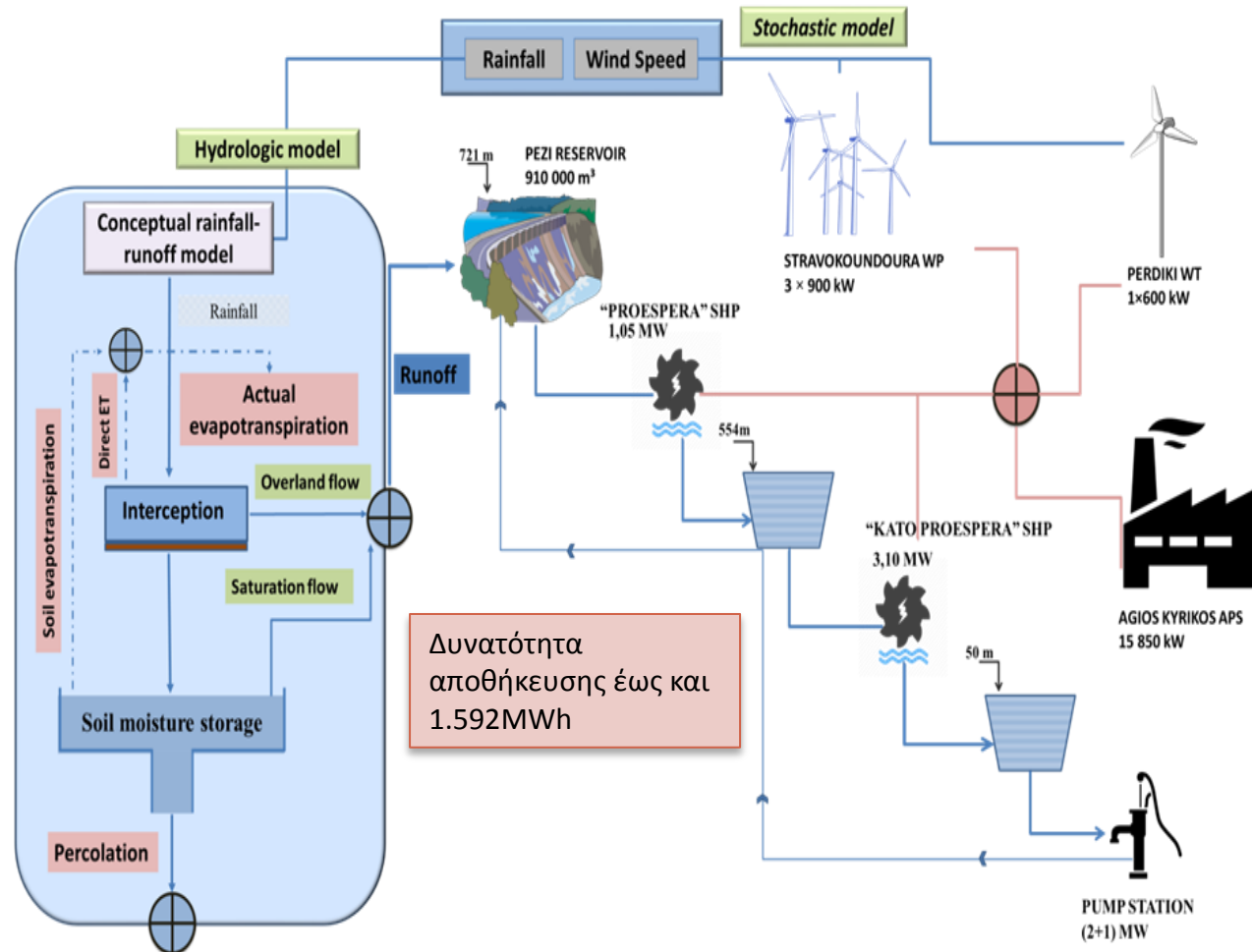
Ανλιοστάσιο στην Κάτω Προεσπέρα, 12 αντλιών ισχύος 250 kW έκαστη, εκ των οποίων οι 4 εφεδρικές;

Αιολικό πάρκο στην Στραβοκουνδούρα με 3 A/G Enercon 900 kW;

A/G 600 kW στο Περδίκι;

Πετρελαϊκός σταθμός ονομαστικής ισχύος 15,85 MW στον Άγιο Κήρυκο.

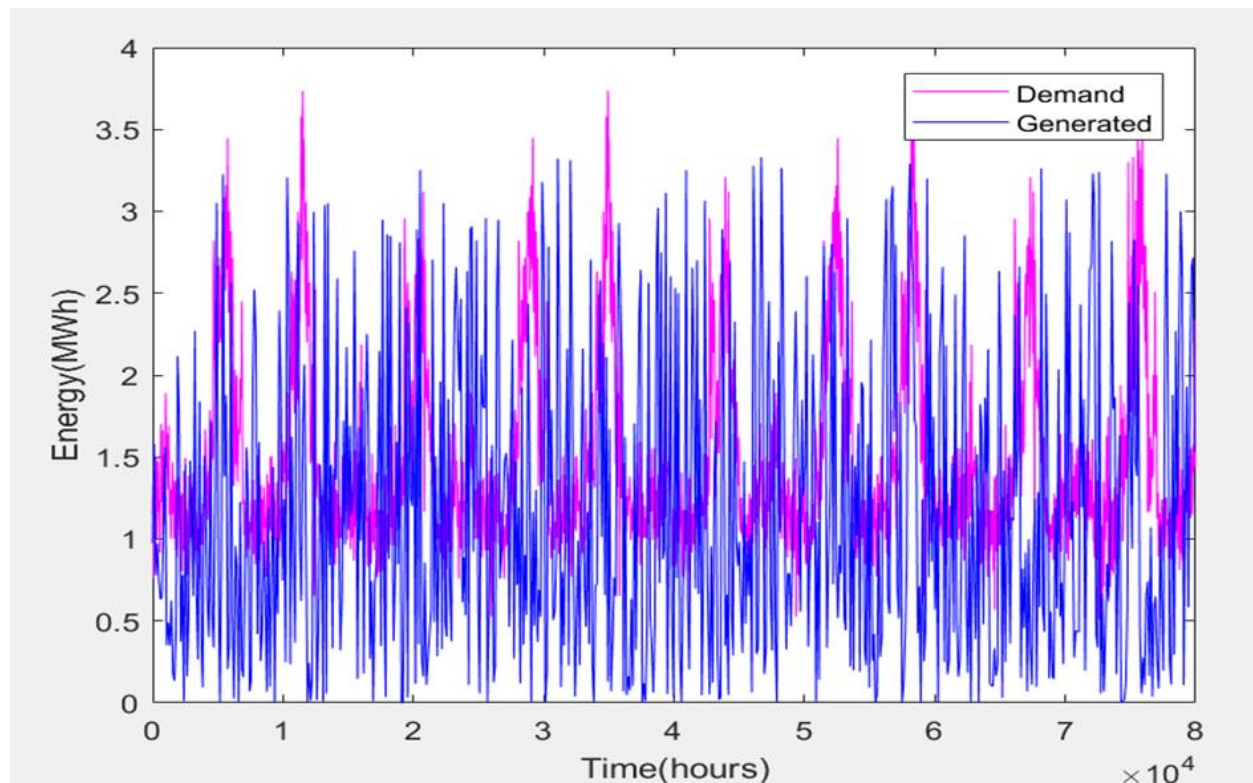
## Σχηματική απεικόνιση ΥΒΕ Ικαρίας



# Τοποθέτηση Προβλήματος

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αναντιστοιχίας ζήτησης ενέργειας και παραγόμενης αιολικής ενέργειας

- Συντελεστής δυναμικότητας: 27,6%
- Κατά μέσο όρο 62% της παραγόμενης ενέργειας εισέρχεται απευθείας στο δίκτυο
- Περίπου 2.685 MWh/έτος θα ήταν ανεκμετάλλευτα χωρίς το σύστημα αντλησιοταμίευσης

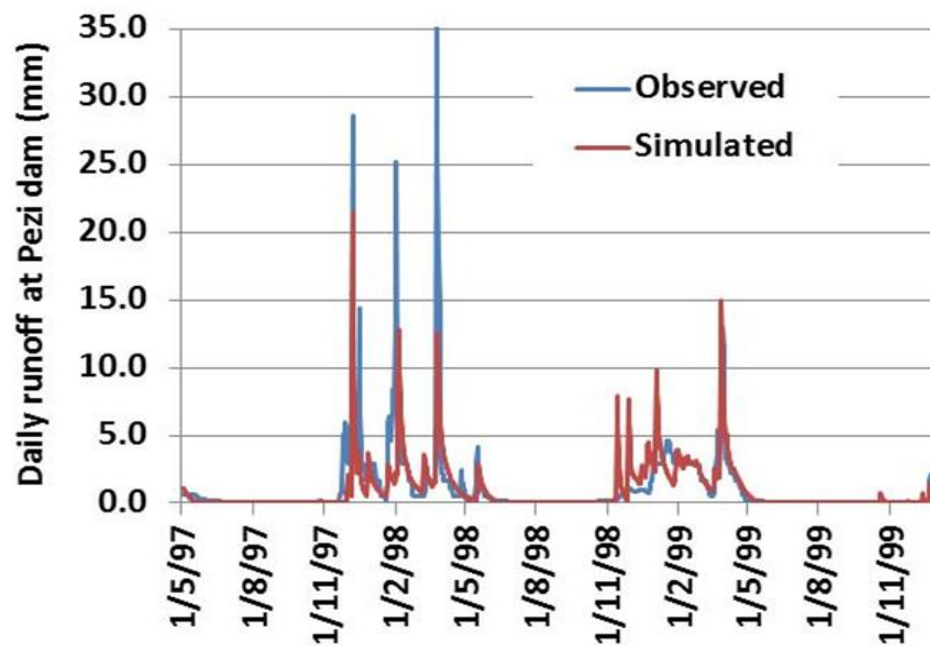


Στόχος των υβριδικών συστημάτων είναι ο **συγχρονισμός** της ενέργειας που προσφέρεται από διαφορετικές πηγές με τη ζήτηση, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της παραγωγής ενέργειας.

# Δεδομένα Εισόδου (1/3)

- Έλλειψη δεδομένων απορροών → κατάρτιση ημερήσιου **υδρολογικού μοντέλου** μετασχηματισμού βροχοπτώσεων σε απορροές (**εισροές στο φράγμα**)
- Σε κάθε χρονικό βήμα, η απορροή προσδιορίζεται ως άθροισμα των ροών στην ακόρεστη, στην υπόγεια και στην επιφανειακή ζώνη
- Δεδομένα εισόδου: ημερήσια κατακρήμνιση και δυνητική εξατμοδιαπνοή
- Εκτίμηση έξι εννοιολογικών παραμέτρων μέσω βαθμονόμησης

Τροφοδοσία βαθμονομημένου μοντέλου με ημερήσιες **συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης** για την παραγωγή **συνθετικών εισροών στον ταμιευτήρα Πέζι**





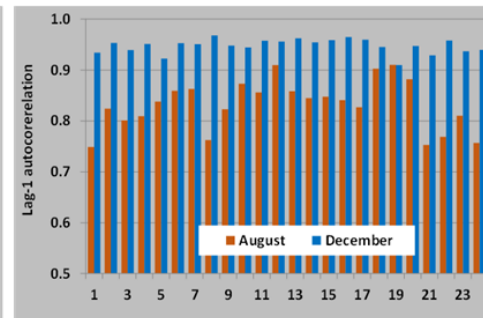
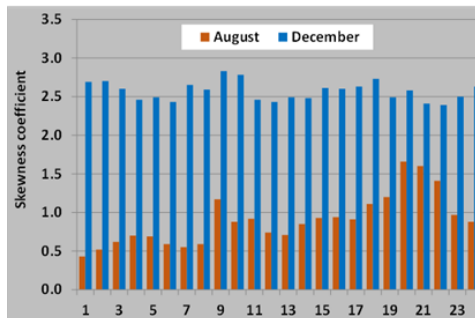
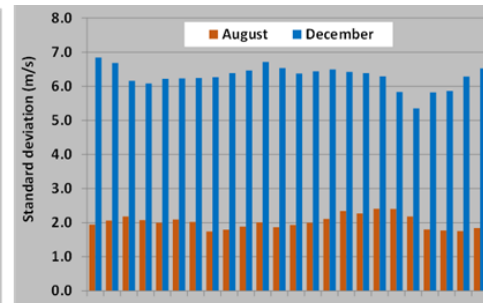
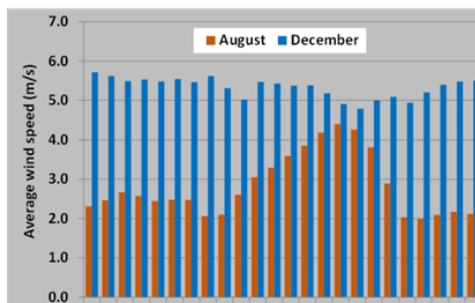
# Δεδομένα Εισόδου (2/3)

- Ιστορικά ανεμολογικά δεδομένα επτά ετών, μέσου όρου 5,4 m/s και τυπικής απόκλισης 6,6 m/s
- Παραγωγή ωριαίων συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου μήκους 1.000 ετών με το στοχαστικό μοντέλο SPARTA
- Μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου με αναφορά στο υψόμετρο μέτρησης σε ταχύτητα στην πτερωτή της Α/Γ:

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

## Μοντέλο SPARTA:

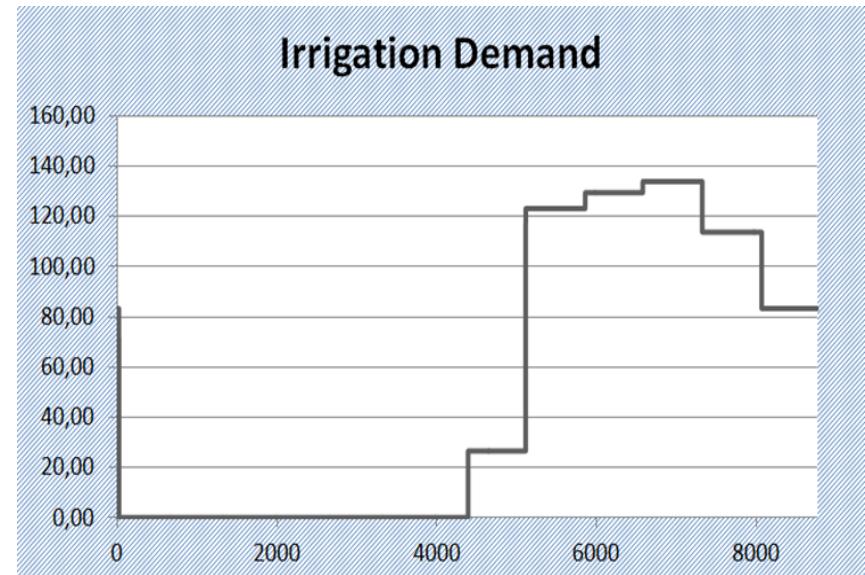
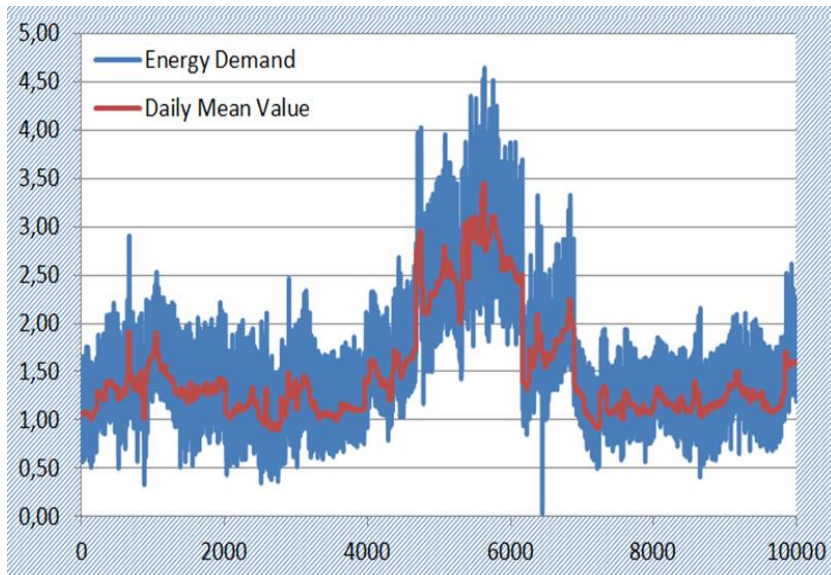
- Διατήρηση διπλής κυκλοστασιμότητας που χαρακτηρίζει τα ανεμολογικά δεδομένα σε:
  - ✓ εποχιακό κύκλο
  - ✓ ημερήσιο κύκλο
- Ύπαρξη διαλείψεων, μεγάλη ασυμμετρία
- Ισχυρή **αυτοσυσχέτιση** σε μικρές κλίμακες



# Δεδομένα Εισόδου (3/3)

- Έλλειψη δεδομένων ενεργειακής ζήτησης → γραμμική μετατροπή δεδομένων Αστυπάλαιας
- Μέση ζήτηση ενέργειας: 1,60MW
- Δύο μοτίβα παρατηρούνται:
  - Δραστική αύξηση κατά τη θερινή περίοδο
  - Μείωση κατά το Σαββατοκύριακο

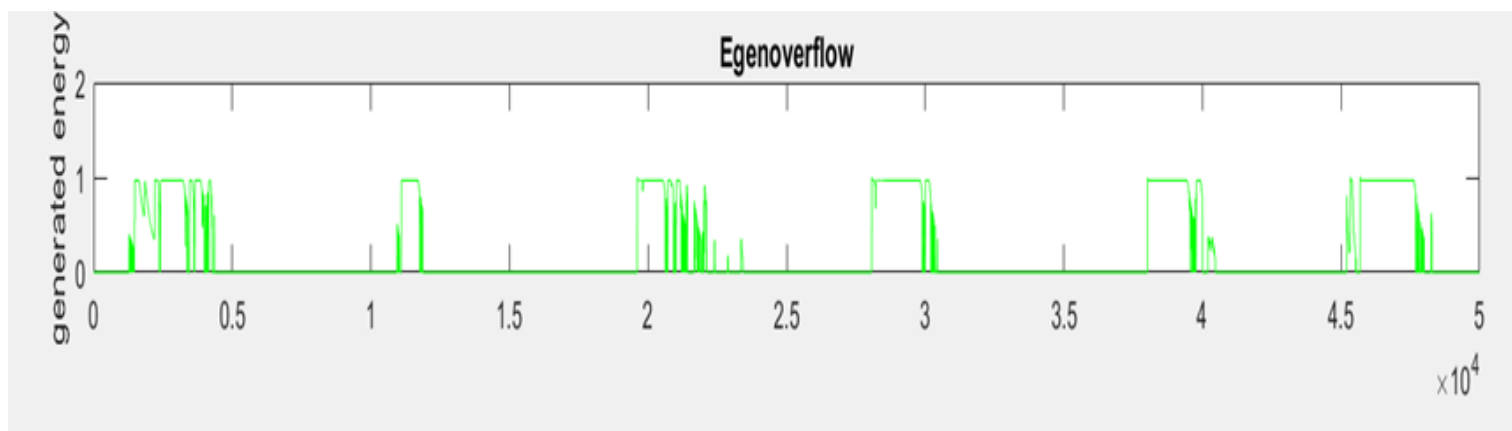
- Το φράγμα Πέζι ικανοποιεί το 80% των αρδευτικών ζητήσεων του νησιού (το υπόλοιπο καλύπτεται από γεωτρήσεις)
- Ετήσια αρδευτική ζήτηση: 448.000 m<sup>3</sup>
- Δραστικές **διαφοροποιήσεις** ανάμεσα σε χειμερινή και θερινή περίοδο





# Λειτουργία ΥΒΕ (1/4)

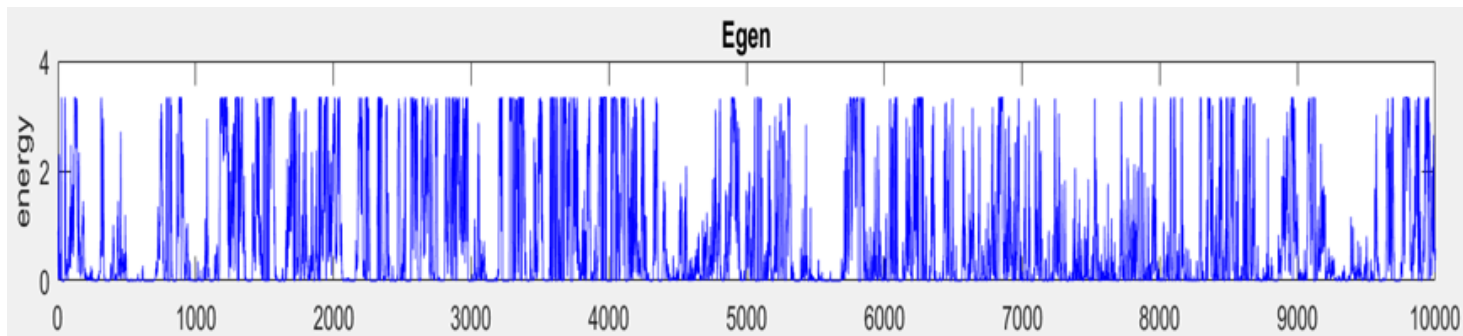
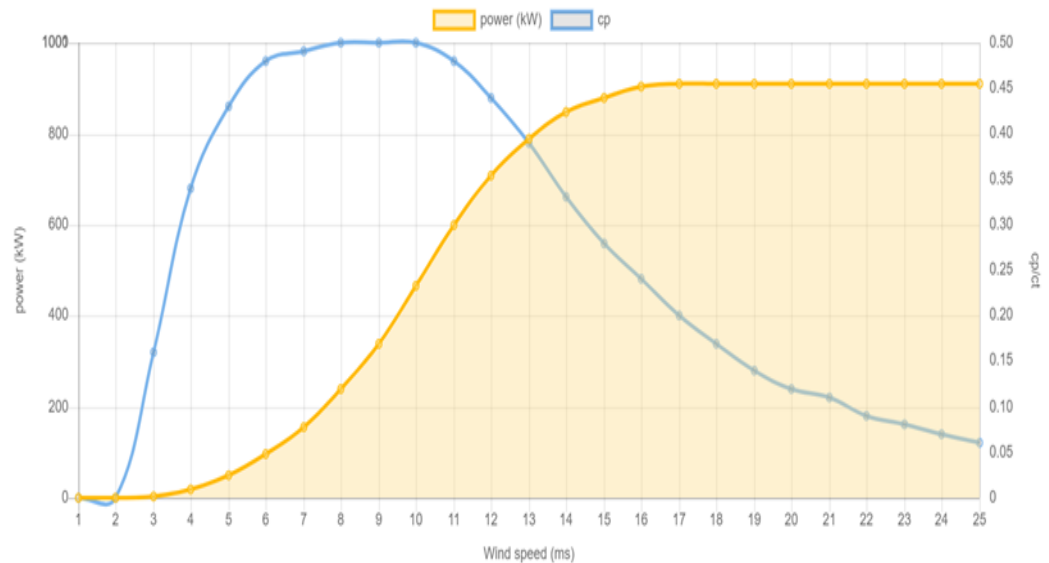
- Προσομοίωση 45 ετών σε Matlab® με ωριαίο χρονικό βήμα
- Εξετάζεται η περίπτωση υπερχείλισης του ταμιευτήρα και η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας, η οποία συντελείται κατά τη χειμερινή περίοδο λόγω αυξημένων απορροών και μειωμένων αρδευτικών ζητήσεων



- Περίπτωση υπερχείλισης του ταμιευτήρα προκύπτει περίπου στο 35% των βημάτων
- Μέση παραγωγή ενέργειας: 0,52 MWh
- Η ενέργεια λόγω υπερχείλισης μπαίνει **πρώτη στο δίκτυο** σε μειωμένη τιμή
- Επόμενο βήμα η ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών, κατά την οποία διερευνάται η περίπτωση αστοχίας και μετράται το μέσο έλλειμμα

# Λειτουργία ΥΒΕ (2/4)

- Εισάγοντας τα ωριαία ανεμολογικά δεδομένα στην καμπύλη ισχύος της Α/Γ προκύπτει η ωριαία παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου
- Λόγω έλλειψης δεδομένων, η παραγωγή της Α/Γ στο Περδίκι προκύπτει με αναγωγή της ισχύος των δύο μονάδων
- **Αδυναμία παραγωγής ενέργειας** στο 25% των χρονικών βημάτων
- Μέση παραγωγή: 0,82 MWh
- Δημιουργία ενεργειακών ελλειμμάτων στο 74,30% των χρονικών βημάτων, με μέση τιμή 1,23 MWh



# Λειτουργία ΥΒΕ (3/4)

- Κάλυψη ενεργειακών ελλειμμάτων αξιοποιώντας είτε τη διαδρομή Ταμιευτήρας-Άνω Δεξαμενή είτε την Άνω Δεξαμενή-Κάτω Δεξαμενή
- Κριτήρια οι **εποχιακές ρυθμίσεις** και η **πληρότητα των ταμιευτήρων**

## Κανόνες Λειτουργίας Ταμιευτήρα:

- Δεν επιτρέπεται η λειτουργία του ΜΥΗΣ Προεσπέρας την θερινή περίοδο (Μάιος-Σεπτέμβριος)
- Ελάχιστος επιτρεπόμενος όγκος:
  - Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου: 500.000 m<sup>3</sup>
  - Ιανουαρίου-Μαρτίου: 819.259 m<sup>3</sup>
  - 1<sup>η</sup> έως 14<sup>η</sup> Απριλίου: γραμμικά έως 862.730 m<sup>3</sup>
  - 14<sup>η</sup> Απριλίου έως Μάιο: 862.730 m<sup>3</sup>

- Αν ικανοποιούνται οι εποχιακές ρυθμίσεις και η πληρότητα της Άνω Δεξαμενής είναι σχετικά χαμηλή, τότε επιλέγεται η διαδρομή Ταμιευτήρας-Άνω Δεξαμενή
- Η ποσότητα νερού που πρέπει να απελευθερωθεί ώστε να καλυφθεί το **ενεργειακό έλλειμμα** εκτιμάται ως:

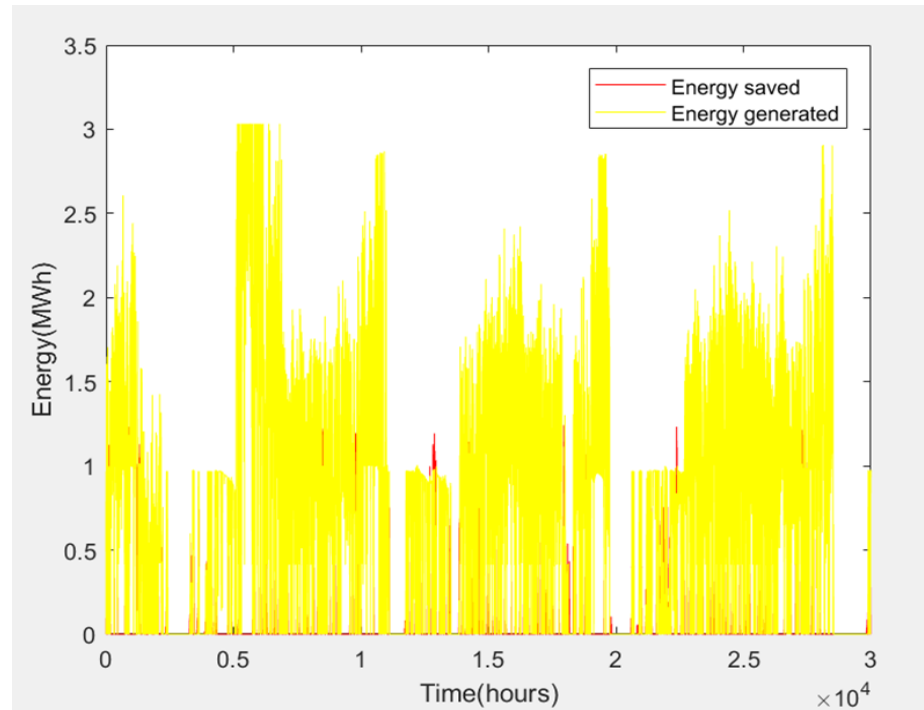
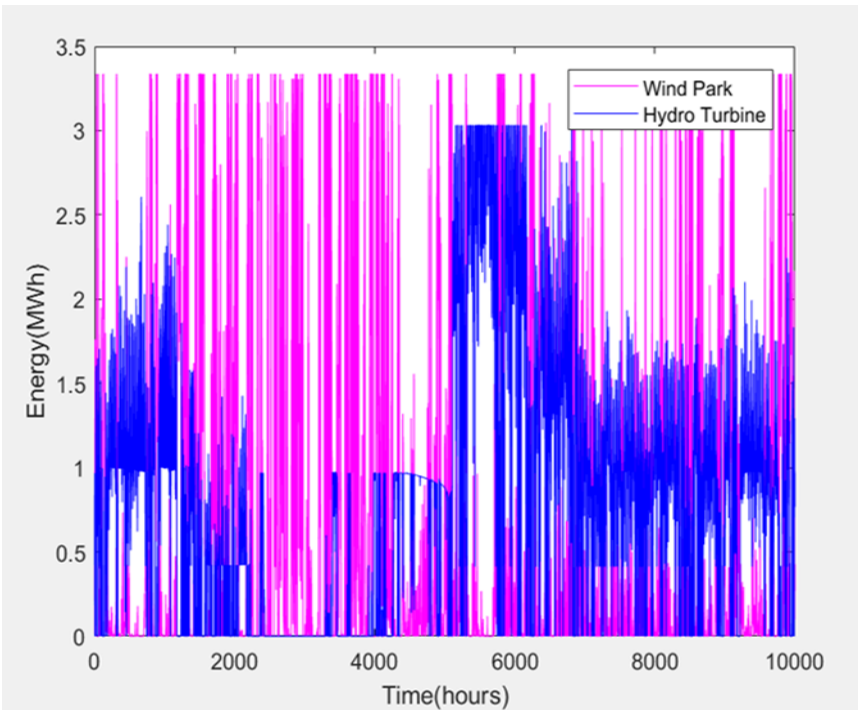
$$Q = \text{Def.} / (\text{Tur. eff.} \times 9.81 \times (\text{H}_{\text{res}} - \text{H}_{\text{upper}}))$$

- Προσδιορισμός υδραυλικών απωλειών, έλεγχοι παροχетеυτικότητας αγωγών, ελάχιστης παροχής για τη λειτουργία του ΥΗΣ και εναπομείνοντος αποθέματος ταμιευτήρων
- Αντίστοιχα για τη διαδρομή Άνω Δεξαμενή-Κάτω Δεξαμενή

# Λειτουργία ΥΒΕ (4/4)

- Αποθήκευση ενεργειακών πλεονασμάτων μέσω **άντλησης** νερού από την κάτω προς την άνω δεξαμενή
- Η ποσότητα νερού που μπορεί να αντληθεί δεδομένου του **ενεργειακού πλεονάσματος** υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = \text{Sur} \times \text{Pump}_{\text{eff}} / (9.81 \times (\text{H}_{\text{upper}} - \text{H}_{\text{lower}}))$$



# Σύγκριση Διαφορετικών Προσομοιώσεων

## Προσομοίωση ΥΒΕ Νο 1

- Χωρίς **εποχιακές ρυθμίσεις** → επιλογή διαδρομής Ταμιευτήρας-Άνω Δεξαμενή αν:
  - είτε η πληρότητα του ταμιευτήρα είναι άνω του 40%
  - είτε η πληρότητα της άνω δεξαμενής κάτω του 5%
- Δυνατότητα **άντλησης** προς τον ταμιευτήρα → επιλογή διαδρομής Κάτω Δεξαμενή-Άνω Δεξαμενή αν:
  - είτε η πληρότητα του ταμιευτήρα είναι κάτω του 20%
  - είτε η πληρότητα της άνω δεξαμενής μεγαλύτερη του 40%

## Προσομοίωση ΥΒΕ Νο 2

- Επιβολή εποχιακών ρυθμίσεων
- Δυνατότητα άντλησης νερού προς τον ταμιευτήρα

## Προσομοίωση ΥΒΕ Νο 3

- Μη επιβολή εποχιακών ρυθμίσεων
- Αντλησιοταμίευση μόνο μεταξύ των δεξαμενών

## Προσομοίωση ΥΒΕ Νο 4 (σενάριο βάσης)

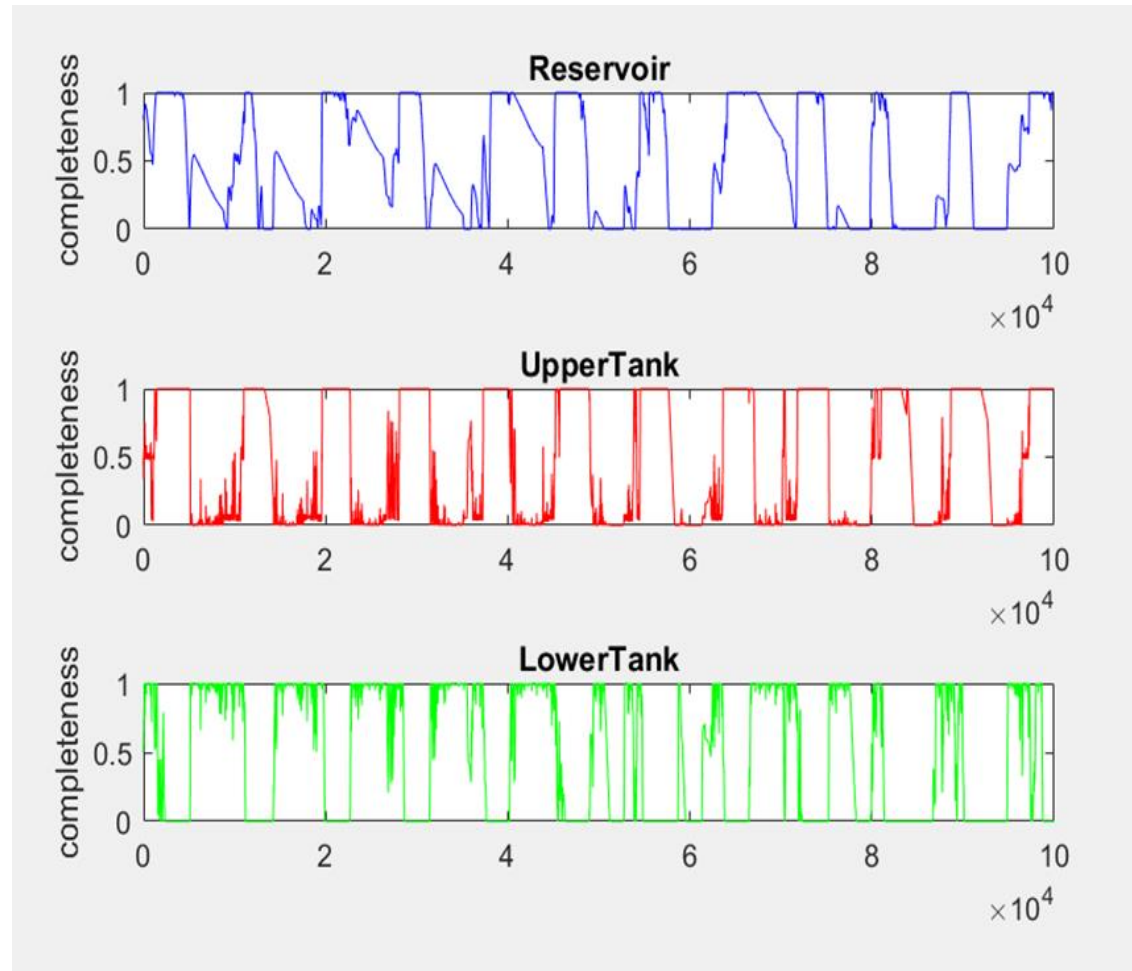
- Επιβολή εποχιακών ρυθμίσεων
- Αντλησιοταμίευση μόνο μεταξύ των δεξαμενών



# Προσομοίωση Βάσης

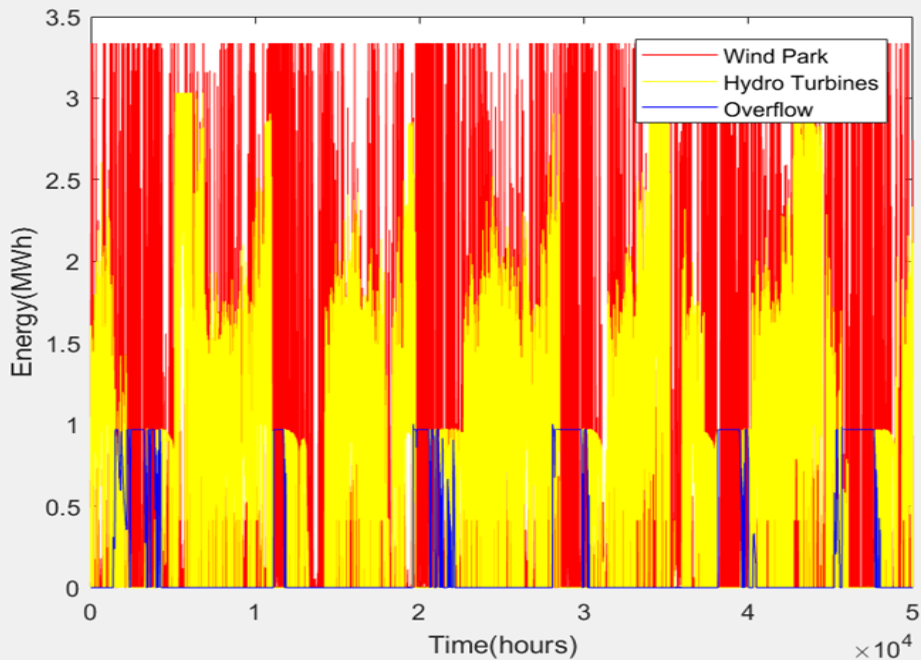
- Επιβολή εποχιακών ρυθμίσεων → επιλογή διαδρομής Ταμιευτήρας - Άνω Δεξαμενή αν:
  - η πληρότητα του ταμιευτήρα είναι άνω του ελάχιστου επιτρεπόμενου ορίου
  - η πληρότητα της άνω δεξαμενής είναι χαμηλότερη από αυτήν της κάτω δεξαμενής
- Στο 33% του χρόνου επιλέγεται η διαδρομή Ταμιευτήρας - Άνω Δεξαμενή, ενώ στο υπόλοιπο 67% η διαδρομή Άνω Δεξαμενή - Κάτω Δεξαμενή

- Αποθήκευση ενεργειακών πλεονασμάτων μόνο μέσω της διαδρομής Κάτω Δεξαμενή-Άνω Δεξαμενή



# Προσομοίωση Βάσης

- Α/Π παραγωγή 6,23 GWh (έσοδα 527.000 €)  
→ 46,8% της προσφερόμενης ενέργειας
- Λόγω υπερχείλισης 1,53 GWh → 14,4% της προσφερόμενης ενέργειας
- ΥΗΕ 4,96 GWh (συνολικά έσοδα 1.637.545 €)  
→ 38,8% της προσφερόμενης ενέργειας
- Έσοδα άρδευσης 21.300 €



## Αποτελέσματα:

- Αξιοπιστία άρδευσης: 92,9%
- Ανθεκτικότητα άρδευσης: 0,005%
- Άρδευτικό έλλειμμα: 112,6 m<sup>3</sup>
- Αξιοπιστία παραγωγής ενέργειας: 57,7%
- Ανθεκτικότητα παραγωγής ενέργειας: 0,001%
- Μέσο έλλειμμα παραγόμενης ενέργειας: 0,98 MWh
- Ποσοστό χρόνου με:
  - Μηδενικό απόθεμα ταμιευτήρα: 24,4%
  - Μηδενικό απόθεμα άνω δεξαμενής: 26,6%
  - Μηδενικό απόθεμα κάτω δεξαμενής: 41,3%

# Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

	<u>Προσομοίωση Νο.1</u>	<u>Προσομοίωση Νο.2</u>	<u>Προσομοίωση Νο.3</u>	<u>Προσομοίωση Νο.4</u>
Εποχιακές Ρυθμίσεις Ταμιευτήρα		✓		✓
Άντληση προς Ταμιευτήρα	✓	✓		
Αξιοπιστία άρδευσης	88,60%	95,56%	88,60%	92,95%
Ανθεκτικότητα άρδευσης	0,003%	0,008%	0,003%	0,005%
Μέσο έλλειμμα άρδευσης	80.30 m <sup>3</sup>	111.90 m <sup>3</sup>	80.40 m <sup>3</sup>	112.62 m <sup>3</sup>
Αξιοπιστία παραγωγής ενέργειας	59%	61%	58%	57,96%
Ανθεκτικότητα παραγωγής	0,001%	0,001%	0,001%	0,001%
Μέσο έλλειμμα παραγωγής	1.12 MWh	0.88 MWh	1.15 MWh	0.96 MWh
Έσοδα ΥΗΕ	1.475.000 €/year	1.637.545 €/year	1.283.250 €/year	1.463.200 €/year
Έσοδα άρδευσης	(-)1.612 €/year	35.000 €/year	(-)1.612 €/year	21.300 €/year

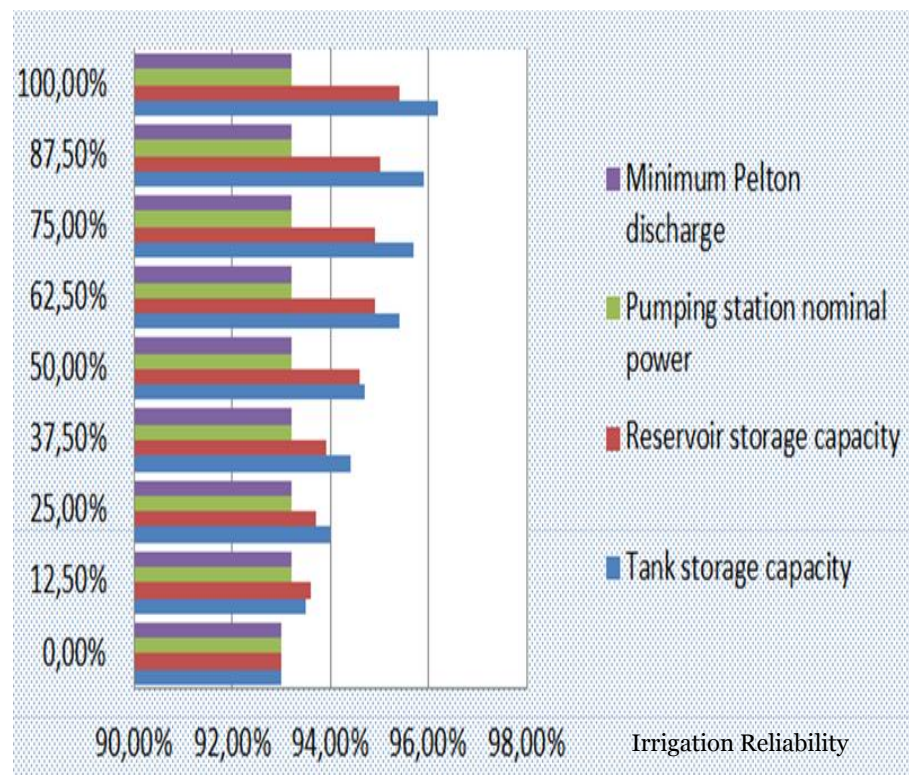
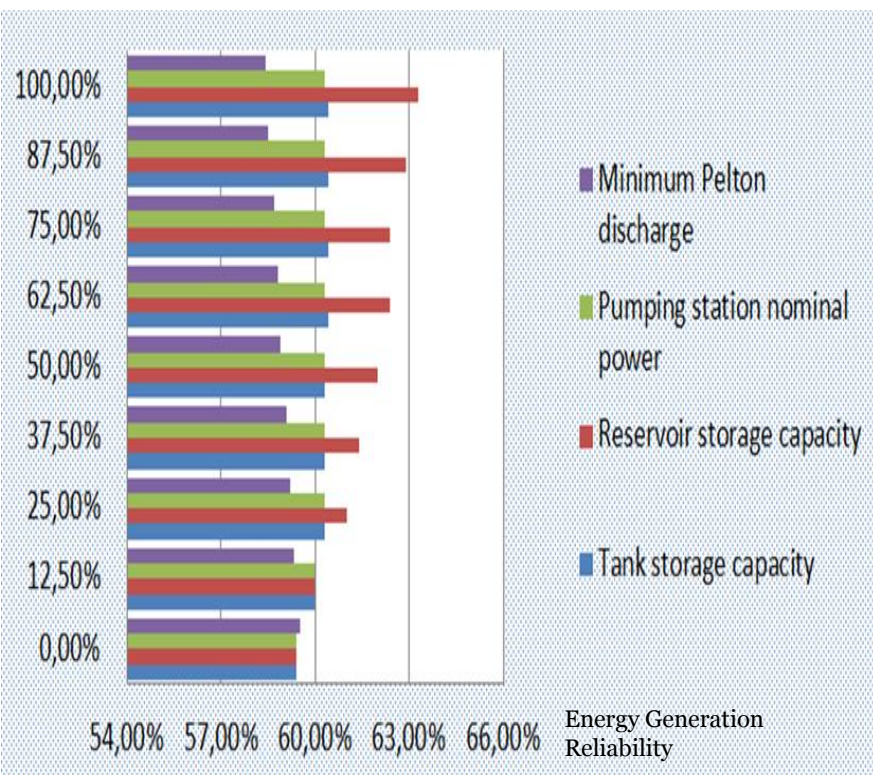
## Συμπερασματικά

- Οι **εποχιακές ρυθμίσεις** που τίθενται από τη ΔΕΗ βελτιώνουν τη συνολική απόδοση του συστήματος, όχι μόνο την ικανοποίηση των αρδευτικών απαιτήσεων
- Η δυνατότητα άντλησης νερού προς τον ταμιευτήρα δεν βελτιώνει δραστικά τα συνολικά αποτελέσματα
- Η λειτουργία της προσομοίωσης Νο 4 προσεγγίζουν περισσότερο από κάθε άλλη τη λειτουργία του ΥΒΕ Ικαρίας, όπως αυτή ορίζεται από τη ΔΕΗ

# Βελτιστοποίηση (1/2)

Διαδοχικές μονοκριτηριακές βελτιστοποιήσεις συναρτήσεως τεσσάρων μεγεθών:

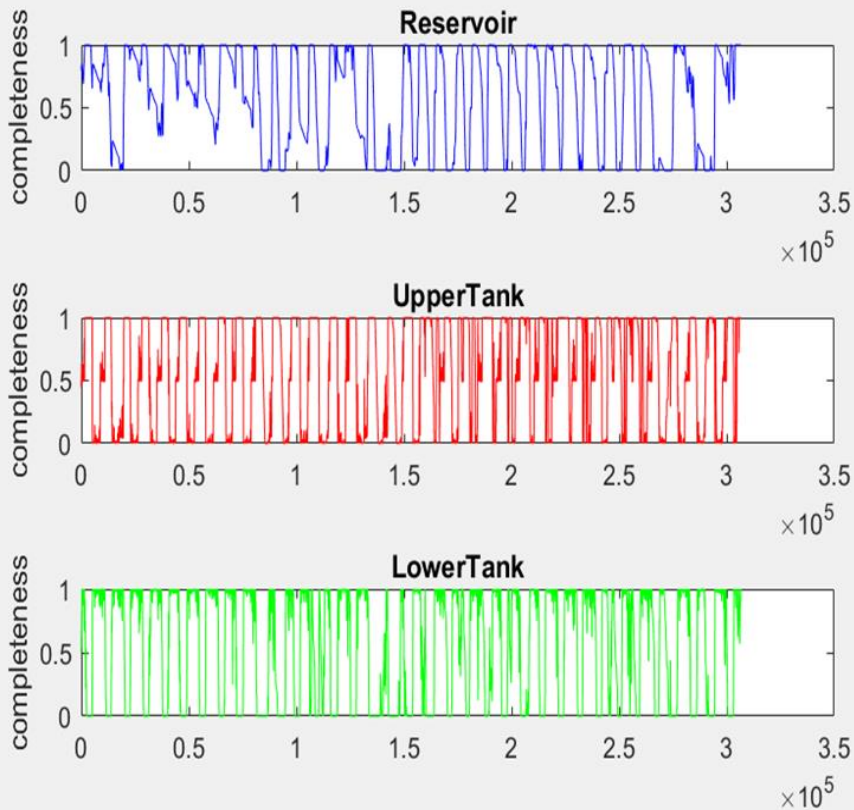
1. Χωρητικότητα ταμιευτήρα
2. Χωρητικότητα δεξαμενών
3. Ισχύς αντλιών
4. Ελάχιστη παροχή για λειτουργία ΥΗΕ





# Βελτιστοποίηση (2/2)

- Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μέσω **γενετικού αλγορίθμου**.
- Στόχος αρδευτικής αξιοπιστίας  $\geq 98,5\%$ .



## Βελτιστοποιημένα μεγέθη

Χωρητικότητα ταμιευτήρα: 2.680.000 m<sup>3</sup>

Χωρητικότητα δεξαμενών: 197.000 m<sup>3</sup>

Ισχύς αντλιών: 2.200 kW

Ελάχιστη παροχή λειτουργίας ΥΗΕ: 286 m<sup>3</sup>/h

## Αποτελέσματα

- Αξιοπιστία άρδευσης: 98,52%
- Μέσο έλλειμμα άρδευσης: 69,4 m<sup>3</sup>
- Αξιοπιστία παραγωγής ενέργειας: 65,8%
- Μέσο έλλειμμα ενεργειακής παραγωγής: 0,92 MWh
- Έσοδα ΥΗΕ: 1.741.200 €
- Έσοδα άρδευσης: 50.430 €

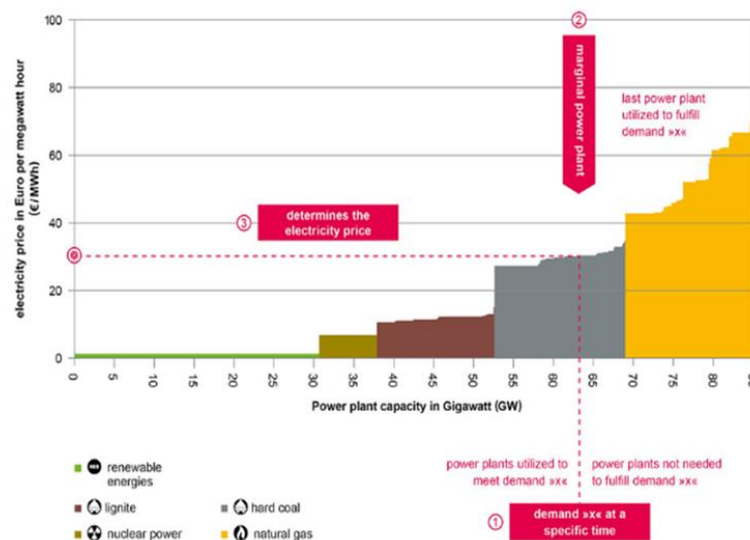


# Δομή Χρηματιστηρίου Ενέργειας

- Συναποτελείται από τρεις ενεργειακούς παίκτες: Α/Π, ΥΗΕ, Πετρελαϊκός Σταθμός.
- Απαραίτητη η συμμετοχή του Αυτόνομου Σταθμού (ΑΣ) Αγίου Κηρύκου για την επίτευξη μέγιστης αξιοπιστίας. Το **τεχνικό ελάχιστο** λειτουργίας του ορίζεται στα 300 kW.
- Η **δημοπρασία** γίνεται κάθε μέρα στις 12:00 και αναφέρεται στην επόμενη μέρα.
- Σύμφωνα με τη ΡΑΕ, προσφορές κατατίθενται για 10 διαστήματα ενεργειακών ζητήσεων. Εν προκειμένω, 9 διαστήματα αναφέρονται στις πρώτες 3 MW.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,333 MWh	0,333 MWh	0,333 MWh	0,333 MWh	0,333 MWh	0,333 MWh	0,333 MWh	0,333 MWh	0,333 MWh	>3 MWh

- Ισχύον μοντέλο χρηματιστηρίου ενέργειας στο διασυνδεδεμένο δίκτυο είναι αυτό της Οριακής Τιμής Συστήματος (ΟΤΣ)
  - Είσοδος παικτών στο σύστημα με σειρά προτεραιότητας κλιμακούμενης τιμής
  - Η υψηλότερη προσφορά που μπαίνει στο δίκτυο ορίζει την τιμή του ρεύματος
  - Δημιουργία κερδών για τους υπόλοιπους παίκτες



# Λειτουργία Χρηματιστηρίου

- Ισχύον μοντέλο εγγυημένης τιμής:
  - Α/Π: 84,6 €/MWh
  - ΥΗΕ: 295 €/MWh
  - ΑΣ: 350 €/MWh
- Εξεταζόμενο το μοντέλο **διακριτοποίησης** της τιμολόγησης
  - Κάθε παίκτης πληρώνεται για ό,τι προσφέρει στην τιμή που συμφωνείται
  - Αντιμετώπιση της πιθανότητας δημιουργίας καρτέλ

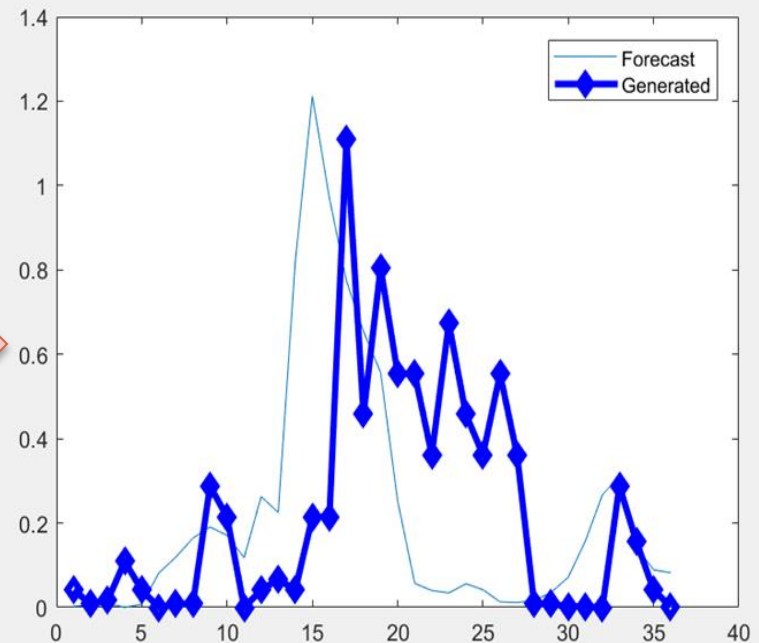
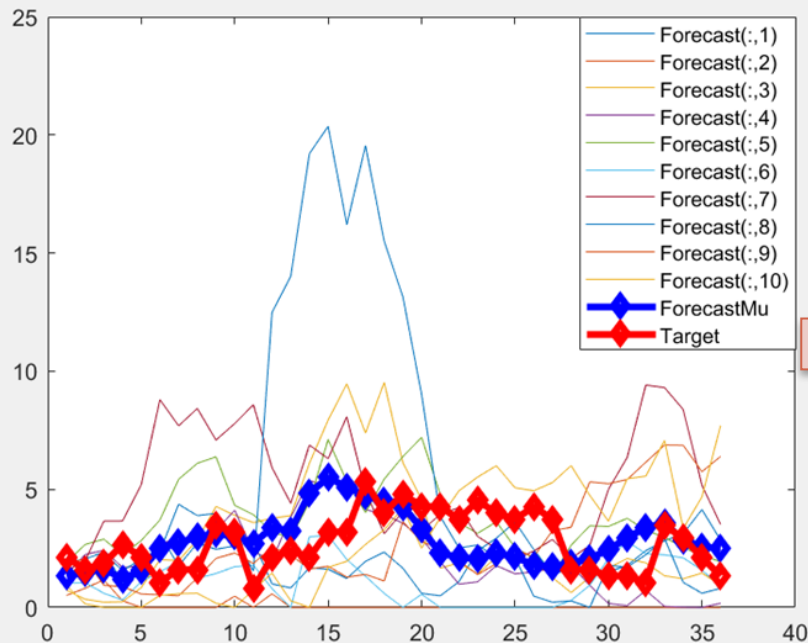
## Κατάθεση Προσφορών:

- Το Α/Π, λόγω των ελαχίστων λειτουργικών του εξόδων και των υψηλών ταχυτήτων του ανέμου, καθίσταται ο πιο **ανταγωνιστικός** παίκτης του χρηματιστηρίου. Καθορίζει την προσφορά του κυρίως βάσει της ανεμολογικής πρόβλεψης, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και το απόθεμα που διατηρεί στην άνω δεξαμενή.
- Ο Αυτόνομος Σταθμός καταθέτει προσφορές σταθερά στην τιμή 350 €/MWh, λόγω αυξημένου **κόστους μεταφοράς** και περιβαλλοντικών τελών. Μπαίνει στο σύστημα όταν οι υπόλοιποι παίκτες αδυνατούν να καλύψουν τη ζήτηση.
- Ο ενεργειακός παίκτης του ΥΗΕ διέπεται από τη μεγαλύτερη **ευελιξία** ως προς τη διαμόρφωση της προσφοράς του. Κατά τους χειμερινούς μήνες συχνά επιλέγει να ανταγωνιστεί τις προσφορές του Α/Π με σκοπό, αφήνοντας τον εκτός συστήματος, να εκμεταλλευτεί τα ενεργειακά του πλεονάσματα.

# Πρόγνωση Ανεμολογικών Δεδομένων

Κάθε μέρα στις 12:00 κρίνεται απαραίτητη η πρόγνωση των ωριαίων ταχυτήτων ανέμου για την επόμενη μέρα (12 έως 36 ώρες μπροστά).

Τα συνθετικά δεδομένα 1.000 ετών χρησιμοποιούνται ως δεδομένα ενός **KNN αλγορίθμου**, ο οποίος βρίσκει τους πλησιέστερους γείτονες, σύμφωνα με μια απόσταση μετρήσεων και προβλέπει την τάξη του ως τάξη πλειοψηφίας των πλησιέστερων γειτόνων του ή, σε περίπτωση παλινδρόμησης, ως συνάθροιση των τιμών στόχων που σχετίζονται με το πλησιέστερο γείτονα.



# Διαχείριση Πλεονασμάτων

Το Α/Π δημιουργεί ενεργειακά πλεονάσματα λόγω είτε ισχυρών ανέμων είτε μη εισόδου στο σύστημα και ο ΑΣ λόγω του **τεχνικού ελαχίστου** λειτουργίας

Δύο εναλλακτικά σενάρια:

- **Αγορά** της πλεονάζουσας ενέργειας από το ΥΗΕ
- **Ενοικίαση** μέρους του αποθέματος της δεξαμενής από το Α/Π και τον ΑΣ
  - Καθορισμός διατιθέμενου αποθέματος από την άνω δεξαμενή συναρτήσει του μήνα
  - Δραστική διαφοροποίηση στη διαμόρφωση της προσφοράς του Α/Π
  - Συμφέρον για τον ΥΗΕ αποτελεί το ελάχιστο δυνατό απόθεμα του Α/Π

- Οι μεγάλες διακυμάνσεις και οι συχνές ριπές ανέμου προκαλούν μια πολύ διακυμαινόμενη τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο
- Μετατροπείς AC-DC-AC χρησιμοποιούνται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου για να ταιριάζουν την παραγωγή με την καθορισμένη συχνότητα δικτύου
- Ενώ οι προβλέψεις μεσοκλίμακας αποτελούν κεντρικό σημείο της μετεωρολογίας της ενέργειας, οι μικρής κλίμακας διακυμάνσεις σπάνια αντιμετωπίζονται
- Ως αποτέλεσμα, η παραγόμενη ενέργεια από το Α/Π αναγκάζεται να χρησιμοποιηθεί για άντληση, καθώς δεν μπορεί να εισέλθει στο δίκτυο απευθείας (χρησιμότητα **διπλής σωλήνωσης**)

# Κατάθεση Προσφορών

- Πρώτο βήμα η εισροή στον ταμιευτήρα της ωριαίας απορροής
- Περίπτωση υπερχείλισης του ταμιευτήρα - **σταθερή τιμολόγηση** στα 25 €/MWh
- Στις 12:00 ξεκινά το χρηματιστήριο ενέργειας, πρώτο βήμα η πρόγνωση της ταχύτητας του ανέμου της επόμενης μέρας → πρόγνωση παραγωγής ενέργειας
- Η προσφορά του ΑΣ είναι σταθερή στα 350 €/MWh

## Προσφορά Α/Π:

- Η πρόγνωση για παραγωγή ενέργειας υπερβαίνει τη ζήτηση ή υπολείπεται λιγότερο από 50 KWh και υπάρχει απόθεμα τουλάχιστον 10.000 m<sup>3</sup>  
→ προσφορά 75 €/MWh
- Η πρόγνωση για παραγωγή ενέργειας υπολείπεται της ζήτησης λιγότερο από 100 KWh και υπάρχει απόθεμα τουλάχιστον 20.000 m<sup>3</sup>  
→ προσφορά 100 €/MWh
- Εναλλακτικά, μένει εκτός συστήματος

## Προσφορά ΥΗΕ:

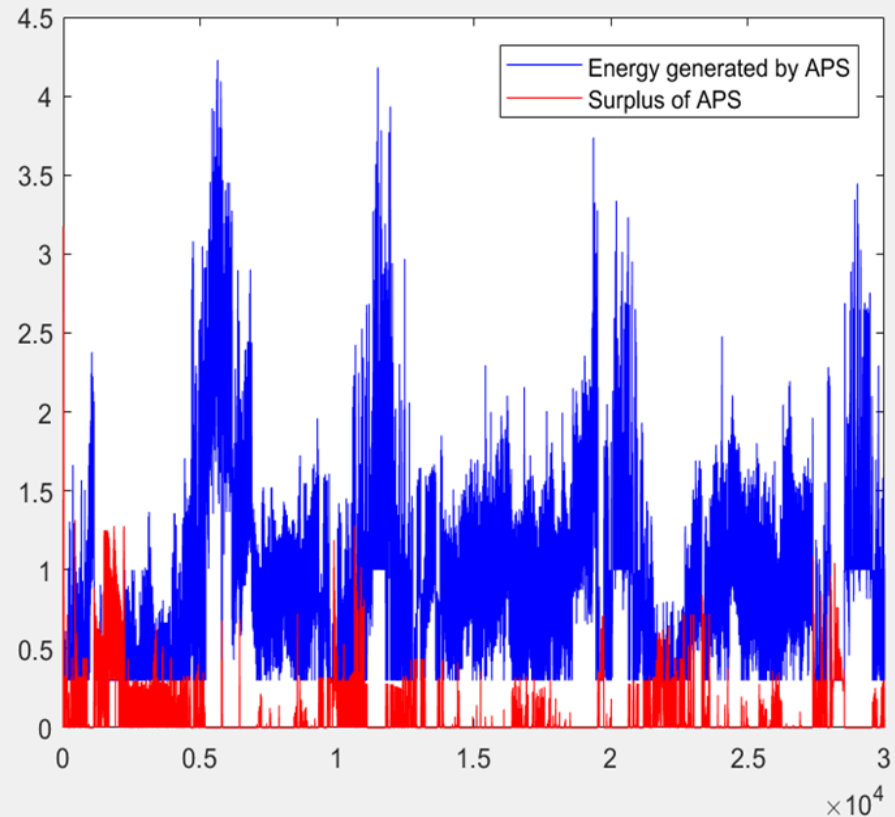
- Οι **κανόνες λειτουργίας του ταμιευτήρα** και η πληρότητα του ταμιευτήρα και της άνω δεξαμενής καθορίζουν την προσφορά
- Οι προσφορές κυμαίνονται από 70 έως 120 €/MWh
- Κατά τη διάρκεια χειμερινών μηνών δυνατότητα προσφοράς 70 €/MWh (24% των χρονικών βημάτων)
- Όταν το απόθεμα είναι χαμηλό, μένει εκτός συστήματος



# Διαχείριση Αβεβαιότητας

- Εάν η παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την εγγυημένη ποσότητα ενέργειας στην οποία έχει δεσμευτεί το αιολικό πάρκο (όχι απαραίτητως από τη ζήτηση ενέργειας), τότε υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας
- Σε αντίθετη περίπτωση, το έλλειμμα που δημιουργείται θα αντιμετωπιστεί είτε από τον ΥΗΕ στην **προκαθορισμένη** τιμή των 300 €/MWh είτε από τον ΑΣ για 500 €/MWh
- Κριτήριο επιλογής οι κανόνες λειτουργίας του ταμιευτήρα και η πληρότητα ταμιευτήρα και άνω δεξαμενής

- Οποιαδήποτε ελλείμματα δημιουργεί ο ΥΗΕ λόγω τεχνικών περιορισμών, αναλαμβάνονται από τον ΑΣ
- Ποινή 160 €/MWh επιβάλλεται στον ΥΗΕ



# Σύγκριση Διαφορετικών Προσομοιώσεων

## Προσομοίωση No.1

- Μοντέλο εγγυημένων τιμών ΑΠΕ
- Δεν αποτελεί προσομοίωση χρηματιστηρίου ενέργειας

## Προσομοίωση No.2

Προσομοίωση με χρήση του στοχαστικού μοντέλου προγνώσεων και μοντέλο διαχείρισης πλεονασμάτων ενοικίασης νερού από Α/Π (2 €/m<sup>3</sup>) και ΑΣ (20 €/m<sup>3</sup>)

## Προσομοίωση ΥΒΕ No.3

Προσομοίωση με χρήση του μοντέλου στοχαστικών προγνώσεων και μοντέλο αγοράς πλεονασμάτων από τον ΥΗΕ

## Προσομοίωση ΥΒΕ No.4 (Προσομοίωση Βάσης)

Προσομοίωση με χρήση μετεωρολογικών προγνώσεων (ακρίβειας 95%) και μοντέλο διαχείρισης πλεονασμάτων ενοικίασης νερού από Α/Π (3 €/m<sup>3</sup>) και ΑΣ (20 €/m<sup>3</sup>)

## Προσομοίωση ΥΒΕ No.5

Προσομοίωση με χρήση ετεωρολογικών προγνώσεων (ακρίβειας 95%) και μοντέλο αγοράς πλεονασμάτων από τον ΥΗΕ

# Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

	<u>Προσομοίωση No.1</u>	<u>Προσομοίωση No.2</u>	<u>Προσομοίωση No.3</u>	<u>Προσομοίωση No.4</u>	<u>Προσομοίωση No.5</u>
Μοντέλο εγγυημένης τιμής	✓				
Μοντέλο προγνώσεων SPARTA		✓	✓		
Μοντέλο μετεωρολογικών προγνώσεων				✓	✓
ΥΗΕ αγοράζει πλεονάσματα			✓		✓
ΥΗΕ νοικιάζει απόθεμα		✓		✓	
Έσοδα άρδευσης	22.000 €/year	(-) 52.240 €/year	(-) 52.240 €/year	(-) 46.590 €/year	(-) 52.240 €/year
Έσοδα Α/Π	527.000 €/year	651.000 €/year	111.000 €/year	615.000 €/year	1.413.700 €/year
Έσοδα ΥΗΕ	1.385.000 €/year	791.000 €/year	538.000 €/year	791.000 €/year	245.000 €/year
Έσοδα ΑΣ	1.175.000 €/year	825.000 €/year	1.566.000 €/year	824.000 €/year	1.670.000 €/year
Μέση Τιμή (διακριτοποίηση)	276 €/MWh	168,8 €/MWh	155,7 €/MWh	165 €/MWh	143,2 €/MWh
Μέση Τιμή (ΟΤΣ)	-	204,3 €/MWh	190 €/MWh	194,9 €/MWh	167,2 €/MWh

## Συμπερασματικά:

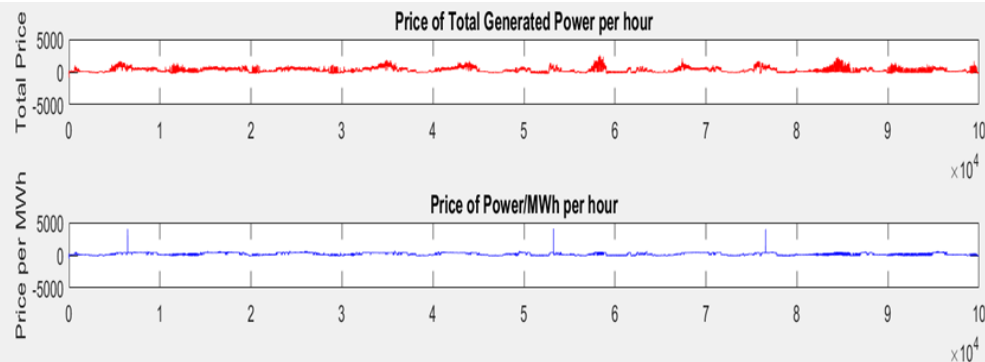
- Η τιμολόγηση βάσει **διακριτοποίησης** προσφέρει αδιαμφισβήτητα τις χαμηλότερες τιμές ρεύματος
- Αναγκαία καθίσταται η ανάπτυξη μοντέλου πρόγνωσης ανέμων μεγαλύτερης ακρίβειας ή η αξιοποίηση των μετεωρολογικών προγνώσεων
- Η ενοικίαση αποθέματος συνεισφέρει στο δικαιότερο καταμερισμό των εσόδων και, εν συνόλω, βελτιώνει την απόδοση του συστήματος

# Προσομοίωση Βάσης

- Προσομοίωση με χρήση του μοντέλου μετεωρολογικών προγνώσεων (ακρίβειας 95%) και του μοντέλου διαχείρισης πλεονασμάτων ενοικίασης νερού από Α/Π (3 €/m<sup>3</sup>) και Α/Σ (20 €/m<sup>3</sup>)
  - Α/Π 615.000 €/year
  - ΑΣ 824.000 €/year
  - ΥΗΕ 791.000 €/year
  - Έσοδα άρδευσης -46.590 €/year

• Μέση Τιμή Ενέργειας βάσει διακριτοποίησης: 165 €/MWh

• Μέση Τιμή Ενέργειας βάσει ΟΤΣ: 194,9 €/MWh



## Αποτελέσματα:

- Αξιοπιστία άρδευσης: 85%
- Ανθεκτικότητα άρδευσης: 0,006%
- Μέσο έλλειμμα άρδευσης: 95 m<sup>3</sup>
- Μηδενικό απόθεμα ταμιευτήρα: 16,7% των χρονικών βημάτων
- Μηδενικό απόθεμα άνω δεξαμενής: 2,1% των χρονικών βημάτων
- Μηδενικό απόθεμα κάτω δεξαμενής: 44,8% των χρονικών βημάτων

# Συνοψίζοντας:

- Υψηλή εκμετάλλευση ΑΠΕ
- Περιγραφή της λειτουργίας του ΥΒΕ
- Παρουσίαση δυνατότητας βελτιστοποίησης του
- Μείωση **εκπεμπόμενων ρύπων** κατά 13.800 τόνους ετησίως
- Προσομοίωση ενός ενεργειακού χρηματιστηρίου τριών παικτών, προσδιορίζοντας τα κριτήρια της διαμόρφωσης της προσφοράς κάθε παίκτη
- Σύγκριση του υφιστάμενου μοντέλου "εγγυημένης τιμής" ΑΠΕ με τη λειτουργία **χρηματιστηρίου ενέργειας**
- Σύγκριση διαφορετικών προσομοιώσεων της αγοράς ενέργειας
- Βέλτιστη λειτουργία της αγοράς ενέργειας, με τιμή χαμηλότερη κατά 36,6%

## Προτάσεις περαιτέρω έρευνας:

- Βελτίωση προγνώσεων ταχύτητας ανέμου
- Προσομοίωση διορθωτικών δημοπρασιών ενέργειας
- Διερεύνηση δυστοτήτων μεγαλύτερης διεξόδου των ΑΠΕ

# Poster Presentation EGU 2019

## Πρόδρομα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάστηκαν στο διεθνές συνέδριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης Γεωεπιστημών (EGU 2019)

### A stochastic simulation framework for representing water, energy and financial fluxes across a non-connected island

EGU General Assembly 2019, Vienna, Austria, 7-12 April 2019; Session H55.3.1/ERE2.8: *Advances in modeling and control of environmental systems: from drainage and irrigation to hybrid energy generation*

Panagiotis Mavritsakis, Antonios-Gennaios Pettas, Ioannis Tsoukalas, Georgios Karakatsani, Nikos Mamassis, and Andreas Efstratiadis

Department of Water Resources & Environmental Engineering, National Technical University of Athens, Greece

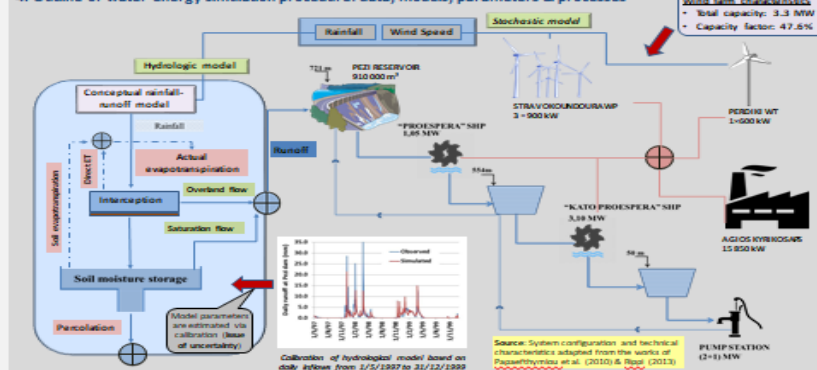
#### 1. Abstract

**Integrated modelling of hybrid water-energy systems**, comprising conventional and renewable energy sources, pumped-storage facilities and other infrastructures, which aim to serve combined water and energy uses, is a highly challenging problem. On the one hand, such systems are subject to significant uncertainties that span over all associated input processes, physical and anthropogenic (i.e., hydro-meteorological drivers and water-energy demands, respectively). On the other hand, the everyday operation of such systems is subject to multiple complexities, due to the conflicting uses, constraints and economic interests. **Making an example a future configuration of the electric system of Ikaria Island, Greece**, we demonstrate a **stochastic simulation framework**, comprising (a) a synthetic time series generator that reproduces the statistical and stochastic properties (i.e., marginal distributions, auto- and cross-dependencies) of all input processes, at multiple temporal scales; and (b) a simulation module employing the hourly operation of the system, to estimate the associated water, energy and financial fluxes. This scheme is used within two case studies, i.e. the **optimal design** of key system components, and the **real-time operation of a hypothetical energy market**, involving different energy providers and associated electricity sources, conventional and renewable.

#### 2. Rationale of hybrid energy systems

- Due to the stochastic regime of weather conditions, standalone wind energy systems are highly unreliable, resulting to **energy surpluses and deficits**.
- The combination of wind units with **pumped energy storage** is considered the most effective means to significantly increase the generation of wind energy within electric power systems, particularly in small autonomous island grids, where several technical limitations are imposed by the conventional energy units.
- The aim of hybrid systems is to **synthesize the energy offered**, by different sources with demand, in order to maximize the efficiency of power production.
- When the wind production exceeds the demand, water is pumped from a lower to an upper water storage component (tank or reservoir), to **store surplus wind energy as hydrodynamic energy**.
- Typically energy surpluses occur during late night hours and the winter period, when the power demand is relatively low.
- In contrast, when the wind energy production cannot fulfil the demand, water is released from the upper reservoir to fulfil the energy deficit as hydro-power.

#### 4. Outline of water-energy simulation procedure: data, models, parameters & processes



#### Key outcomes of preliminary analyses

- |  |  |
|--|--|
| <b>Without the APS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energy production reliability: 66%</li> <li>Deficit vulnerability: 0.93 MWh</li> <li>Irrigation reliability: 93.3%</li> <li>Deficit vulnerability: 107.2 m³</li> </ul> | <b>Without the hybrid system</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>55% of energy production can meet the power demand</li> <li>up to 6250 MWh per year will not be exploited (energy excess)</li> </ul> |
|--|--|

**Key research challenge is the simulation of a hypothetically free energy market, involving three energy providers:**

- Wind Farm (WF)
- Hydroelectric Power Station (HPS)
- Autonomous Power Station (APS)

#### 3. Case study: Wind-hydro-pumped storage system in the autonomous island of Ikaria, Eastern Aegean, Greece

**Summary information:**

- Total extent 255 km<sup>2</sup>
- 8,423 residents (2013 census)
- Summer population: 20,000 people (approximation)
- Mildly mountainous relief (max. elevation 1051 m)
- Cultivated land in the NW: annual water demand for irrigation 450,000 m<sup>3</sup>
- Mild climate, strong summer winds, called "Molossia"

**Components of hybrid water-energy system:**

- Existing diesel power station in Agios Kythos (est. 1967).
- Three interconnected water storage elements, i.e. PEI Reservoir (est. 1990, total capacity 910,000 m<sup>3</sup>), full of most of irrigation and small portion of drinking water demands), and two small tanks under construction, in Proserpa and Kato (Lower) Proserpa (each one of 60,000 m<sup>3</sup>).
- Two small hydro-power stations in the route Kato-Proserpa-Kato Proserpa.
- Pumping station lifting water from Kato Proserpa to Proserpa (3.0 MW).
- Wind farms in Spavoukounourwp, comprising three wind turbines (2.7 MW), and isolated wind turbine in Proserpa (0.6 MW).
- Control centre and dispatching of load in Agios Kythos.

**Ikaria is one of Aegean islands with the largest wind potential, since the annual average wind speed at the mean elevation of the island is estimated up to 7.5 m/s.**

#### 5. Stochastic simulation and forecasting of hourly wind speed

The wind speed process at fine time scales (e.g., hourly) is characterized by major fluctuations, since its statistical behavior changes both across seasons and the daily cycle (an attribute referred to as **double periodicity**; Dimitriadis & Koutroumpis, 2015).

Statistical analysis of hourly wind data from Ikaria (2010-2018) also revealed the existence of intermittency, large asymmetry and strong auto-dependence across short time lags.

These data were used as input of a novel stochastic approach, named **Stochastic Periodic Auto-Regression to Anything (SPARTA)**, for generating 1000 years of hourly synthetic data, to be used within water-energy simulations (Boukalas et al., 2018a; Boukalas, 2018).

Main advantages of SPARTA are the preservation of double periodicity (cyclostationarity), by allowing to fit any distribution model to represent the individual statistical regime of each hour of each month, and the generation of realistic dependency patterns.

To describe the intermittent nature of the wind, mixed-type distributions with Generalized Gamma and Burr type-XIII were used for representing non-zero wind speed.

For real-time energy market simulations, we developed an innovative forecasting procedure, to provide stochastic projections of the upcoming wind speeds up to 36 hours lead time, by estimating each day at 12:00 am (t<sub>0</sub>) and estimating the upcoming wind speed from time step t<sub>0</sub> + 12 up to t<sub>0</sub> + 36 (hours).

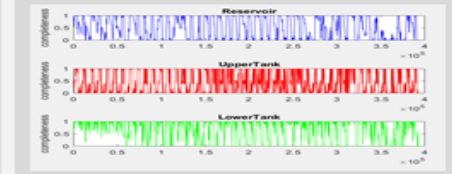
Initially we employed SPARTA for generating 1000 years of synthetic hourly wind speed data, which were most used as income for a **K-Nearest Neighbors Algorithm (KNN)**. The latter simply stores a collection of examples. Each example consists of a vector of features (describing the example) and its associated class (for classification) or numeric value (for prediction). Given a new example, KNN finds its most similar examples (called nearest neighbors), according to a distance metric, and predicts its class as the majority class of its nearest neighbors or in the case of regression, as an aggregation of the largest values associated with its nearest neighbors.

This scheme was related to provide real-time realizations of hourly wind speed, for the entire simulation horizon.

**Acknowledgments:** We are grateful to the useful remarks and constructive comments of reviewers, for their timely providing National wind data from the autonomous island of Ikaria (http://www.nmms.gov.gr/). We are also grateful to the anonymous reviewers for their constructive comments.

#### 6. Real-time energy market simulation in a nutshell

- The **energy auction** regarding the most 24 hours takes place daily at t<sub>0</sub> +12:00 am.
- Finally the **wind speed and the demand of energy** for time step t<sub>0</sub> + 12 until t<sub>0</sub> + 36 are estimated by the aforementioned forecasting process, and then the three players make their offers against the projected energy demand (24 hourly values).
- The offer of the **Wind Farm (WF)** accounts for the forecasted energy and aims at least to the depreciation of the investment. When strong winds are expected, the WF is considered to be the **most competitive player**. The penalty that is imposed to the WF, if it does not generate the promised amount of energy, is relatively low, in order to **favor renewable sources** that are inherently highly uncertain.
- The criteria of configuration of the **Hydroelectric Power Station (HPS)** offer are the **completeness of the reservoir and the upper tank** and the **seasonally-varying restrictions** that are imposed due to irrigation demands. The offers of HPS are generally higher than the ones of WF.
- Under some premise, e.g., during the winter and under high water storage, HPS is allowed to offer **lower prices** than WF, in order to enter the market and gain from the surplus of energy provided the other two players, through pumped-storage.
- In general, the configuration of the HPS offer is remarkably difficult due to the plethora of factors concerning its availability and the relatively high penalty that is imposed in case of deficits.
- The offer of the **Autonomous Power Station (APS)** is significantly higher than the other ones, owing to the cost of the oil transport and environmental taxes.
- Missing the energy demand is fulfilled by the WF and HPS, thus leaving to the APS the role of covering the deficits, in order to **maintain the reliability at 100%**.
- Since for technical reasons the operation of APS can not be terminated, energy surpluses are quite often and they are regulated by the pumped-storage system.



#### 7. Conclusions & future research perspectives

- High exploitation of renewable energy production** due to flexibility offered by the hybrid system (storage of excess energy), which allows regulating the stochastic behaviour of input meteorological processes.
- Elimination of risks of energy deficits**, at the same time ensuring energy production in lower prices than today (monopoly of diesel station).
- Fulfillment of irrigation demand** with high reliability.
- Future research will be focused to:
  - improving forecasts by coupling stochastic and deterministic approaches;
  - Optimizing the energy market model to find a win-win equilibrium for all energy providers and the consumers.

#### References

Dimitriadis, P., and D. Koutroumpis. Application of stochastic methods to double cyclostationary processes for hourly wind speed simulation. *Energy Procedia*, 76, 4064-411, 2015.

Papadimitriou, S. V., E. G. Karakatsani, S. A. Papathanassiou, and M. R. Papadimitriou. Wind-hydro-pumped storage (WHPS) Resilience to NPO-1000 Resilience in the autonomous island system of Ikaria. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(3), 1633-72, 2019.

Deed, A. Optimizing the energy market model to find a win-win equilibrium for all energy providers and the consumers. *PhD Thesis*, Department of Water Resources & Environmental Engineering - National Technical University of Athens, 2018.

Tsoukalas, I., A. Efstratiadis, and C. Makridakis. Stochastic periodic autoregressive to anything (SPARTA): Modeling and simulation of cyclostationary processes with arbitrary marginal distributions. *Water Resources Research*, 54(1), 161-185, WRC023097, 2018a.

Tsoukalas, I., C. Makridakis, and A. Efstratiadis. Simulation of stochastic processes exhibiting any-range dependence and arbitrary marginal distributions. *Water Resources Research*, 54(1), 1618-1633, 2018b.

Tsoukalas, I. Modeling and simulation of nonstationary hydro-meteorological time series using a hybrid system under uncertainty. *PhD Thesis*, 339 p, National Technical University of Athens, 2018.

Contact: panagiotis.mavritsakis@ntua.gr; Poster available at: <http://www.nmms.gov.gr/1939/>



Ευχαριστώ για την προσοχή σας!