Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ΕΕΜΦ)
3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φραγμάτων και Ταμιευτήρων:
Διαχείριση Έργων και Προοπτικές Ανάπτυξης
12-15 Οκτωβρίου 2017, Αίγλη Ζαππείου

Πλαίσιο βέλτιστης διαχείρισης υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων μέσω άντλησης-ταμίευσης: Διερεύνηση στην περίπτωση των υδροσυστημάτων Αχελώου-Θεσσαλίας και Αλιάκμονα

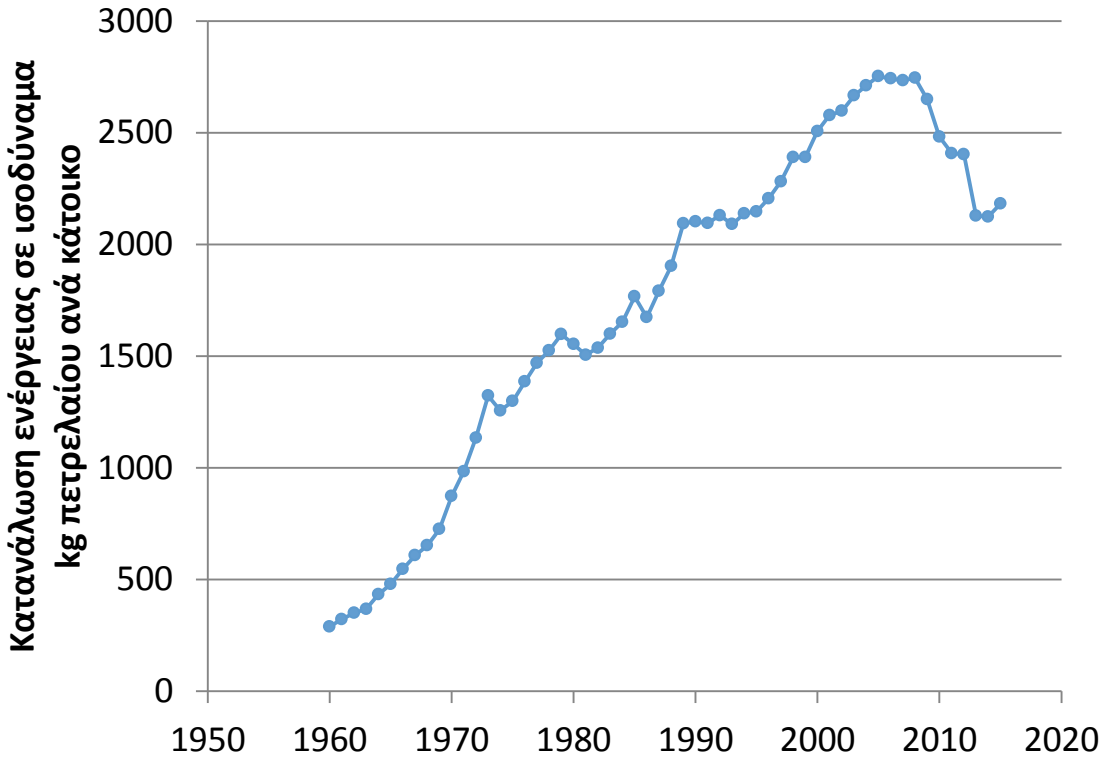
Π. Δήμας, Δ. Μπουζιώτας, Δ. Νικολόπουλος,
Α. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος,

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Εισαγωγή-Προβληματισμοί

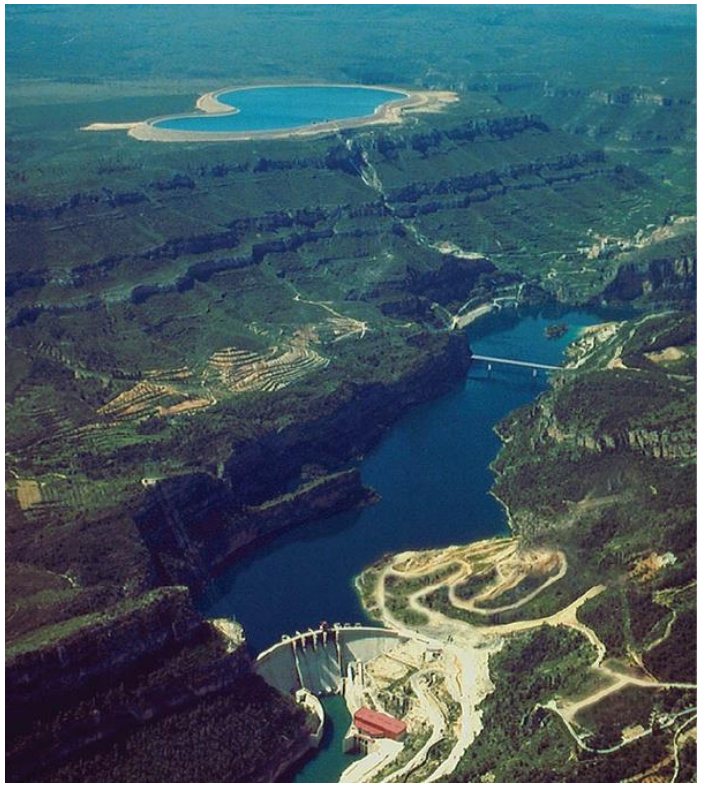
- Οικονομική κρίση και μοντέλο παραγωγής ενέργειας → ανάγκη για μετά-εξορυκτικό μοντέλο
- Διείσδυση ΑΠΕ
- Βιωσιμότητα – Εξορθολογισμός κατανάλωσης
- Ελλάδα: μείωση στην κατανάλωση, κρίση και όχι στρατηγικό πλάνο
- Αναθεώρηση του πλαισίου που εντάσσει τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα στις μη ανανεώσιμες πηγές.



- Ανάδειξη του βιώσιμου χαρακτήρα της υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Κομβικός ο ρόλος των ταμιευτήρων που λειτουργούν ως έργα αναρρύθμισης της ροής.
- Αναγκαιότητα ανάπτυξης εργαλείων για συνδυασμένη διαχείριση ΥΗΕ και ΑΠΕ.

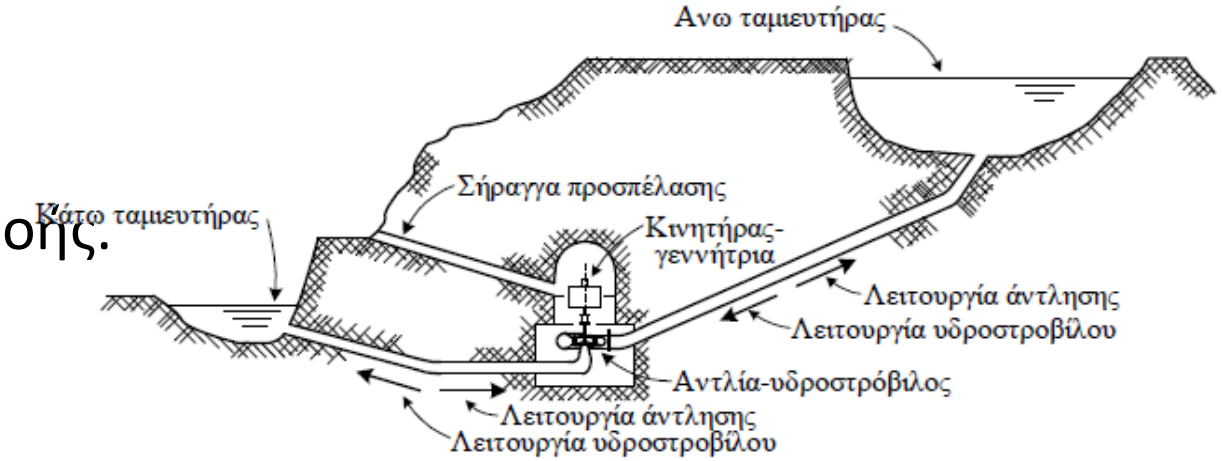
Σχήματική λειτουργια αντλησιοταμίευσης

- Οικονομική κρίση και μοντέλο παραγωγής ενέργειας → ανάγκη για μετά-εξορυκτικό μοντέλο
- Διείσδυση ΑΠΕ
- Βιωσιμότητα – μείωση κατανάλωσης
- Ελλάδα: μείωση στην κατανάλωση, κρίση και όχι στρατηγικό πλάνο
- Αναθεώρηση του πλαισίου που εντάσσει τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα στις μη ανανεώσιμες πηγές.
- Ανάδειξη του βιώσιμου χαρακτήρα της υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Κομβικός ο ρόλος των ταμιευτήρων που λειτουργούν ως έργα αναρρύθμισης της ροής.
- Αναγκαιότητα ανάπτυξης εργαλείων για συνδυασμένη διαχείριση ΥΗΕ και ΑΠΕ.

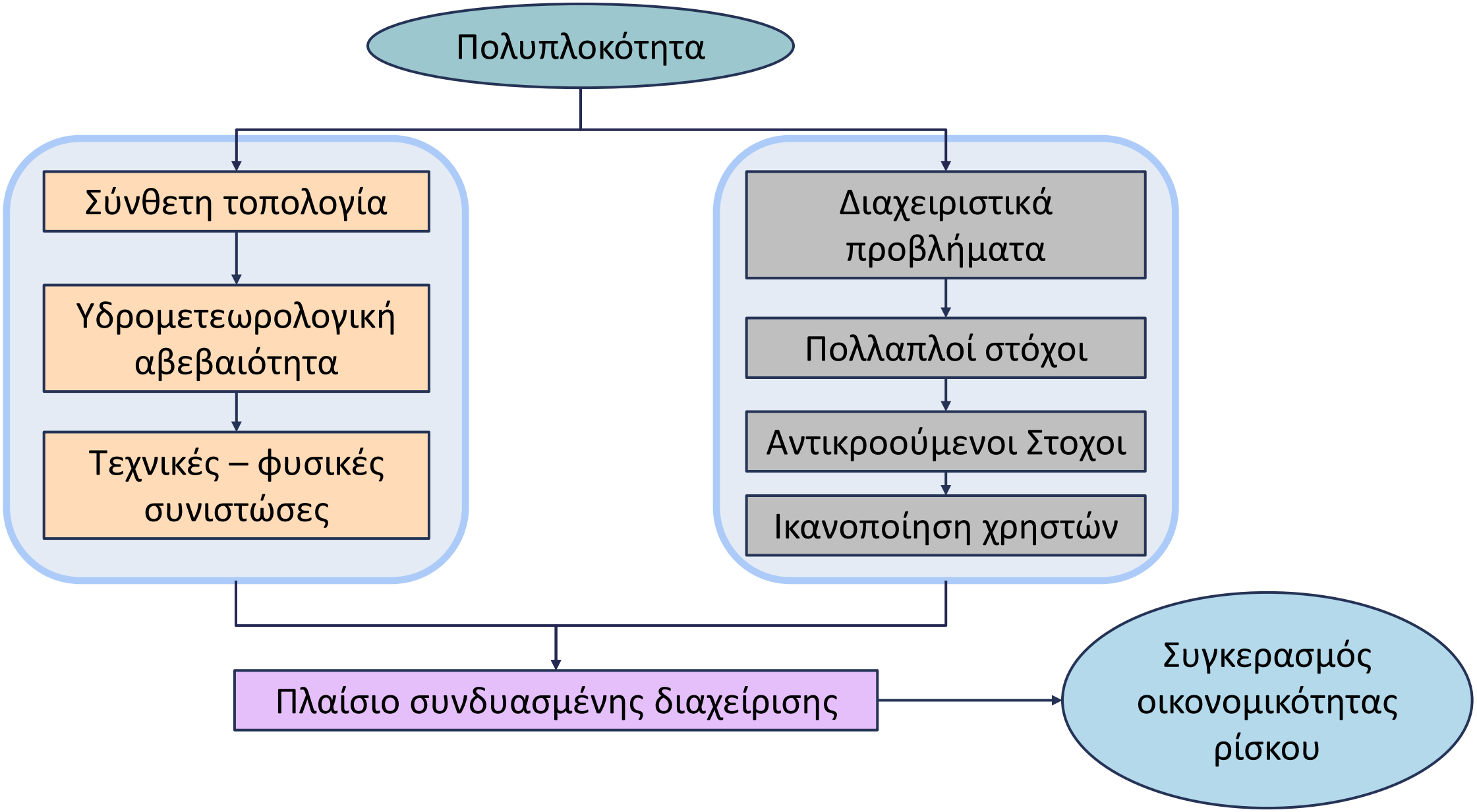


La Muela Project, Spain

Γενική διάταξη

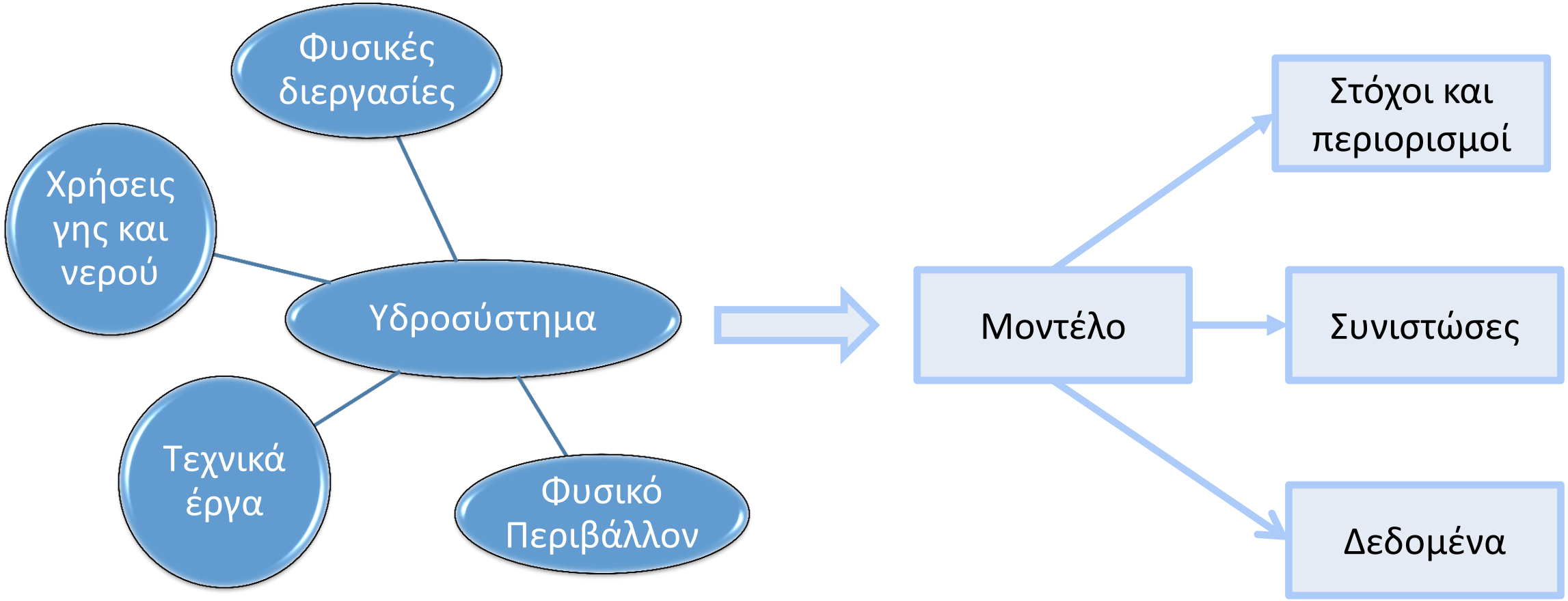


Εγγενής πολυπλοκότητα υδροσυστημάτων



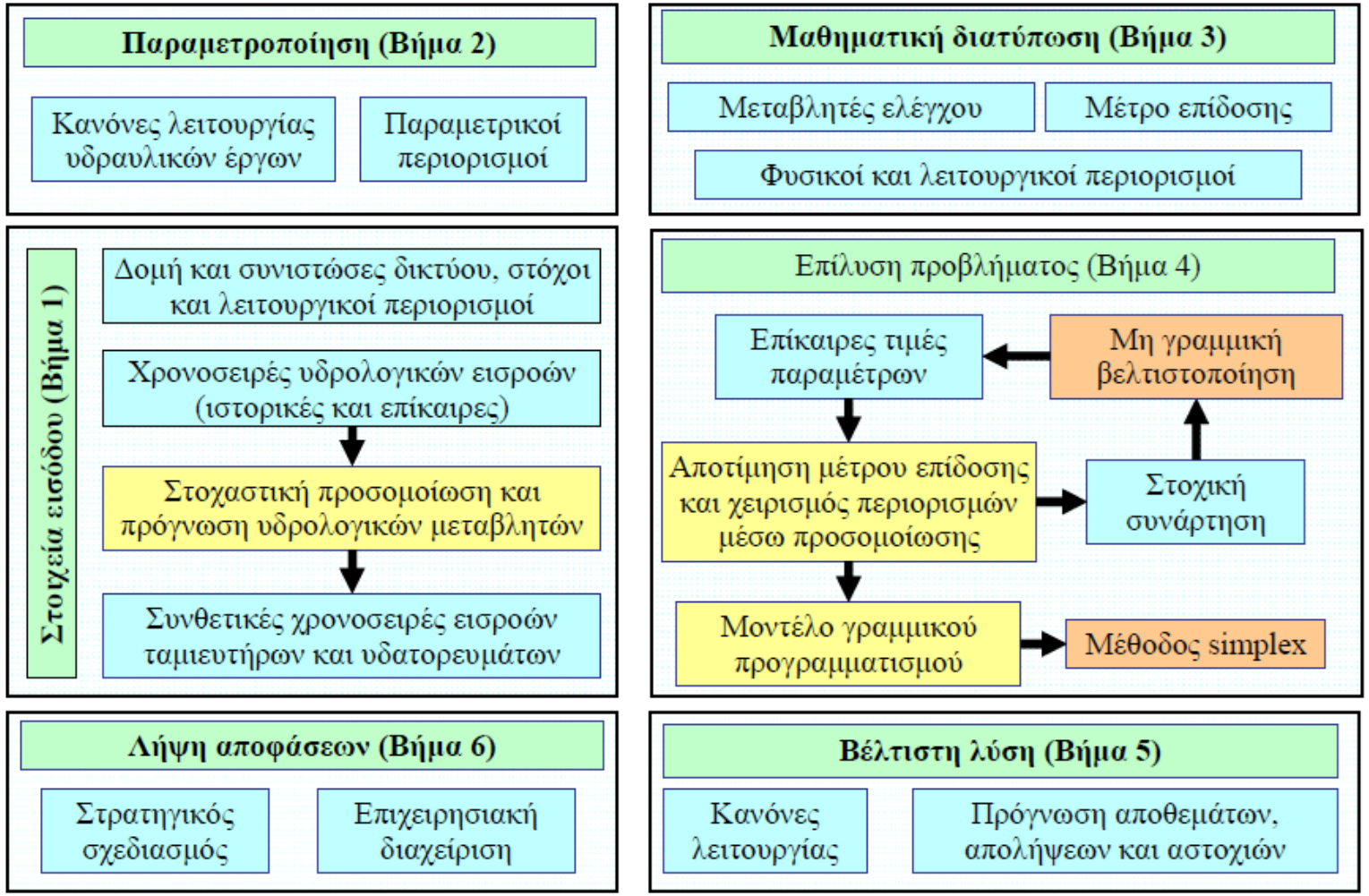
Γενική μεθοδολογική προσέγγιση

- Βασική η έννοια της παραμετροποίησης σε κάθε ανάλυση συστήματος
- Αφαιρετική διαδικασία→ Αναπαράσταση των συνιστωσών με φειδωλό τρόπο



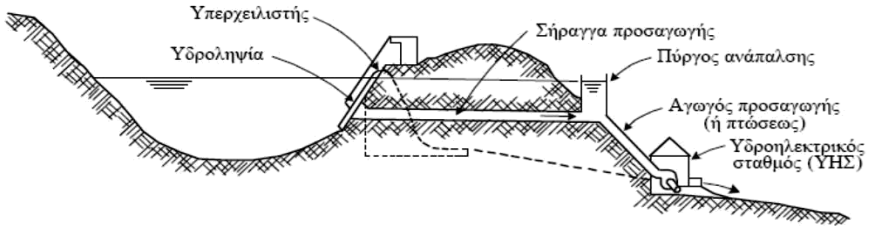
Πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης – βελτιστοποίησης

- Η μεθοδολογία του λογισμικού «Υδρονομέας» βασίζεται στη διαδικασία της **στοχαστικής βελτιστοποίησης (stochastic optimization)**
- Σύζευξη **προσομοίωσης** με αλγόριθμο **βελτιστοποίησης**: τα αποτελέσματα της προσομοίωσης → αποτίμηση στοχικής συνάρτησης, **μερικές εκ των παραμέτρων της προσομοίωσης** ως **μεταβλητές ελέγχου** της βελτιστοποίησης

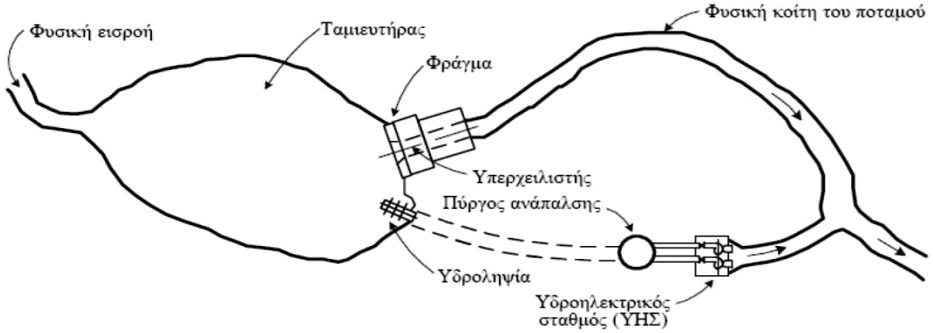


Βελτιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής

- Η βασική σχέση της υδροηλεκτρικής παραγωγής είναι $E_t = \psi \cdot V_t \cdot H_t$



- E_t : Η παραγόμενη ενέργεια στο χρονικό βήμα t.
- V_t :Ο διερχόμενος από το στρόβιλο όγκος νερού στο χρονικό βήμα t.
- H_t :Το ολικό ύψος πτώσης στο βήμα t.
- ψ :Η ειδική ενέργεια, δηλαδή η παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα ύψους πτώσης και διερχόμενου όγκου.



$$
\begin{aligned}
& Maximize: z = d \\
& st: \\
& S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - Y_t - Q_t, t = 1, 2, \ldots, n \\
& S_{\min} \le S_t \le K \\
& 0 \le R_t \le R_{\max} \\
& f(R_t, S_t, S_{t+1}) \ge d \\
& S_t, Y_t \ge 0 \\
& d \ge 0
\end{aligned}
$$

- Η συνάρτηση ***f*** που τίθεται στην διπλανή έκφραση είναι η σχέση παραγωγής ενέργειας σε κάθε χρονικό βήμα ***t*** . Είναι δηλαδή η παραπάνω σχέση της υδροηλεκτρικής παραγωγής σε διακριτοποιημένη μορφή, με τη διακύμανση του αποθέματος να θεωρείται αμελητέα.

$$E = \rho \cdot g \cdot \int_{t_1}^{t_2} n(Q) \cdot Q(t) \cdot H(t) dt = \psi \cdot H \cdot \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt = \psi \cdot H \cdot V$$

- Με την παραπάνω ακολουθία απλοποιήσεων δεν νοείται πλέον εξάρτηση της ενέργειας από τη στάθμη (επομένως και το απόθεμα) του επόμενου χρονικού βήματος, επομένως: $E = f(R_t, S_t)$

Κριτήρια επίδοσης – στοχικές συναρτήσεις

- **Αξιοπιστία:** Η χρονοσειρά απόκρισης του συστήματος παράγει **n'** πλήθος τιμών που ικανοποιούν την κάλυψη ενός ενεργειακού στόχου και **n** το μήκος της χρονοσειράς → **σχετική συχνότητα**: $\alpha = \frac{n'}{n}$

- Γενίκευση πλαισίου **PSO** → Ανάπτυξη κριτηρίων ενεργειακής παραγωγής

1. **Μεγιστοποίηση** της **συνολικά παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας**, η οποία έχει υψηλότερη αξία σε σχέση με τη δευτερεύουσα → $\mathrm{E} = \sum \mathrm{et}^{\mathrm{k}}$

2. **Συνολικό κόστος/όφελος συστήματος**, εκτιμάται ως η **μέση τιμή του συνολικού ετήσιου οφέλους από τις m ομάδες στόχων**

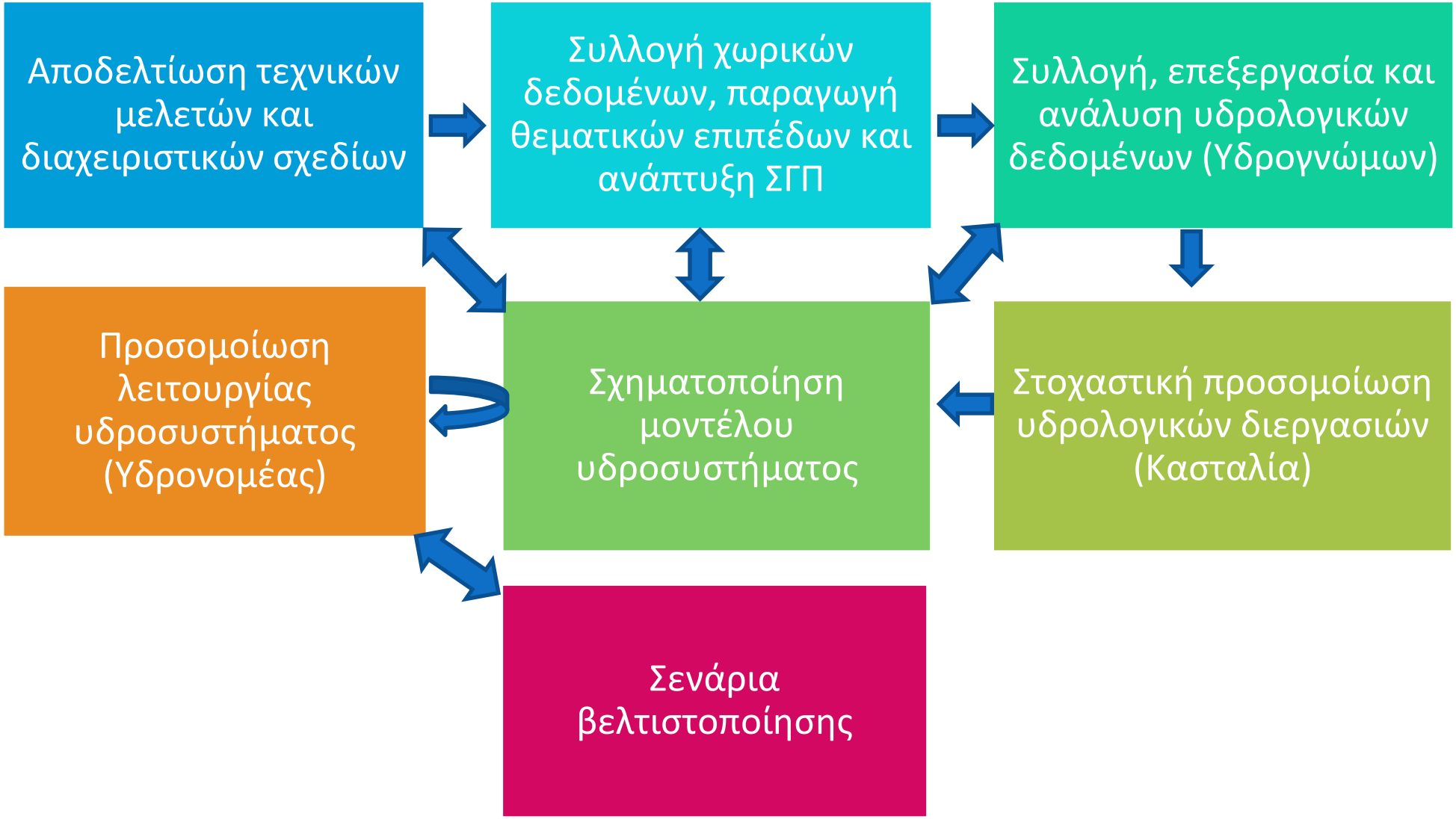
$$P_i^t = c_i^B \cdot \sum_{i=1}^{n} S_i + c_i^E \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^{n} D_i^t - \sum_{i=1}^{n} S_i\right), 0\right\} - c_i^D \cdot \max\left\{\left(\sum_{i=1}^{n} S_i - \sum_{i=1}^{n} D_i^t\right), 0\right\} \longrightarrow J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^{m} E\{P_{tot,i}^{year}\} = \sum_{i=1}^{m} E\left\{\sum_{t=1}^{12} P_i^t\right\}$$

Όφελος από ικανοποίηση στόχου

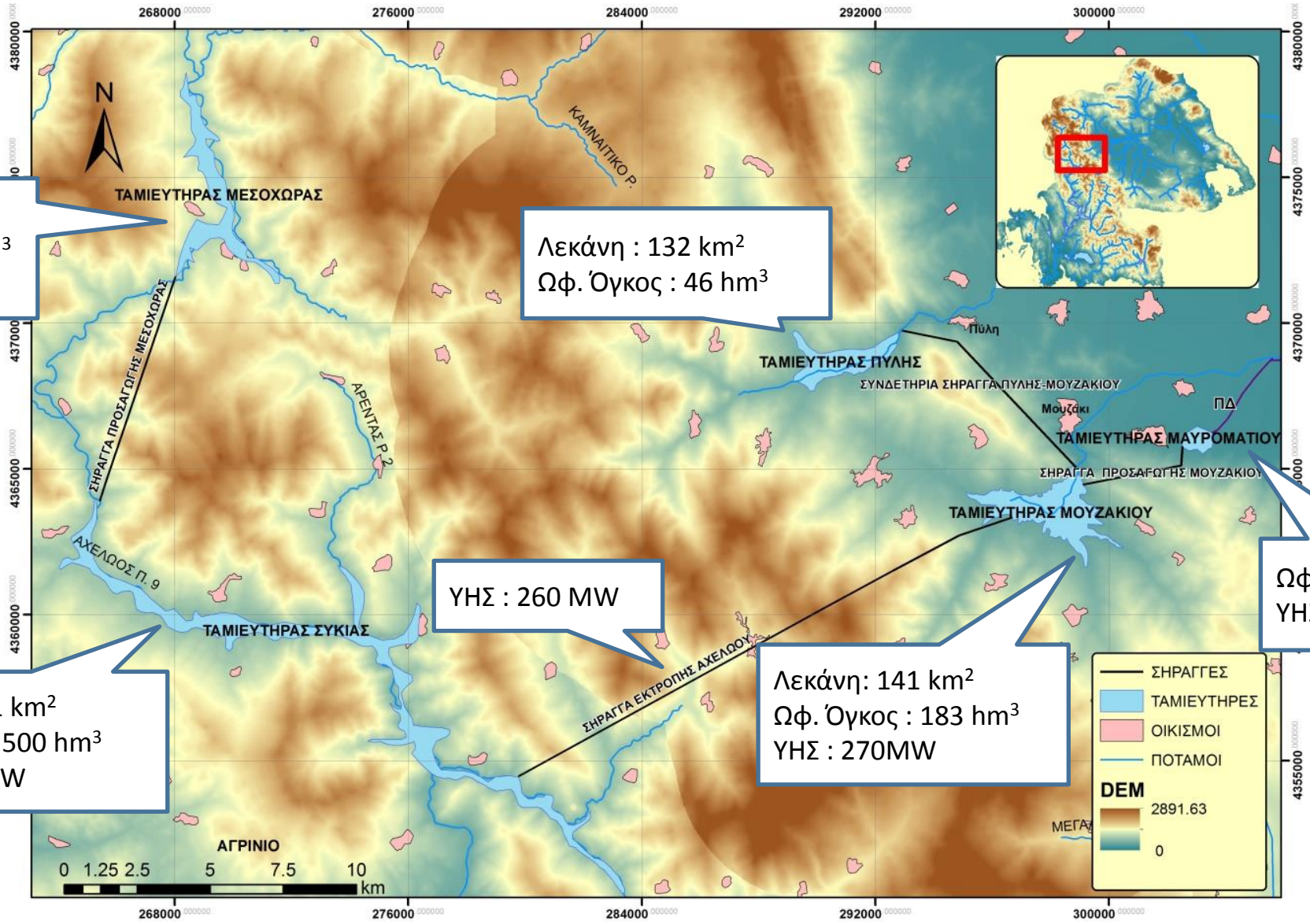
Πρόσθετο Όφελος σε περίπτωση που η ενέργεια ξεπεράσει τον στόχο

Κόστος από μη ικανοποίηση στόχου

Πορεία εξέτασης υδροσυστημάτων



Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου (1)



Λεκάνη: 644 km^2
Ωφ. Όγκος : 228 hm^3
ΥΗΣ : 160 MW

Λεκάνη : 132 km^2
Ωφ. Όγκος : 46 hm^3

Ωφ. Όγκος : 5 hm^3
ΥΗΣ : 30 MW

ΥΗΣ : 260 MW

Λεκάνη: 141 km^2
Ωφ. Όγκος : 183 hm^3
ΥΗΣ : 270MW

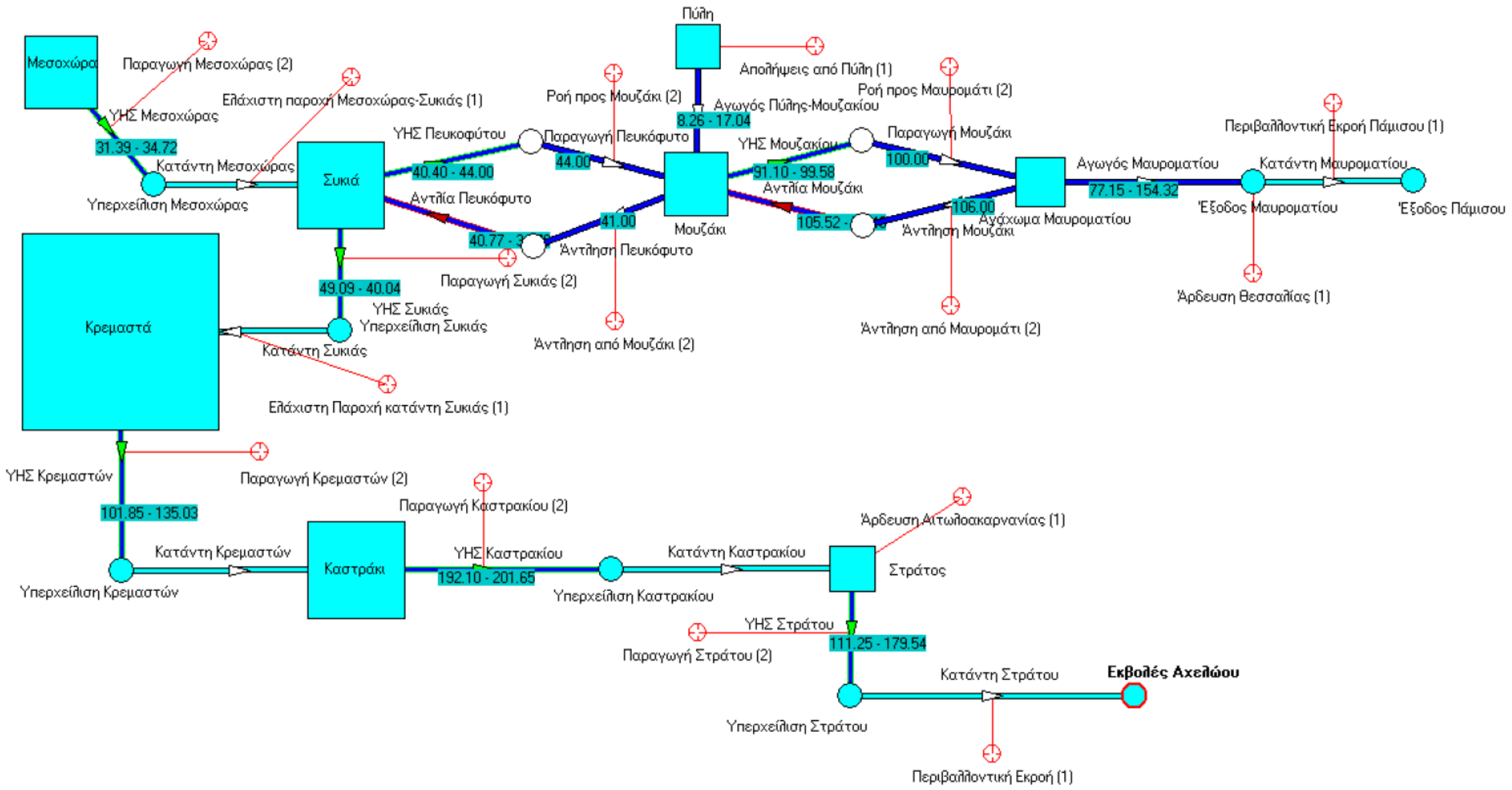
Λεκάνη: 531 km^2
Ωφ. Όγκος : 500 hm^3
ΥΗΣ : 120 MW

Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου (1)

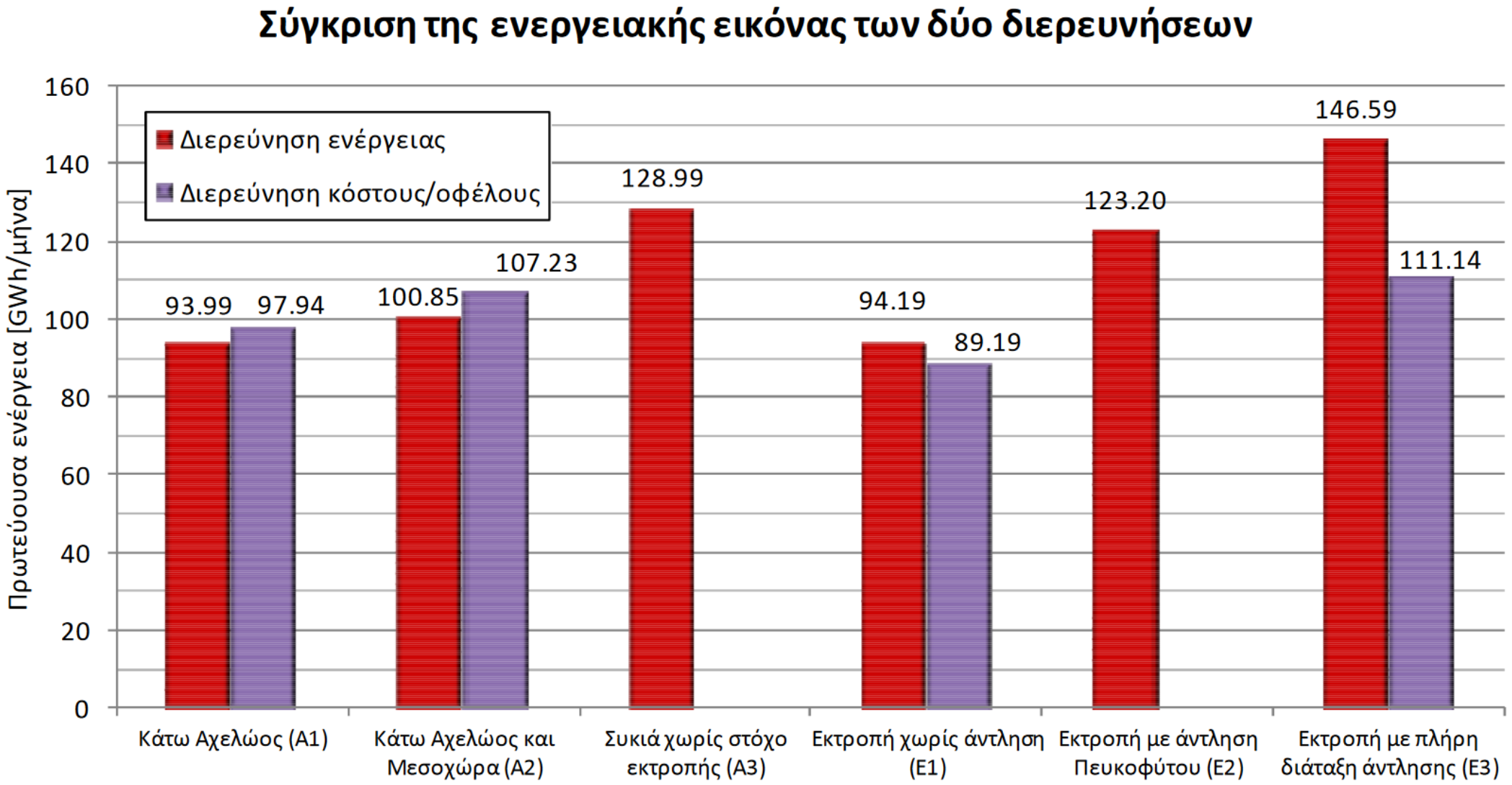
- Το υφιστάμενο σχήμα έργων (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος) παράγει το **42% της Υ/Η Ενέργειας της χώρας**
- Το πλήρες σχήμα θα αποτελέσει το **μεγαλύτερο σε ωφέλιμο όγκο (4700 hm^3) και εγκατεστημένη ισχύ (1.7GW)** υδρο-ενεργειακό σύστημα στηνΕλλάδα
- Ο ετήσιος όγκος εκτροπής έχει μειωθεί από τα 1100 και 600 hm^3 (αρχικός & ενδιάμεσος σχεδιασμός) στα μόλις **250 hm^3**
- Προβλέπονται **περιβαλλοντικοί περιορισμοί** στη λειτουργία των ταμιευτήρων, με τη μορφή **ελάχιστης διατηρητέας παροχής**
- Εξετάζονται τα **ακόλουθα σχήματα έργων**:

1. **A1:** Υφιστάμενη διάταξη έργων Κάτω Αχελώου (σενάριο αναφοράς)
2. **A2:** Πλήρης λειτουργική ένταξη του ταμιευτήρα Μεσοχώρας, ως έργου κεφαλής
3. **A3:** Ένταξη Συκιάς
4. **E1:** Ολοκλήρωση και λειτουργία έργων εκτροπής (Συκιάς, Μουζάκι, Πύλη), με συμβατικούς ΥΗΣ
5. **E2:** Πλήρες σχήμα έργων εκτροπής, με διατάξεις άντλησης-ταμίευσης στη σήραγγα Πευκόφυτου
6. **E3:** Πλήρες σχήμα έργων εκτροπής, με διατάξεις άντλησης-ταμίευσης στη σήραγγα Πευκόφυτου και κατάντη του Μουζακίου

Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου (1)



Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου (2)

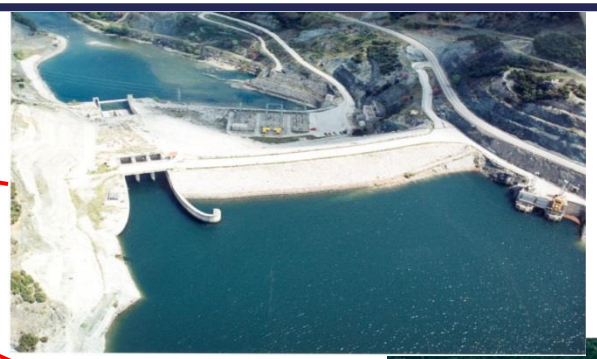


Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αχελώου (2)

Αποτελέσματα:

1. Συμβατική (χωρίς άντληση) εκτροπή νερού προς Θεσσαλία → **αρνητικές επιπτώσεις στην παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια** του συστήματος
2. Η διάταξη Ε3 **ισοσκελίζει την απώλεια**, **αυξάνει τα** εγγυημένα **ενεργειακά οφέλη**, καλύπτει **αρδευτική ζήτηση** Θεσσαλίας
3. Αλλαγή **της πολιτικής λειτουργίας** των ΥΗΣ Πευκοφύτου και Μουζακίου: με την Ε3 οι δύο ΥΗΣ λειτουργούν σε **συνεχή βάση**, «ανακυκλώνοντας» (κατά τη χειμερινή περίοδο) τα αποθέματα, ενώ στην **Ε1 περιορισμός παραγωγής την αρδευτική περίοδο**
4. Ετήσιο όφελος από ενεργειακή αξιοποίηση → συμβατική διάταξη εκτροπής → **83 M€** ετησίως, περιθώριο **αύξησής κατά 5 M€ με αντλιοστρόβιλους** (διάταξη Ε2)

Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αλιάκμονα (1)



Στρόβιλοι	Πολύφυτο	Σφηκιά	Ασώματα
Inlet level (m)	146,5	62	42
Outlet level (m)	0	0	0
Constant DC (m3/s)	320	630	320
Psi (GWh/hm4)	0,2133	0,224	0,2268
Installed capacity (MW)	360	315	110
Number of units	3	3	2

- Τρεις ταμιευτήρες **σε σειρά** (Πολύφυτο, Σφηκιά, Ασώματα) με **συνολική εγκατεστημένη** ισχύ 785 MW.
- Σύστημα **άντλησης-ταμίευσης** ανάμεσα σε **Σφηκιά-Ασώματα** (ισχύς αντλιών Σφηκιάς 324 MW).
- Κάλυψη πολλών **διαφορετικών** και **αντικρουόμενων** στόχων: Ύδρευση Θεσσαλονίκης, Άρδευση Υδατικού Διαμερίσματος, Ψύξη Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Πτολεμαΐδας, Υδροηλεκτρική Παραγωγή, Περιβαλλοντική Ροή.

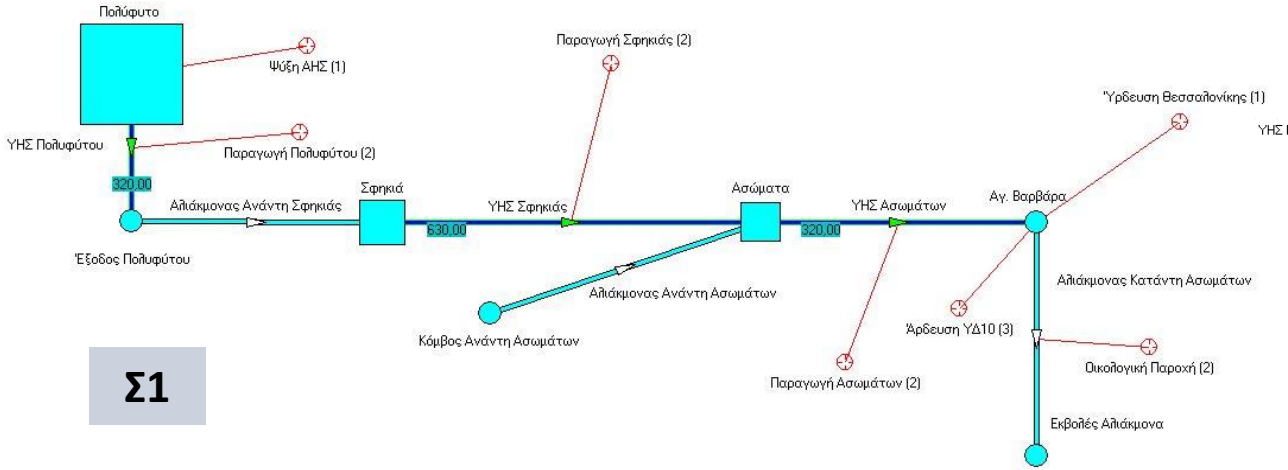
Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αλιάκμονα (2)

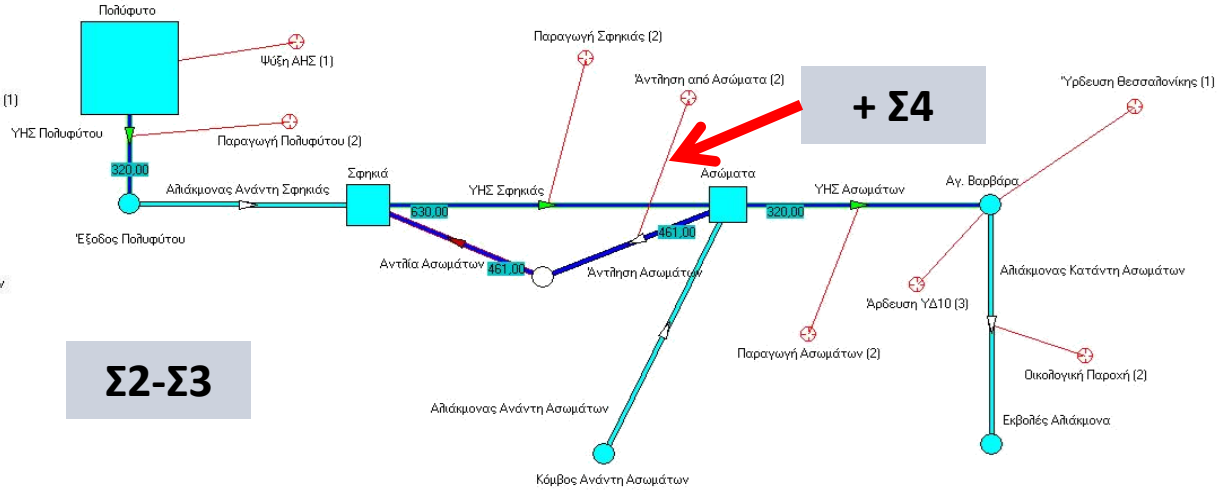
- Αν $E_i(t)$ είναι η ενέργεια που παράγεται από κάθε στρόβιλο, τότε η στοχική συνάρτηση θα είναι της μορφής $J(\theta) = \hat{\alpha}(E_1(t), E_2(t), ..., E_n(t))$ όπου ***α*** δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας. Χρησιμοποιήθηκαν δύο συναρτήσεις (Μπουζιώτας, 2012):

- **Total Generated Firm Power:** Η συνολική πρωτεύουσα ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το σύστημα. Εφαρμόζεται επί της συνολικής μηνιαίας χρονοσειράς. $J(\theta) = \hat{a}\left(\sum_{i=1}^{n} E_i(t)\right)$
- **Sum of Generated Firm Power:** Το άθροισμα της πρωτεύουσας ενέργειας κάθε έργου. Εφαρμόζεται επί των επιμέρους μηνιαίων χρονοσειρών και μετά γίνεται άθροιση. $J(\theta) = \sum_{i=1}^{n} \hat{a}(E_i(t))$

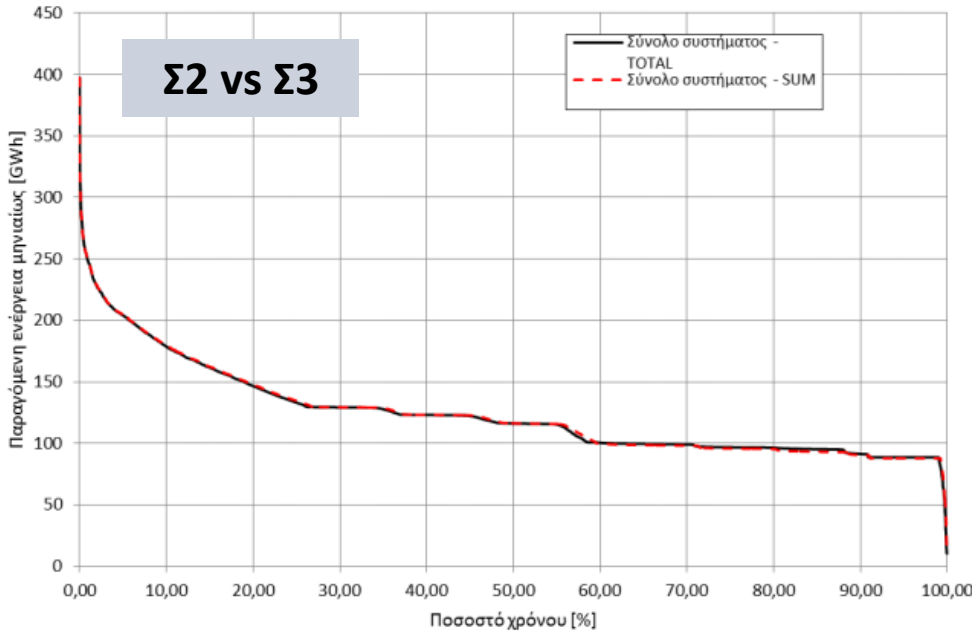
- **Σενάρια Μελέτης:**

- **Σενάριο Σ1:** χωρίς αντλητική διάταξη
- **Σενάριο Σ2:** με αντλητική διάταξη, απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της Sum of Generated Firm Power
- **Σενάριο Σ3:** με αντλητική διάταξη, απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της TotalGenerated Firm Power
- **Σενάριο Σ4:** με αντλητική διάταξη και στόχο άντλησης, επιρροή στην παραγόμενη ενέργεια

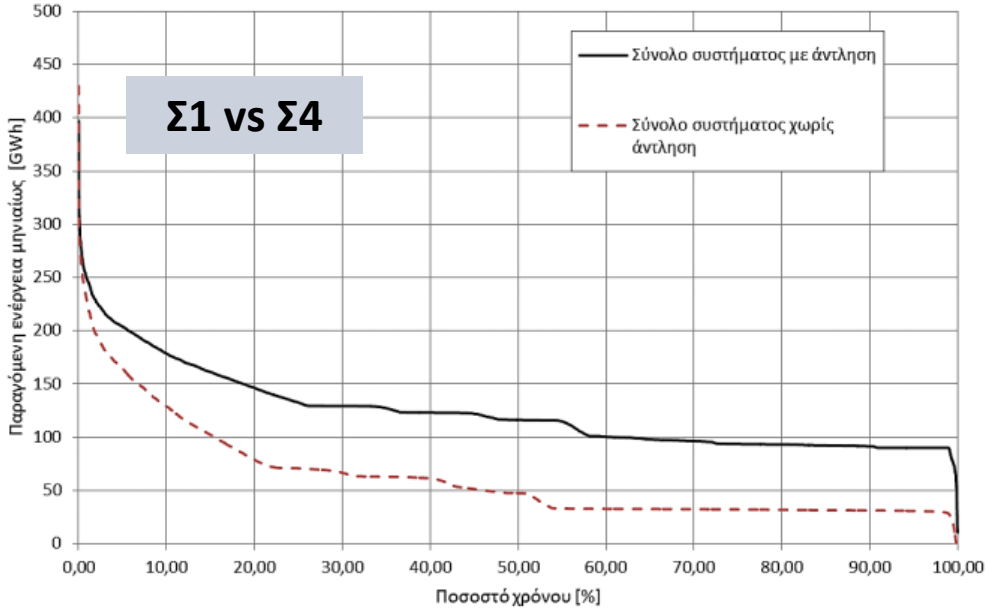




Εφαρμογή στο υδροσύστημα Αλιάκμονα (3)



Μικρές διαφορές, ωστόσο η **Total Generated Firm Power** οδηγεί σε ελαφρώς **υψηλότερες τιμές** ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, οι οποίες έχουν και πρακτική χρησιμότητα εφόσον δίνουν **μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια**



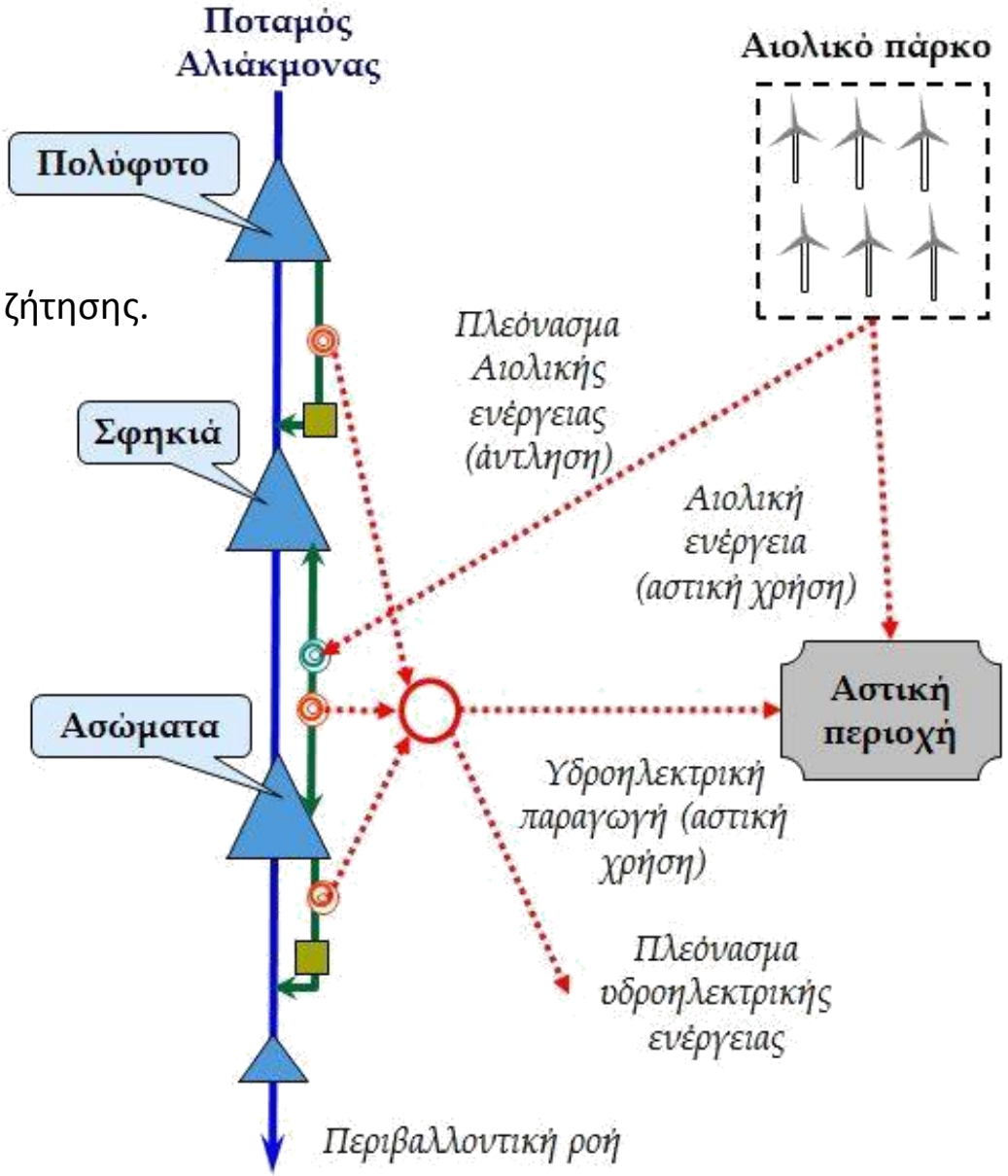
Παρουσία συστήματος άντλησης – ταμίευσης → **δραματική αύξηση της πρωτεύουσας ενέργειας** ,μειώνοντας παράλληλα **ελάχιστα** το ποσοστό αξιοπιστίας: από **27.34 GWh** για αξιοπιστία **99%** στο σενάριο Σ1, μεταπηδούμε σε **89.96 GWh** για αξιοπιστία **98.8%** → **υπερτριπλασιασμός της πρωτεύουσας ενέργειας**

Σχεδιασμός υποθετικού υβριδικού συστήματος αιολικής – ΥΗΕ (1)

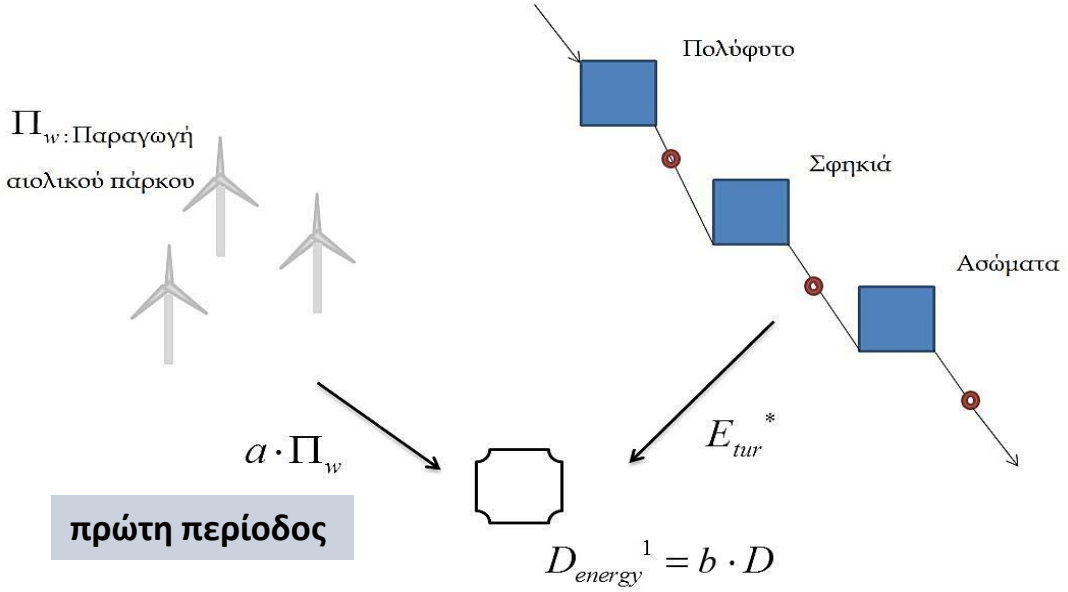
- **Θεωρούμε δύο περιόδους λειτουργίας** (ώρες λειτουργίας στροβίλων και ώρες λειτουργίας αντλίας). Οι **παράμετροι σχεδιασμού** είναι:
  - Το ποσοστό λειτουργίας των στροβίλων, α
  - Το ποσοστό της ζήτησης των ωρών της ημέρας, b, ως % της μέσης ημερήσιας ζήτησης.
  - Τη μέση ημερήσια ζήτηση, D
  - Τον αριθμό των ανεμογεννητριών, n
- Επιλέγουμε την κατάστρωση τεσσάρων σεναρίων.

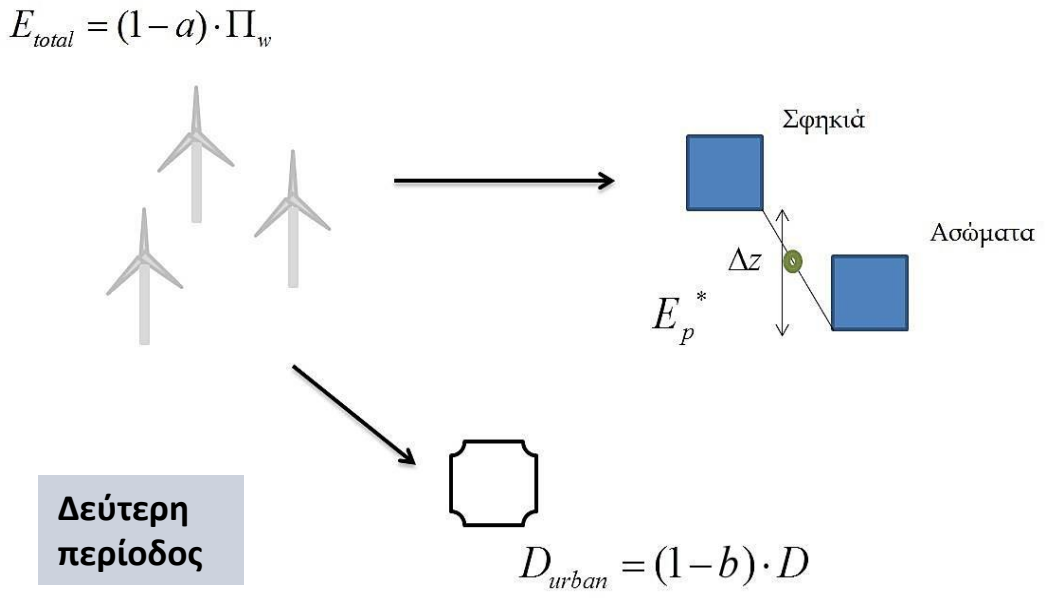
Για κάθε σενάριο **παρουσιάζονται τα εξής αποτελέσματα:**

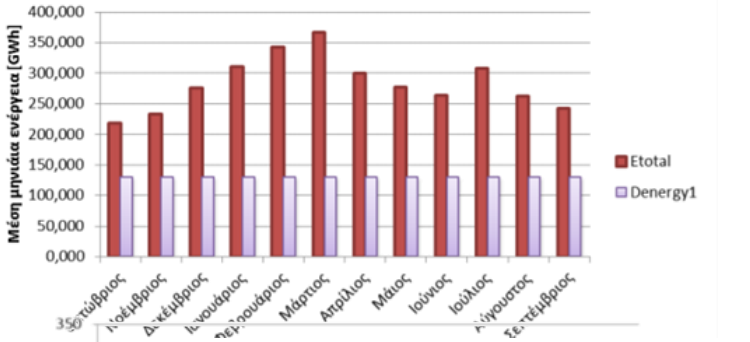
- Η μέση μηνιαία E_{total} για την πρώτη περίοδο λειτουργίας.
- Η μέση μηνιαία $D_{energy}{}^{1}$ για την πρώτη περίοδο λειτουργίας.
- Η μέση μηνιαία E_{total} για την δεύτερη περίοδο λειτουργίας.
- Η μέση μηνιαία $D_{energy}{}^{2}$ για την δεύτερη περίοδο λειτουργίας.
- Οι πιθανότητες αστοχίας του συνδυασμένου συστήματος P_1 , P_2
- Το μέσο έλλειμμα κάθε περιόδου $AvDef_1$ και $AvDef_2$.

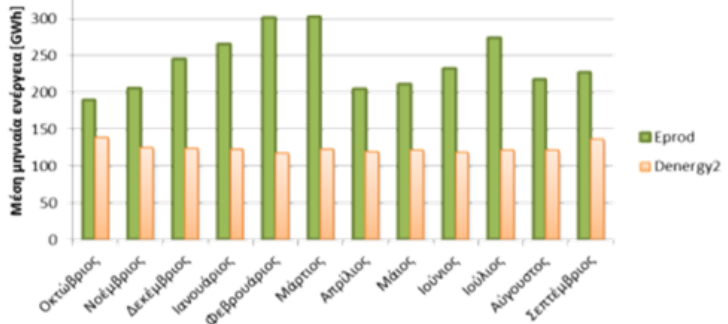


Σχεδιασμός υποθετικού υβριδικού συστήματος αιολικής – ΥΗΕ (2)









Ως **βέλτιστος σχεδιασμός** μετά τους υπολογισμούς προκύπτει εκείνος που θα λειτουργούν **750 ανεμογεννήτριες** με τα **ποσοστά α και b** να διαμορφώνονται σε **40%** και **87%** και τις πιθανότητες αστοχίας **p1, p2** να είναι **0.05%** και **4.96%** αντίστοιχα

απεικονίσεις **χαρακτηριστικές των διακυμάνσεων της υδροηλεκτρικής και της αιολικής παραγωγής** ανάμεσα στους διαφορετικούς μήνες

Συμπεράσματα

- **<u>Υδρονομέας:</u>** ανάδειξη του υδροενεργειακού δυναμικού του συστήματος, διερεύνηση της αλληλεπίδρασής του με **αντικρουόμενες χρήσεις** νερού, **εξαγωγή αξιόπιστων στατιστικών συμπερασμάτων**, μη εξαρτώμενων από το μικρό μήκος των ιστορικών δειγμάτων, **φειδωλή** παραμετροποίηση
- **<u>Σύστημα Αχελώου:</u>**

1. Η **προσθήκη της Μεσοχώρας** στο σύστημα θα το καταστήσει πιο αξιόπιστο και **θα ενισχύσει τη μέση ετήσια ενεργειακή παραγωγή κατά 225 GWh**, ήτοι **10 M€**
2. Η **υλοποίηση** της πρότασης για **άντληση-ταμίευση** θα έχει θεαματικά αποτελέσματα στην αξιοπιστία της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, **αυξάνοντας την παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια από τις 94 στις 147 GWh/μήνα**, χωρίς να υπομονεύει το στόχο της ασφαλούς κάλυψης των αρδευτικών ζητήσεων

- **<u>Σύστημα Αλιάκμονα:</u>**

1. **Total Generated Firm Power** → υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, οι οποίες έχουν και **πρακτική χρησιμότητα** εφόσον δίνουν **μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια**
2. **Παρουσία στόχου άντλησης** με παράλληλη εφαρμογή της συνάρτησης Total Generated Firm Power **αυξάνει την πρωτεύουσα ενέργεια** → άντληση/ταμίευση αποτελεί αξιόπιστη μέθοδο2 για την αποθήκευση ενέργειας

- **<u>Σχεδιασμός του υποθετικού υβριδικού συστήματος:</u>**

  Με **μείωση του ποσοστού λειτουργίας των στροβίλων** μπορεί ταυτόχρονα να **αυξάνεται η εγγυημένη κάλυψη της 2ης περιόδου λειτουργίας** ή **μείωση του απαιτούμενου αριθμού των ανεμογεννητριών**

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Chow V., D.R. Maidment and L.W. Mays, Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988.
2. Tsoukalas I., Dimas P., Makropoulos C., Hydrosystem optimization on a budget: Investigating the potential of surrogate based optimization techniques, publication descriptionMathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA) Journal, Special issue on Mathematical Models and Methods for Environmental Systems & Related Topics, 2015.
3. Αντωναρόπουλος Π. & Συνεργάτες. Μελέτη διαχείρισης των υδάτων λεκάνης απορροής Αχελώου π., Μέρος Α': Υδατικό δυναμικό. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργω, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων ΕΥΔΕ/ΟΣΥΕ, 2006, 153.
4. Αργυράκης Ι., Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως έργων Πολλαπλού Σκοπού, Η Συμβολή των Υδροηλεκτρικών Έργων στον Ενεργειακό Σχεδιασμό της Χώρας, Ιωάννινα, ΤΕΕ, 2009.
5. Στεφανάκος Ι., Σημειώσεις μαθήματος Υδροηλεκτρικών Έργων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, 2008.
6. Ευστρατιάδης Α., Δ. Κουτσογιάννης, και Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, Δεύτερο Διεθνές Συνέδριο "Περιβάλλον - Βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων", Αθήνα, Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδας, European Council of Civil Engineers, 2007.
7. Ιωάννου Χ., Στοχαστική προσομοίωση και βελτιστοποίηση υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας, Διπλωματική εργασία, 122 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2012.
8. Κουτσογιάννης, Δ. Γενική διάταξη έργων εκτροπής Αχελώου προς Θεσσαλία: Υδρολογική Διερεύνηση. Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων Αχελώου – Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων – Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, 1996, 44.
9. Μπουζιώτας Δ., Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό Υδρονομέας - Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας, Διπλωματική εργασία, 162 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2012.

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!