

# Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

## Υδροηλεκτρική ενέργεια και συστήματα νερού-ενέργειας



Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2023-24

# Ιστορική αναδρομή

- Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας πραγματοποιούνταν από την αρχαιότητα μέσω των υδρόμυλων/υδροτροχών, για το άλεσμα των δημητριακών και την κοπή ξυλείας (υδροπρίονα) → μετατροπή σε μηχανική ενέργεια.
- Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού έγινε στα τέλη του 19ου αιώνα (1880 πειραματικά, 1891 επιχειρησιακά).



**Υδρόμυλοι στην πόλη Hama της Συρίας (διασώζονται 17 από τους 30)**  
(Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Norias\\_of\\_Hama](https://en.wikipedia.org/wiki/Norias_of_Hama))

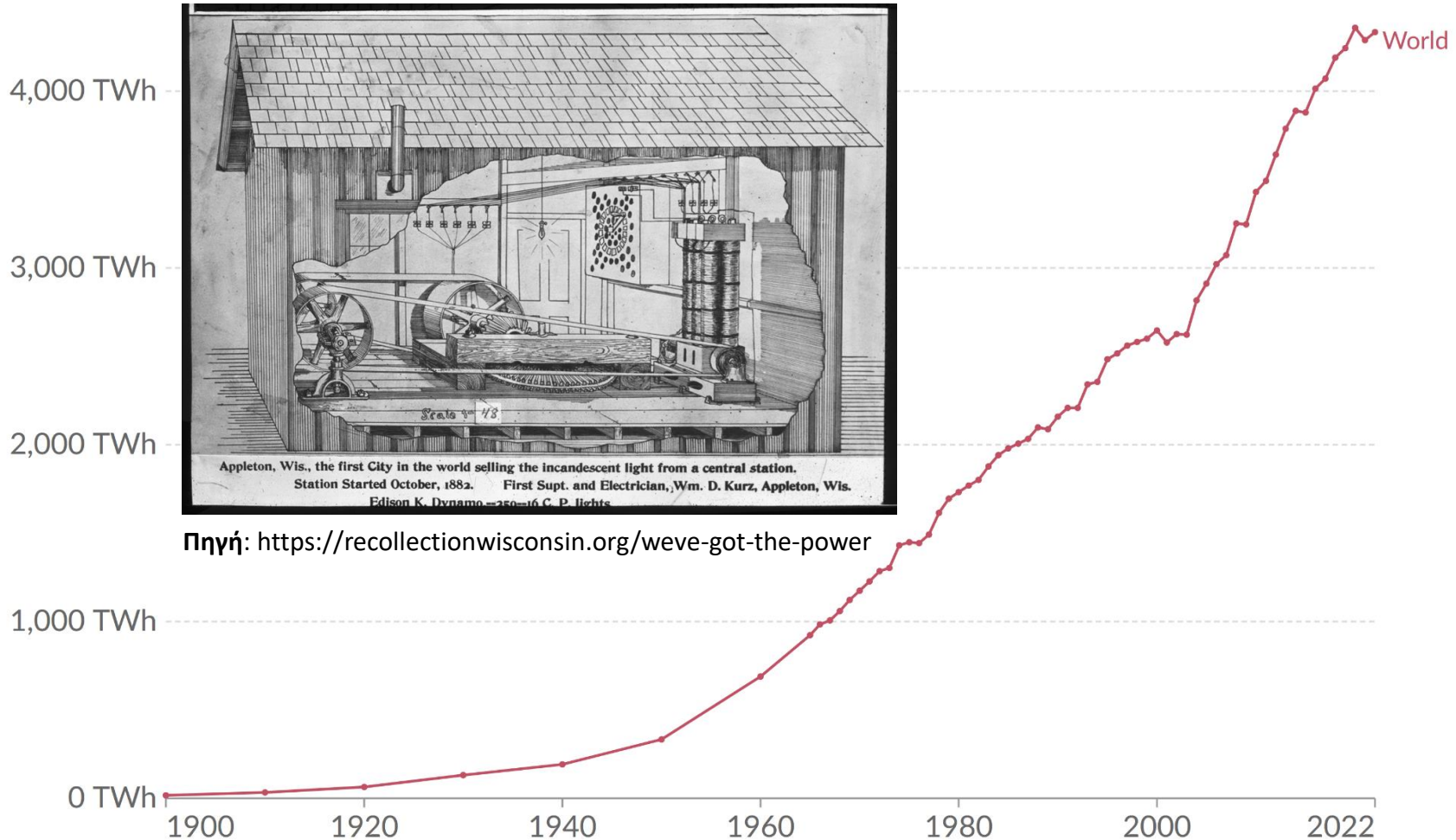


# Χρονική εξέλιξη υδροηλεκτρικής ενέργειας

## Global hydropower consumption

Hydropower consumption is measured in terawatt-hours (TWh) per year.

Our World  
in Data



Πηγή: <https://recollectionwisconsin.org/weve-got-the-power>

Data source: Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023); Vaclav Smil (2017)

[OurWorldInData.org/renewable-energy](https://OurWorldInData.org/renewable-energy) | CC BY

# Τα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα του κόσμου



# Υδροηλεκτρικά έργα στην Ελλάδα



## Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα

- ΑΓΡΑΣ (1954, 50 MW)
- ΛΑΔΩΝΑΣ (1955, 70 MW)
- ΠΛΑΣΤΗΡΑΣ (1960, 130 MW)
- ΚΡΕΜΑΣΤΑ (1966, 437 MW)
- ΚΑΣΤΡΑΚΙ (1969, 320 MW)
- ΕΔΕΣΣΑΙΟΣ (1969, 19 MW)
- ΠΟΛΥΦΥΤΟ (1974, 375 MW)
- ΠΟΥΡΝΑΡΙ (1981, 300 MW)
- ΑΣΩΜΑΤΑ (1985, 110 MW)
- ΣΦΗΚΙΑ (1985, 315 MW)
- ΣΤΡΑΤΟΣ I (1989, 156 MW)
- ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ (1990, 210 MW)
- ΘΗΣΑΥΡΟΣ (1997, 348 MW)
- ΠΟΥΡΝΑΡΙ II (1999, 32 MW)
- ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ (1999, 116 MW)
- ΙΛΑΡΙΩΝΑΣ (2013, 157 MW)

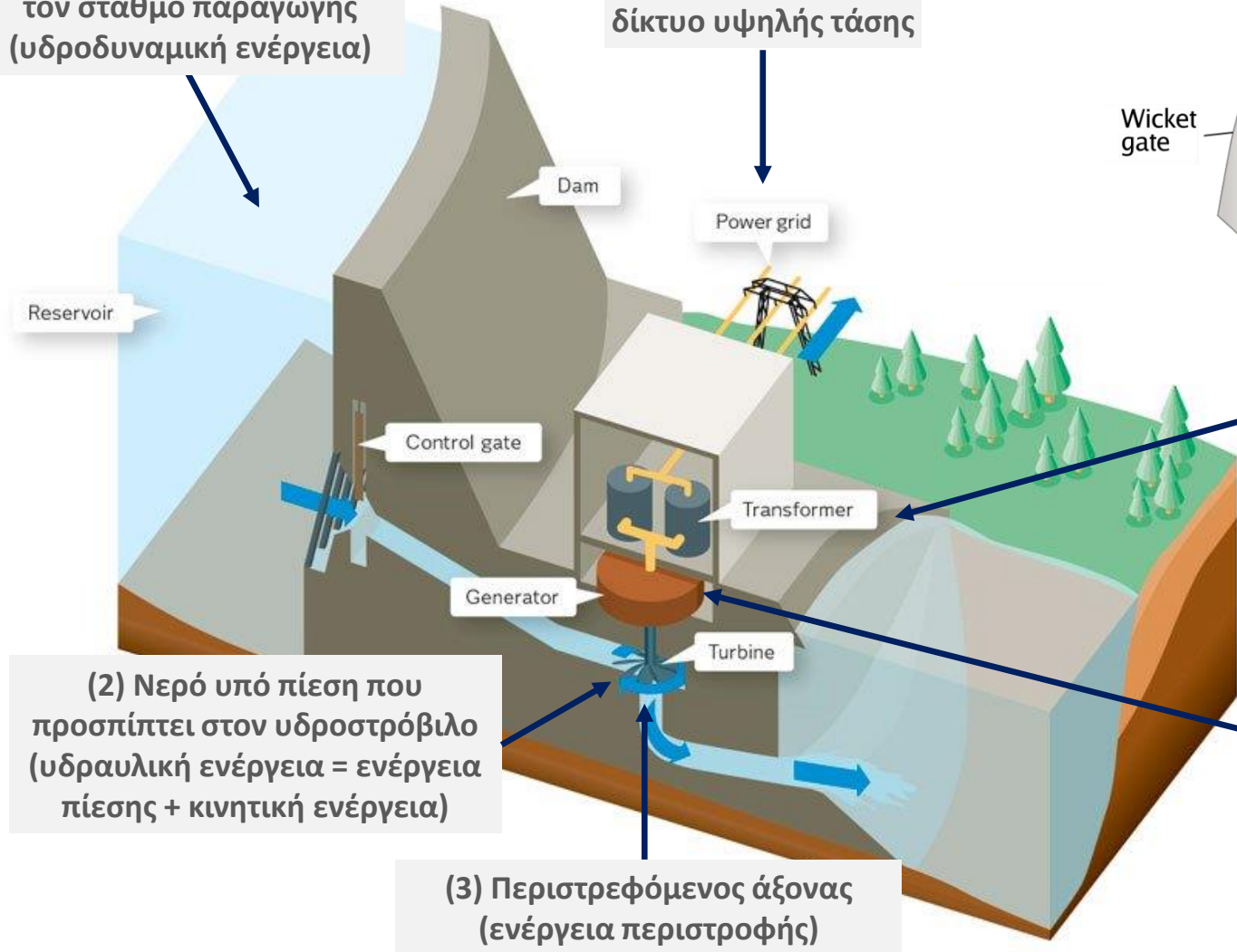
Συνολική ισχύς: 3171 MW  
(+250 MW από μικρά ΥΗΕ)

Θεωρητικό υδροδυναμικό: 80 TWh  
Εκμεταλλεύσιμο: 15-20 TWh  
Μέση ετήσια παραγωγή: 4 TWh

# Συνιστώσες συστήματος παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας

(1) Αποθηκευμένο νερό σε υψομετρική διαφορά από τον σταθμό παραγωγής (υδροδυναμική ενέργεια)

(6) Ηλεκτρικό ρεύμα που αποδίδεται στο δίκτυο υψηλής τάσης

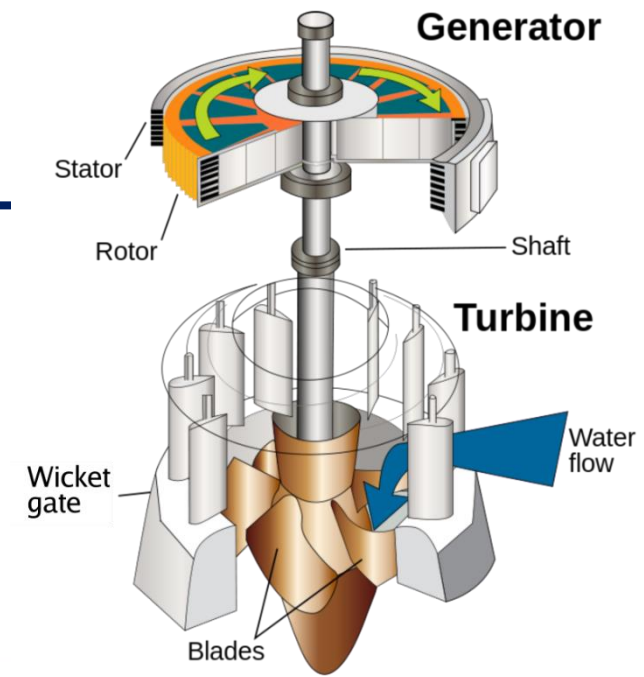


(2) Νερό υπό πίεση που προσπίπτει στον υδροστρόβιλο (υδραυλική ενέργεια = ενέργεια πίεσης + κινητική ενέργεια)

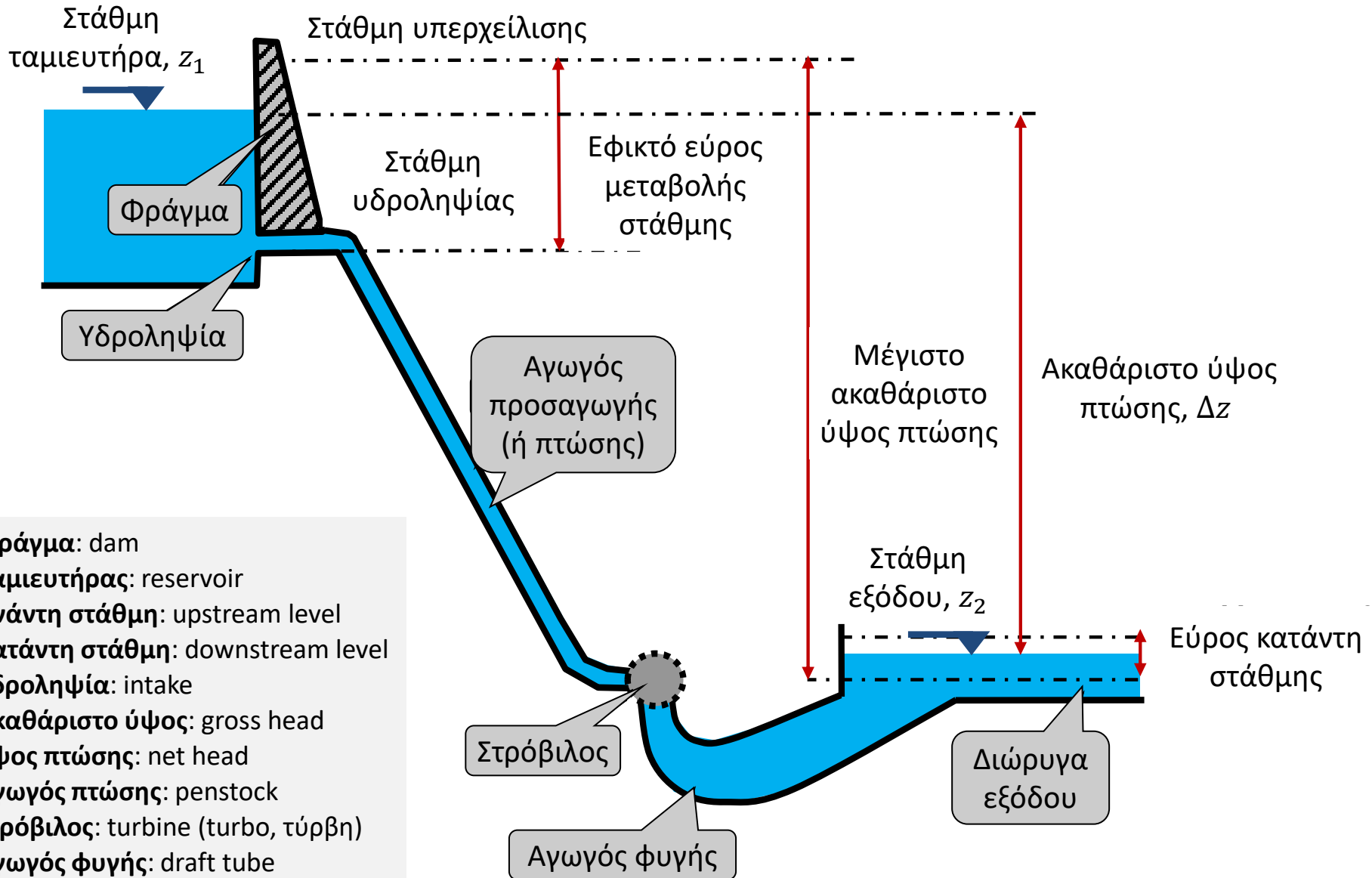
(3) Περιστρεφόμενος άξονας (ενέργεια περιστροφής)

(5) Μετασχηματιστής (ρεύμα χαμηλής τάσης σε υψηλής ή υπερυψηλής)

(4) Ηλεκτρογεννήτρια (στάτορας → μαγνήτες & ρότορας → πηνία): ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλή τάσης



# Σχηματική διάταξη και υδροενεργειακά μεγέθη



- Φράγμα: dam
- Ταμιευτήρας: reservoir
- Ανάτη στάθμη: upstream level
- Κατάντη στάθμη: downstream level
- Υδροληψία: intake
- Ακαθάριστο ύψος: gross head
- Ύψος πτώσης: net head
- Αγωγός πτώσης: penstock
- Στρόβιλος: turbine (turbo, τύρβη)
- Αγωγός φυγής: draft tube
- Διώρυγα εξόδου: tailrace

# Βασικές έννοιες υδροηλεκτρικής ενέργειας

- **Δυναμική ενέργεια νερού** μάζας  $m$  (kg) σε υψομετρική διαφορά  $\Delta z$  (m) από το επίπεδο αναφοράς των στροβίλων (υδροδυναμική ενέργεια ή **υδροδυναμικό**, σε kJ):

$$E_d = m g \Delta z = \rho g V \Delta z = \gamma V \Delta z$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του νερού ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\gamma$  το ειδικό βάρος του νερού ( $9.81 \text{ kN/m}^3$ ) και  $V$  ο όγκος ( $\text{m}^3$ ). Στα υδροενεργειακά έργα, η υψομετρική διαφορά  $\Delta z$  αναφέρεται ως **ολικό ή ακαθάριστο ύψος πτώσης**.

- Μετατροπή υδροδυναμικής ενέργειας σε **υδραυλική**:

$$E_h = E_d - \Delta E = \gamma V (\Delta z - \Delta H)$$

όπου  $\Delta H$  οι **υδραυλικές απώλειες** (σε όρους ύψους νερού) κατά τη **προσαγωγή** του νερού στους στροβίλους. Θέτοντας  $h_n = \Delta z - \Delta H$ , η σχέση (2) γράφεται:

$$E_h = \gamma V h_n$$

όπου  $h_n$  το λεγόμενο **καθαρό ύψος πτώσης**.

- Μετατροπή υδραυλικής ενέργειας σε **κινητική (στρόβιλος)** και **ηλεκτρική (γεννήτρια)**:

$$E = \eta E_h = \eta \gamma V h_n$$

όπου  $\eta$  ο συνολικός **βαθμός απόδοσης** του Η/Μ συστήματος.

- Η ποσότητα  $1 - \eta$  εκφράζει το ποσοστό των ενεργειακών απωλειών κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας που διατίθεται στην είσοδο του υδροστροβίλου σε ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο (έξοδος συστήματος).



# Χαρακτηριστικά μεγέθη σχεδιασμού

- Ο ρυθμός μεταβολής του όγκου ενός ρευστού καλείται **ροή** (flow) ή **παροχή** (discharge):

$$Q = dV/dt$$

- Κατά τη λειτουργία του έργου, η παροχή ρυθμίζεται μέσω των **πτερυγίων των στροβίλων**.

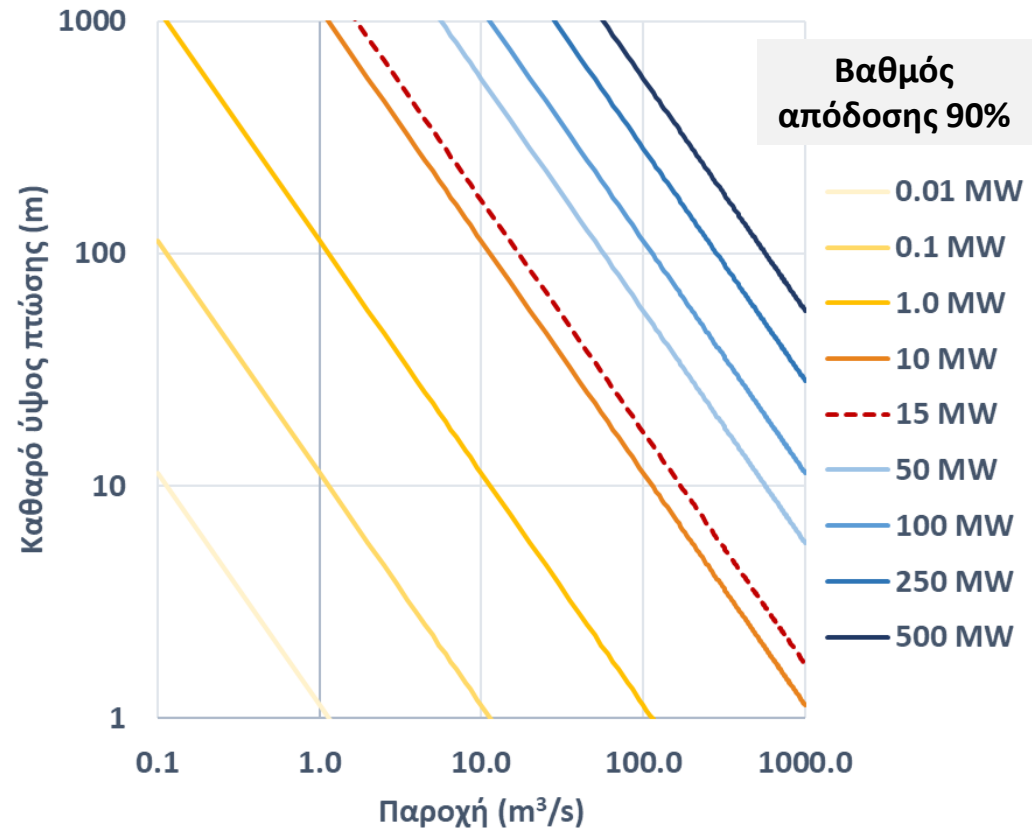
- Αφού  $P = dE/dt$ , υποθέτοντας σταθερό βαθμό απόδοσης και σταθερό ύψος πτώσης, η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται είναι:

$$P = \eta \gamma Q h_n$$

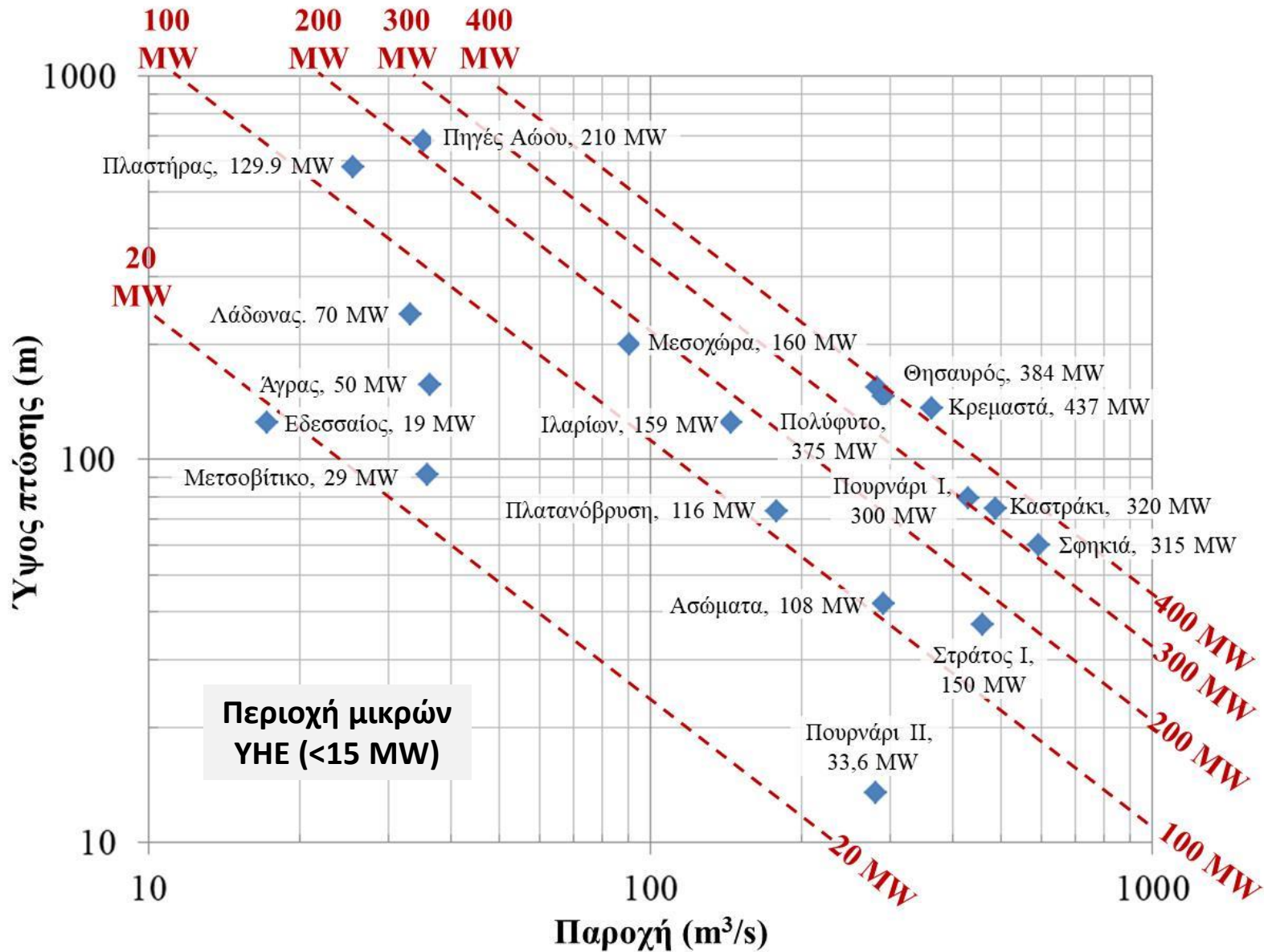
- Χαρακτηριστικά **μεγέθη σχεδιασμού**:

- μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει από τον αγωγό προσαγωγής και τους στροβίλους (**παροχετευτικότητα,  $Q_{max}$** )
- συνολική ισχύς υδροστροβίλων (**εγκατεστημένη ισχύς,  $P_{max}$** )
- **πλήθος και τύπος υδροστροβίλων**

- Για λόγους ευελιξίας και ασφάλειας, στα μεγάλα Υ/Η έργα η συνολική ισχύς επιμερίζεται σε τμήματα (διαμόρφωση **μίγματος υδροστροβίλων**, συνήθως όμοιων).



# Συνδυασμοί ( $P, Q, h_n$ ) μεγάλων Υ/Η έργων στην Ελλάδα



# Υδρολογικά και υδραυλικά μεγέθη

---

- Ο όγκος νερού  $V$  που μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από:
  - τα υδρολογικά χαρακτηριστικά στη θέση υδροληψίας (απορροή ανάντη λεκάνης)
  - τη δυνατότητα αποθήκευσης του νερού, μέσω ταμιευτήρα, και τους περιορισμούς που διέπουν τη λειτουργία του (π.χ. αν εξυπηρετεί και άλλες χρήσεις νερού)
  - τους τεχνικούς περιορισμούς των έργων προσαγωγής (παροχетеυτικότητα,  $Q_{max}$ )
- Οι υδραυλικές απώλειες  $\Delta H$  κατά τη μεταφορά του νερού μέσω του αγωγού προσαγωγής (αναφέρεται και ως αγωγός πτώσης) στους υδροστροβίλους εξαρτώνται από:
  - την παροχή του αγωγού ( $Q = dV/dt \leq Q_{max}$ )
  - τα γεωμετρικά μεγέθη του αγωγού (μήκος, διάμετρος)
  - το υλικό και ηλικία του αγωγού, και την ύπαρξη φερτών στη ροή (τραχύτητα)
  - τις γεωμετρικές μεταβολές στη διαδρομή του νερού (στροφές, στενώσεις, κτλ.)
- Γενική σχέση υδραυλικών απωλειών:

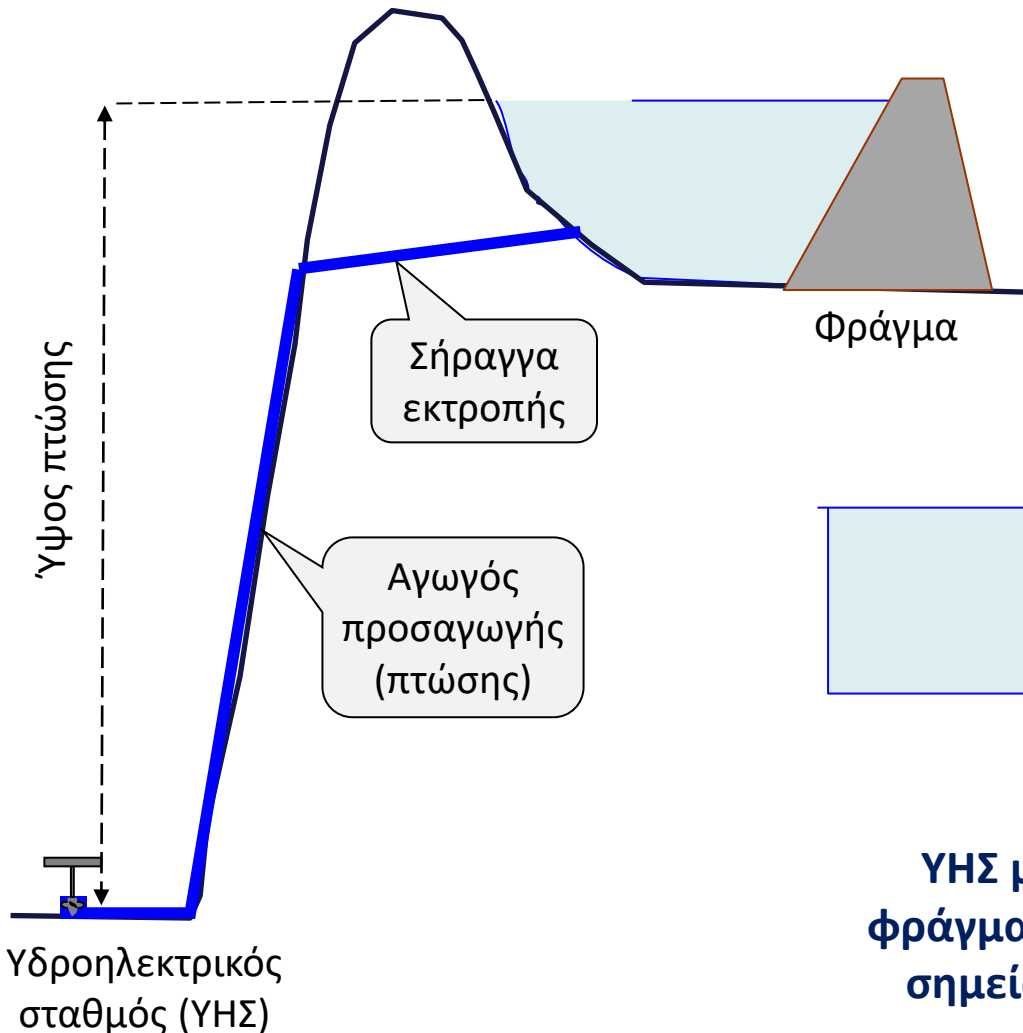
$$\Delta H = J L + h_L$$

όπου  $J$  η υδραυλική κλίση (απώλειες λόγω τριβών, ανά μέτρο μήκους),  $L$  το μήκος του αγωγού και  $h_L$  οι τοπικές απώλειες που οφείλονται στις γεωμετρικές μεταβολές.

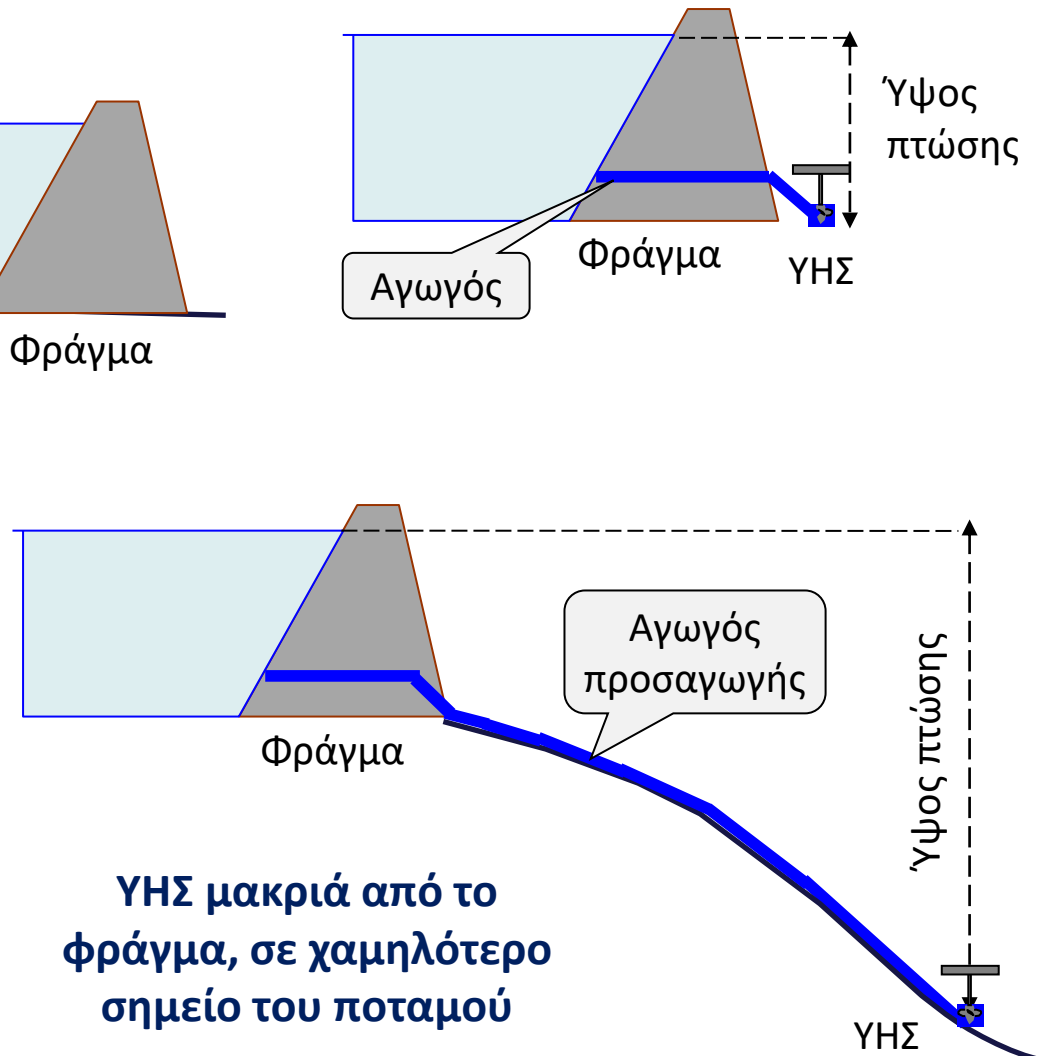
- Κατά την χωροθέτηση των έργων, ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση της υψομετρικής διαφοράς με ελαχιστοποίηση του μήκους προσαγωγής και των υδραυλικών απωλειών (ενδεικτικό επιθυμητό ποσοστό έως 5% του ακαθάριστου ύψους πτώσης).

# Γενικές διατάξεις υδροηλεκτρικών έργων

ΥΗΣ μακριά από το φράγμα, σε  
γειτονική λεκάνη (φράγμα εκτροπής)

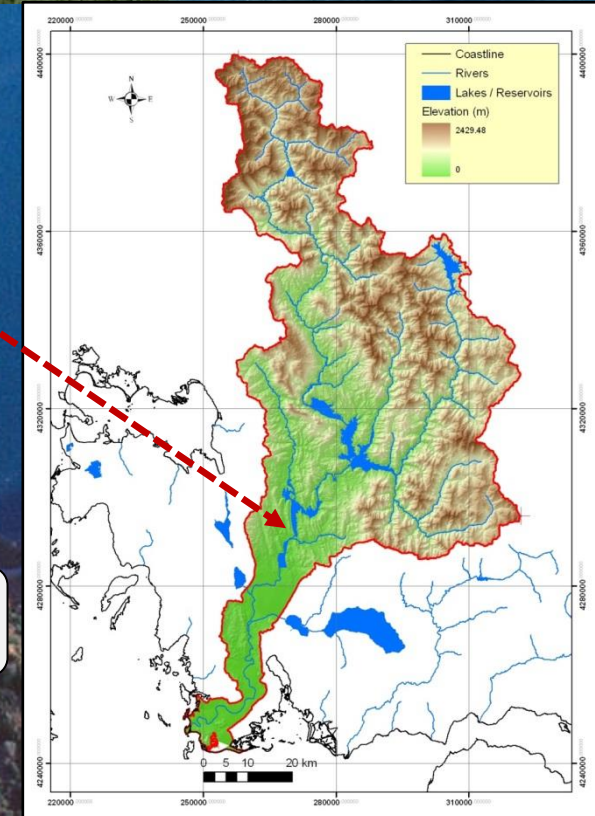


ΥΗΣ κοντά στον πόδα του φράγματος,  
(ύψος πτώσης  $\approx$  ύψος φράγματος)



# Παράδειγμα: Καστράκι (Αχελώος)

- Ταμιευτήρας χωρητικότητας  $950 \text{ hm}^3$
- Υδροληψία  $+142.0 \text{ m}$ , υπερχειλίση  $+144.2 \text{ m}$  → ωφέλιμος όγκος  $50 \text{ hm}^3$  ( $+50 \text{ hm}^3$ , θυροφράγματα)
- Ισχύς  $4 \times 80 = 320 \text{ MW}$  (Francis)



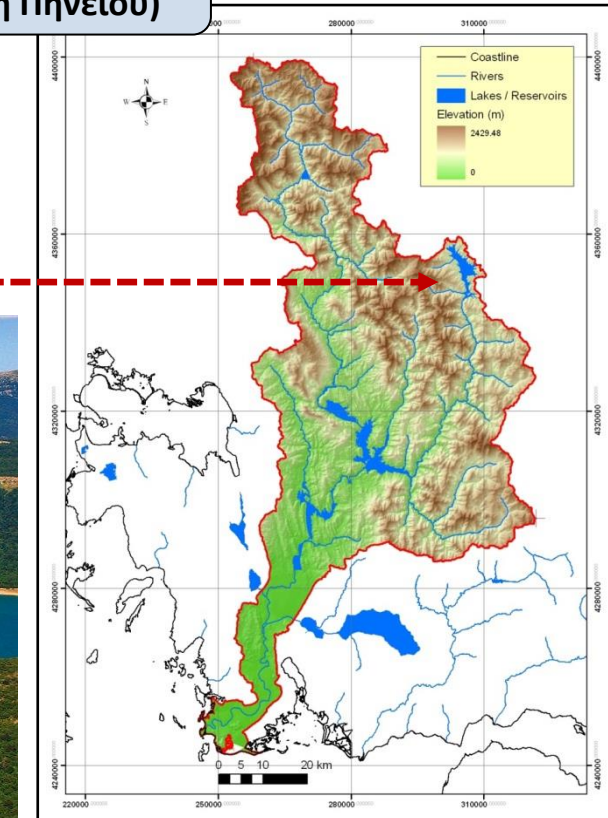
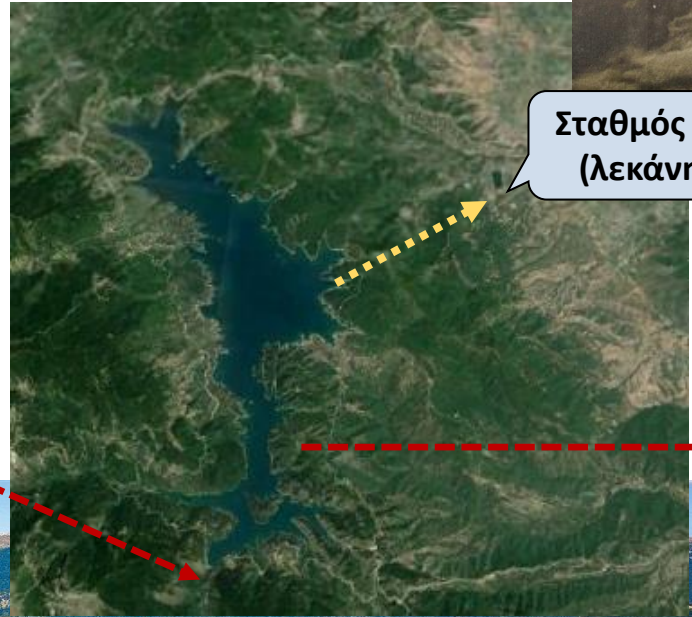
# Παράδειγμα: Μεσοχώρα (Αχελώος)

- Υδροληψία +731.0 m, υπερχείλιση +770.0 m → ωφέλιμος όγκος 225 hm<sup>3</sup>
- Προσαγωγή μέσω σήραγγα εκτροπής, μήκους 7.5 km (έξοδος ΥΗΣ +550.0 m)
- Μέγιστο ύψος πτώσης 220 m
- Ισχύς 2×80 = 160 MW (Francis)
- Έργο πρακτικά ολοκληρωμένο από το 2001, εκτός λειτουργίας



# Παράδειγμα: Πλαστήρας (Αχελώος)

- Ταμιευτήρας χωρητικότητας 362 hm<sup>3</sup>
- Υδροληψία +776.0 m, υπερχείλιση +792.0 m → ωφέλιμος όγκος 286 hm<sup>3</sup>
- Μέγιστο ύψος πτώσης 586 m (έξοδος ΥΗΣ +206.0 m)
- Ισχύς 130 MW (3 Pelton)



# Υδροστρόβιλοι

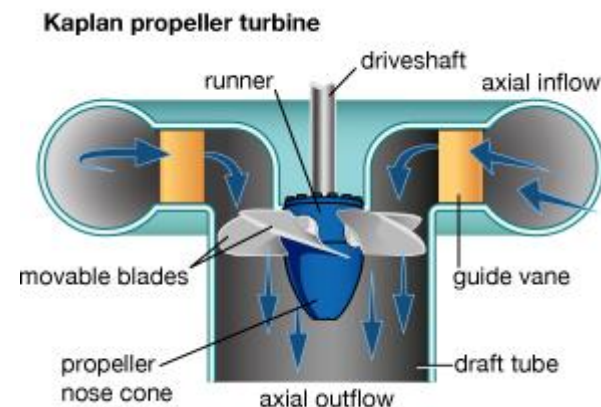
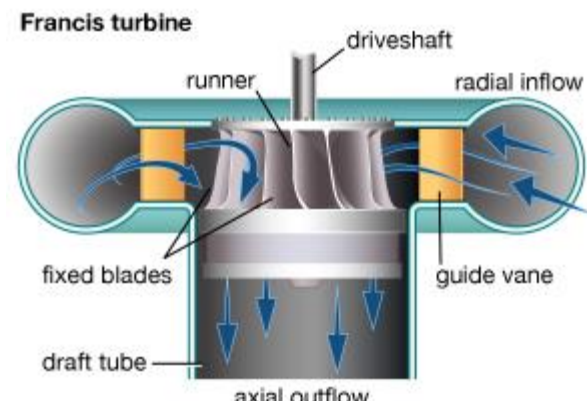
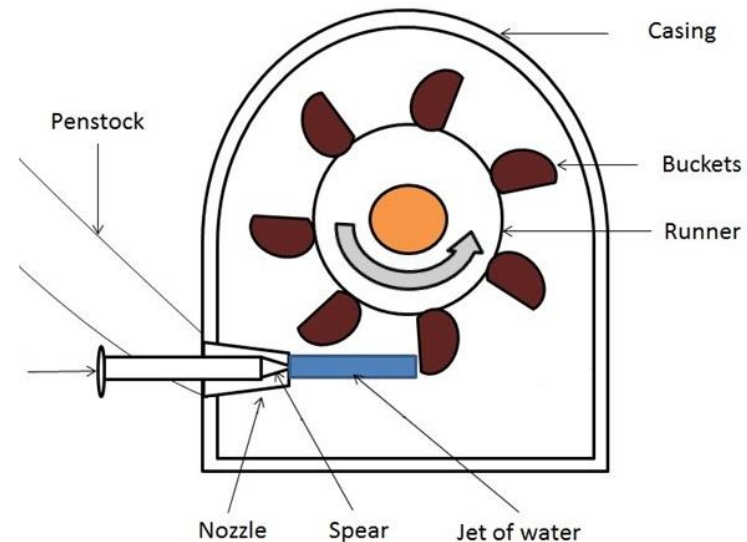
- **Σκοπός:** Μετατροπή υδραυλικής ενέργειας σε περιστροφική κινητική ενέργεια ενός άξονα, οριζόντιου ή κατακόρυφου.
- Διακρίνονται σε **στροβίλους δράσης** (εκροή στην ατμόσφαιρα, αξιοποιείται η κινητική ενέργεια του νερού) και **στροβίλους αντίδρασης** (ροή υπό πίεση)

## Στρόβιλοι δράσης ή μερικής προβολής

- **Pelton:** Η ροή προσπίπτει στον δρομέα μέσω ακροφυσίου, με τη μορφή τζετ πολύ υψηλής ταχύτητας. Ενδείκνυνται για πολύ μεγάλα ύψη πτώσης και σχετικά μικρές παροχές.
- **Cross-flow:** Η ροή διέρχεται δύο φορές από τον δρομέα. (δυνατότητα αυτοκαθαρισμού). Ενδείκνυνται για ΜΥΗΕ.

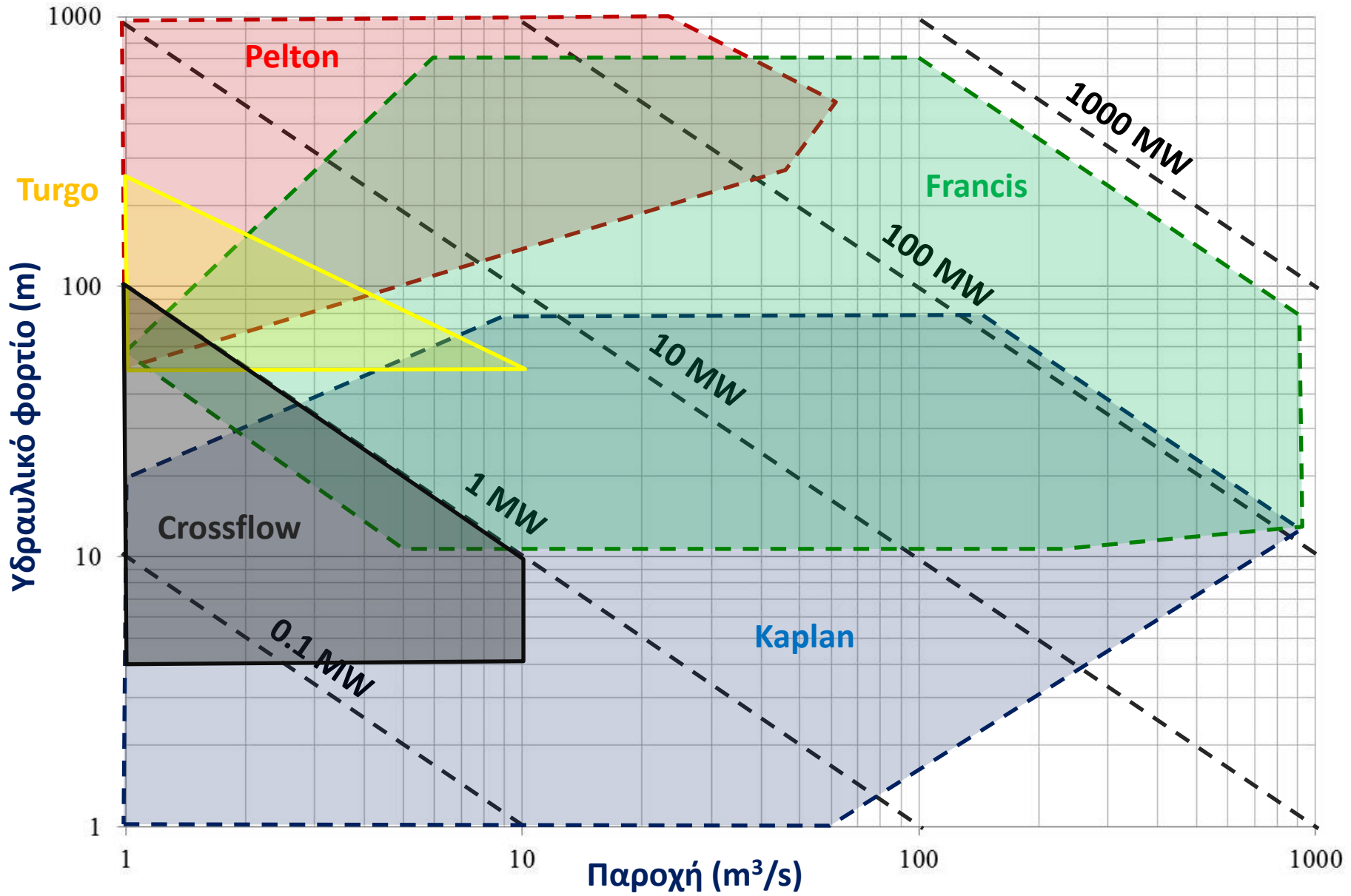
## Στρόβιλοι αντίδρασης ή ολικής προσβολής

- **Francis:** Τυπικός τύπος στροβίλων για μεγάλα Υ/Η έργα. Κατάλληλοι για μέτρια ύψη πτώσης (60 ως 150 m) και αρκετά μεγάλο εύρος παροχών.
- **Kaplan:** Ενδείκνυται για μικρά ύψη πτώσης και μεγάλες παροχές. Κατάλληλοι για χαμηλά φράγματα σε μεγάλα ποτάμια και για ΜΥΗΕ σε υδραγωγεία.



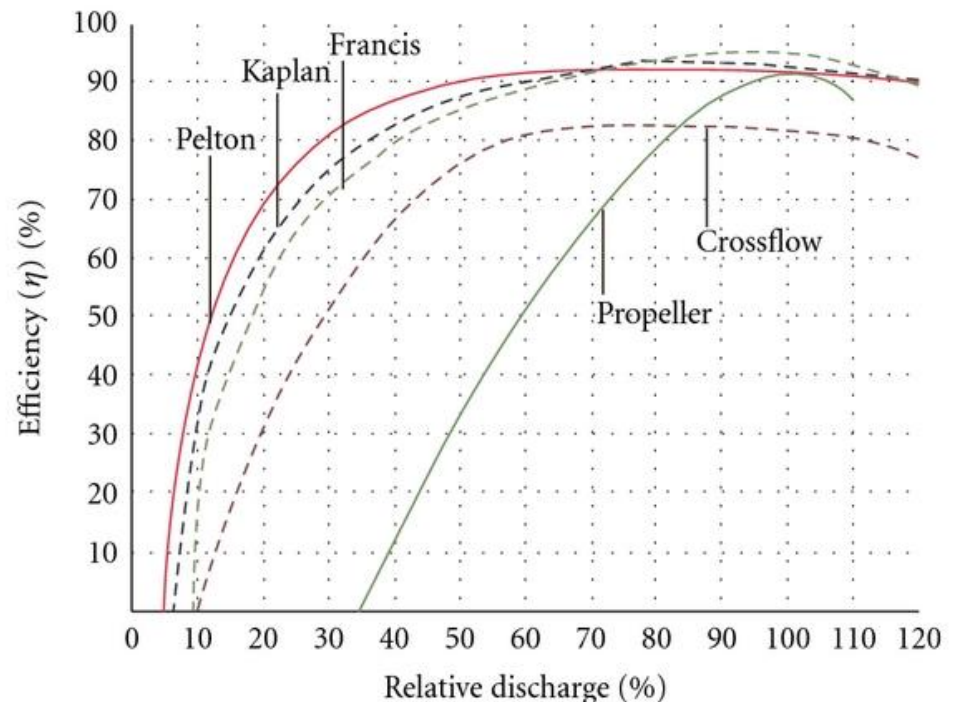


# Εύρος εφαρμογής διαφορετικών τύπων στροβίλων



# Ολικός βαθμός απόδοσης

- Ο ολικός βαθμός απόδοσης εμπεριέχει το σύνολο των ηλεκτρομηχανολογικών απωλειών κατά τους διαδοχικούς μετασχηματισμούς της υδραυλικής ενέργειας που αποδίδεται στο σύστημα υδροστρόβιλοι-γεννήτρια-μετασχηματιστής.
- Οι σημαντικότερες απώλειες λαμβάνουν χώρα στους στροβίλους, ο βαθμός απόδοσης των οποίων είναι μεταβλητός, καθώς εξαρτάται από την παροχή και το ύψος πτώσης.
- Ο **βαθμός απόδοσης ενός στροβίλου** δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά, και η εκτίμησή του γίνεται με βάση εργαστηριακές μετρήσεις. Για κάθε στρόβιλο υπάρχει ένας συνδυασμός τιμών ύψους πτώσης και παροχής που μεγιστοποιεί τον βαθμό απόδοσης.
- Επειδή η ροή είναι ελέγξιμη, τα **μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα** μπορούν να λειτουργήσουν με σταθερή παροχή και άρα κοντά στο μέγιστο του βαθμού απόδοσης, που φτάνει σε ποσοστά της τάξης του  $\eta = 90\%$ .
- Με τον τρόπο αυτό, τα μεγάλα ΥΗΕ αξιοποιούν **πολύ μεγάλο ποσοστό** της αρχικής ενέργειας (**θεωρητικό υδροδυναμικό**), *υψηλότερου από κάθε άλλη πηγή, συμβατική ή ανανεώσιμη, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική.*



# Προκαταρκτικός υδροενεργειακός σχεδιασμός ΥΗΕ

1. Εκτίμηση **αξιοποιήσιμου υδατικού δυναμικού** στη θέση του έργου, λαμβάνοντας υπόψη φυσικές απώλειες λόγω εξάτμισης, υπερχειλίσεων κτλ., και εκροές νερού για άλλες χρήσεις, π.χ. περιβαλλοντικές (μέσος ετήσιος όγκος  $V$ , σε  $\text{hm}^3$ ).
4. Εκτίμηση **καθαρού ύψους πτώσης**,  $h_n$  (σε  $\text{m}$ ), είτε αναλυτικά (υδραυλικοί υπολογισμοί) είτε χονδρικά, με μικρή απομείωση της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ της στάθμης υδροληψίας και του υψομέτρου του σταθμού παραγωγής.
5. Εκτίμηση **βαθμού απόδοσης** συστήματος (τυπικό εύρος  $\eta = 0.85-0.93$ ).
6. Εκτίμηση **μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας** (σε  $\text{GWh}$ , για  $\gamma = 9.81 \text{ KN/m}^3$ ):

$$E = \eta \gamma V h_n / 3600$$

1. Επιλογή **χρόνου λειτουργίας στροβίλων**,  $T$  (σε  $\text{h}$ ), ανάλογα με τη σκοπιμότητα του έργου στο ενεργειακό σύστημα (π.χ. έργο βάσης 4000-5000  $\text{h}$ , έργο αιχμής 1500-2000  $\text{h}$ ).
2. Εκτίμηση **παροχής σχεδιασμού** συστήματος προσαγωγής (σε  $\text{m}^3/\text{s}$ ):

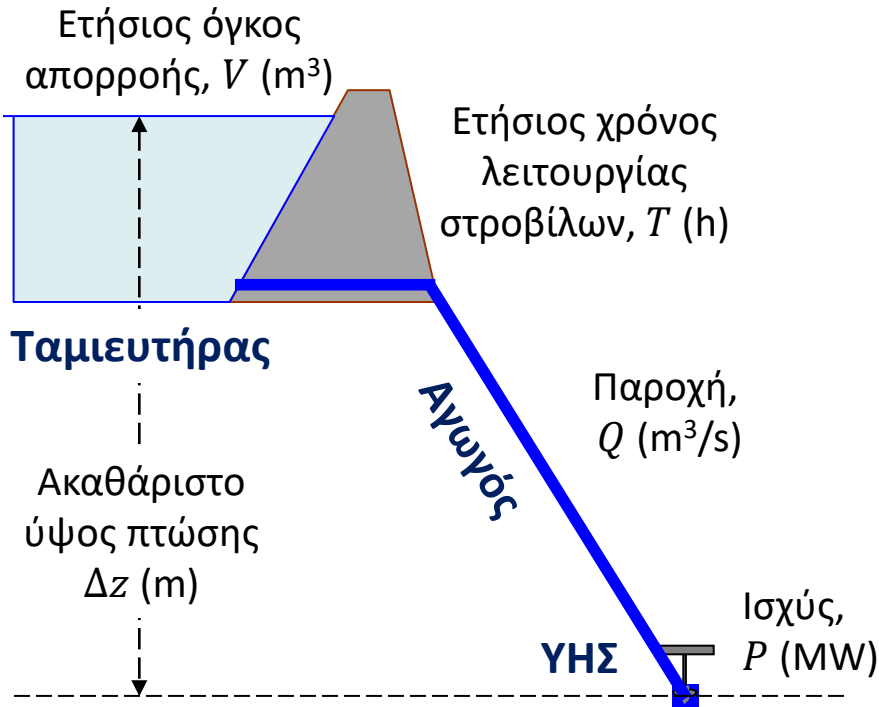
$$Q = 1000 V / (3.6 T)$$

7. Εκτίμηση **απαιτούμενης ισχύος στροβίλων** (σε  $\text{MW}$ ):

$$P = 1000 E / T$$

**Σημείωση:** Η παραπάνω διαδικασία προϋποθέτει σταθερή παροχή λειτουργίας και σταθερό βαθμό απόδοσης (κοντά στο μέγιστο). Στην πράξη, οι συνθήκες αυτές επιτυγχάνονται μόνο σε **μεγάλα Υ/Η έργα (ταμιευτήρες)**, όπου λόγω της αποθήκευσης η εκροή του νερού είναι ελεγχόμενη. Ο σχεδιασμός για **έργα χωρίς ταμίευση (ΜΥΗΕ)** ακολουθεί διαφορετική λογική.

# Παράδειγμα με βάση τα δεδομένα του Υ/Η Πλαστήρα



## Δεδομένα

Μέση ετήσια απορροή λεκάνης: **150 hm<sup>3</sup>**  
 Εύρος στάθμης ταμιευτήρα: **+776 ως +792 m**  
 Υψόμετρο σταθμού παραγωγής: **+206 m**  
 Λοιπές χρήσεις: κατάντη του ΥΗΣ

## Παραδοχές

Μέση εκροή (χωρίς υπερχειλίσσεις): **150 hm<sup>3</sup>**  
 Καθαρό ύψος πτώσης: **580 m**  
 Βαθμός απόδοσης: **0.85**  
 Μέση παραγωγή ενέργειας: **201.5 GWh**

Εκτίμηση παροχής λειτουργίας & ισχύος για διάφορα σενάρια λειτουργίας

Ετήσιες ώρες λειτουργίας στροβίλων	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας	Παροχή λειτουργίας ( $m^3/s$ )	Απαιτούμενη ισχύς στροβίλων (MW)
1500	0.17	27.8	134.3
3000	0.34	13.9	67.2
4500	0.51	9.3	44.8
8760	1.00	4.8	23.0

**Σημείωση:** Για σταθερά  $Q$  και  $\eta$ , ο συντελεστής δυναμικότητας ενός μεγάλου Υ/Η έργου ισούται με το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας του, ήτοι  $CF = T/8760$ .

# Τυποποίηση υδροηλεκτρικών έργων

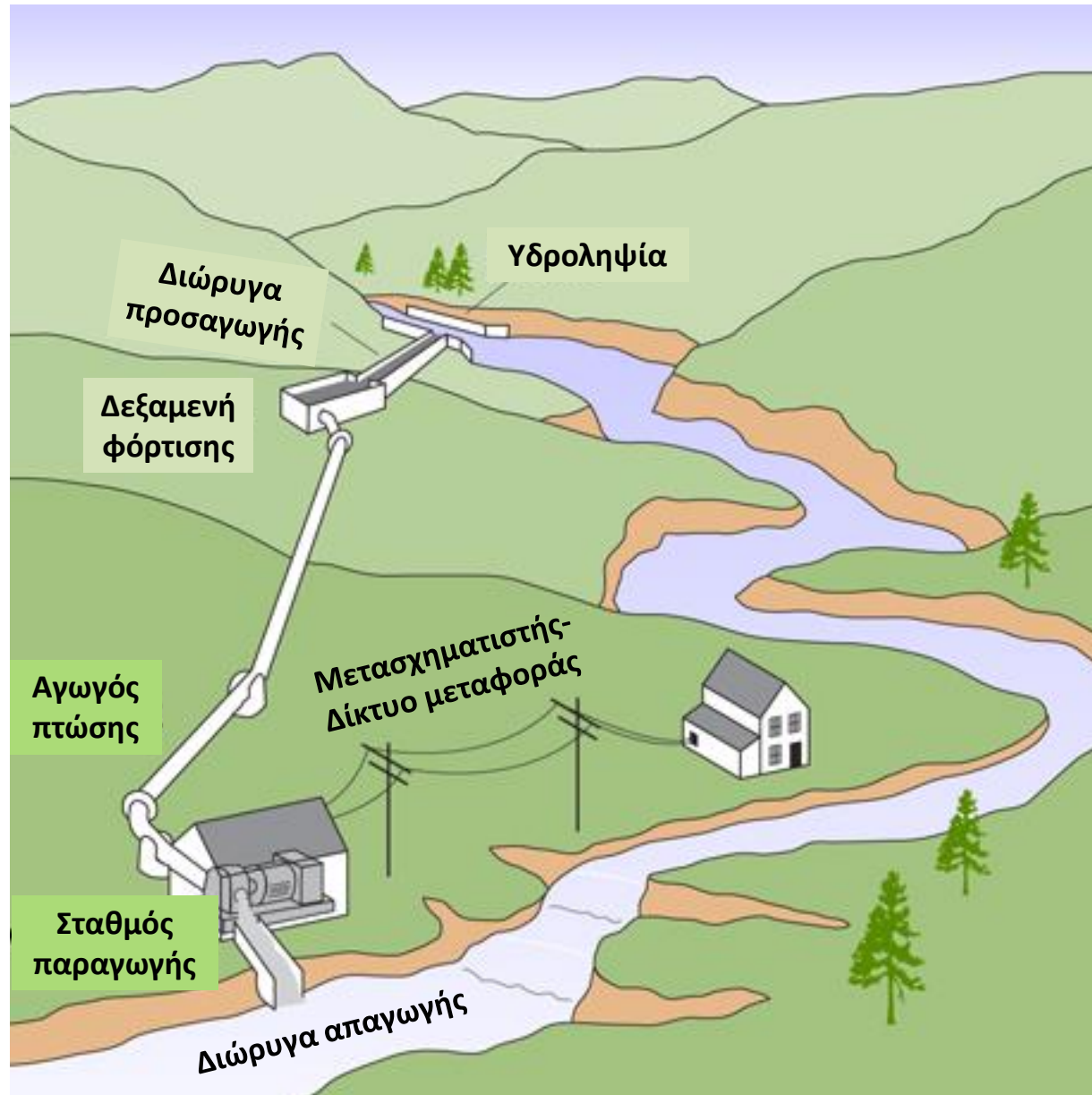
---

- Υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας, με φράγμα επί του ποταμού:
  - Συσσωρεύει το σύνολο της απορροής που παράγεται στην ανάντη λεκάνη
  - Μέσω της αποθήκευσης νερού:
    - Είναι δυνατή η αναρρύθμιση της ροής του ποταμού, η οποία είναι μια φυσική διεργασία που διέπεται από έντονη μεταβλητότητα σε όλες τις χρονικές κλίμακες (ετήσια, εποχιακή, πλημμύρες)
    - Δημιουργείται υψομετρική διαφορά, λόγω ανύψωσης της στάθμης του ταμιευτήρα (ανάντη υψόμετρο)
- Το ύψος πτώσης εξαρτάται από τη θέση του σταθμού παραγωγής (κατάντη υψόμετρο):
  - Κοντά στον πόδα του φράγματος (ύψος πτώσης  $\approx$  ύψος φράγματος)
  - Μακριά από το φράγμα, σε χαμηλότερο σημείο του ποταμού
  - Μακριά από το φράγμα, σε γειτονική λεκάνη (φράγμα εκτροπής)
- (Μικρό) υδροηλεκτρικό έργο (ΜΥΗΕ), χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης:
  - Επί του ρου ποταμού ή υδραγωγείου, για εκμετάλλευση τοπικής υψομετρικής διαφοράς ή για καταστροφή ενέργειας
  - Εκτός του ποταμού (run-off-river), με εκτροπή τμήματος της διερχόμενης παροχής σε κατάντη θέση, όπου υπάρχει ικανή υψομετρική διαφορά.
- Βυθισμένος υδροστρόβιλος εντός κοίτης (αμελητέο επιχειρησιακό ενδιαφέρον)

# Γενική διάταξη (μικρών) Υ/Η έργων χωρίς ταμίευση

- Απαγωγή τμήματος της ροής, μέσω έργου επιφανειακής υδροληψίας
- Εκτροπή νερού μέσω αγωγού και προσωρινή αποθήκευσή του σε δεξαμενή φόρτισης → διαμόρφωσης τεχνητής υψομετρικής διαφοράς
- Παραγωγή ενέργειας για συγκεκριμένο εύρος παροχών → μερική αξιοποίηση υδροδυναμικού

**Σημείωση:** Με βάση το ισχύον νομικό πλαίσιο, ως μικρό υδροηλεκτρικό έργο (ΜΥΗΕ) ορίζεται αυτό που έχει εγκατεστημένη ισχύ έως 15 MW (ανεξαρτήτως αν υπάρχει φράγμα ή όχι).



# Παράδειγμα: ΜΥΗΕ Δαφνοζωνάρας (Αχελώος)

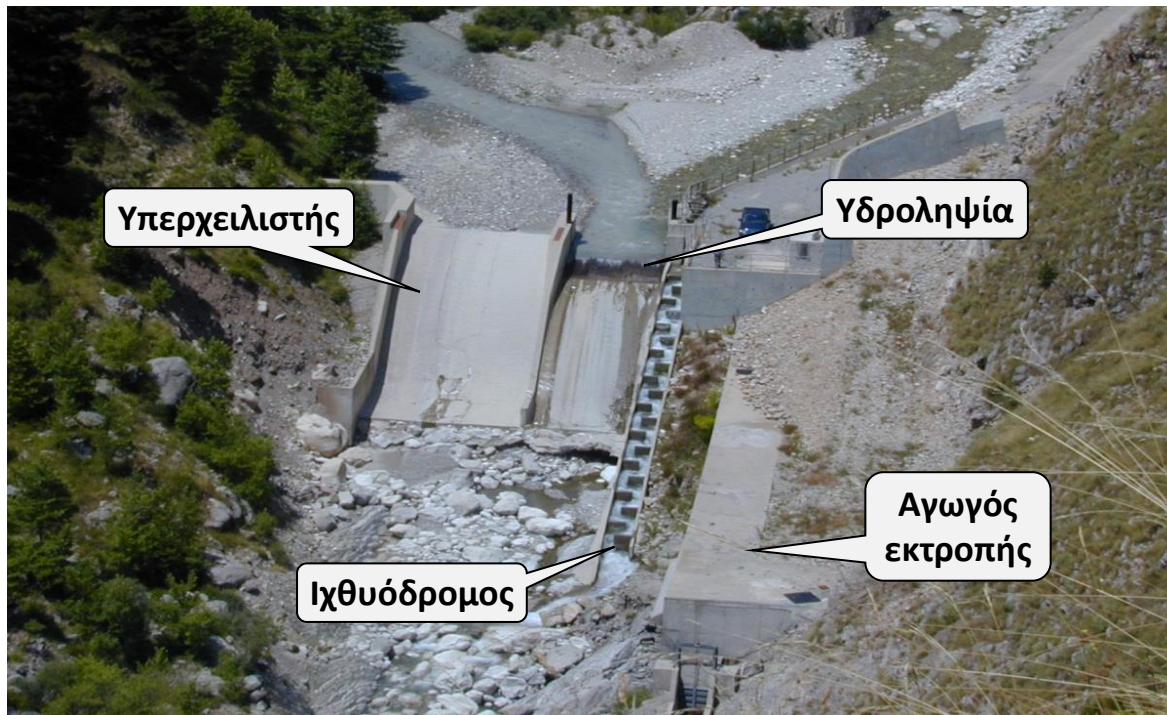
- Φράγμα ύψους 12 m
- Αύξηση ύψους πτώσης μέσω ανατρεπόμενων θυροφραγμάτων
- Ισχύς 5.93 MW (δύο στρόβιλοι Kaplan S-Type)
- Μέση ετήσια παραγωγή 40 GWh



Θυροφράγματα έκπλυσης φερτών



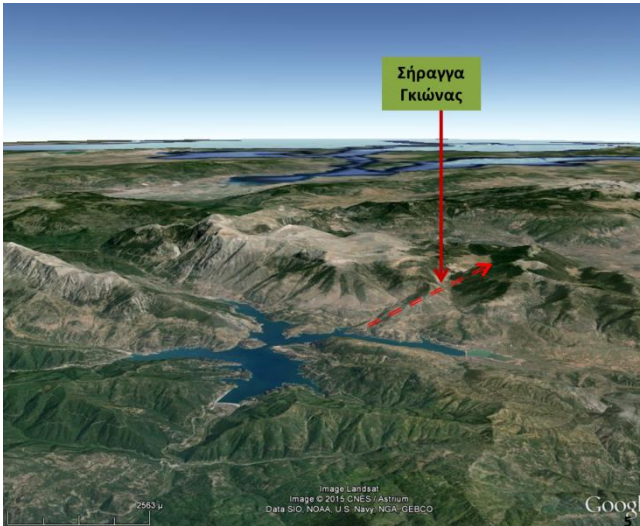
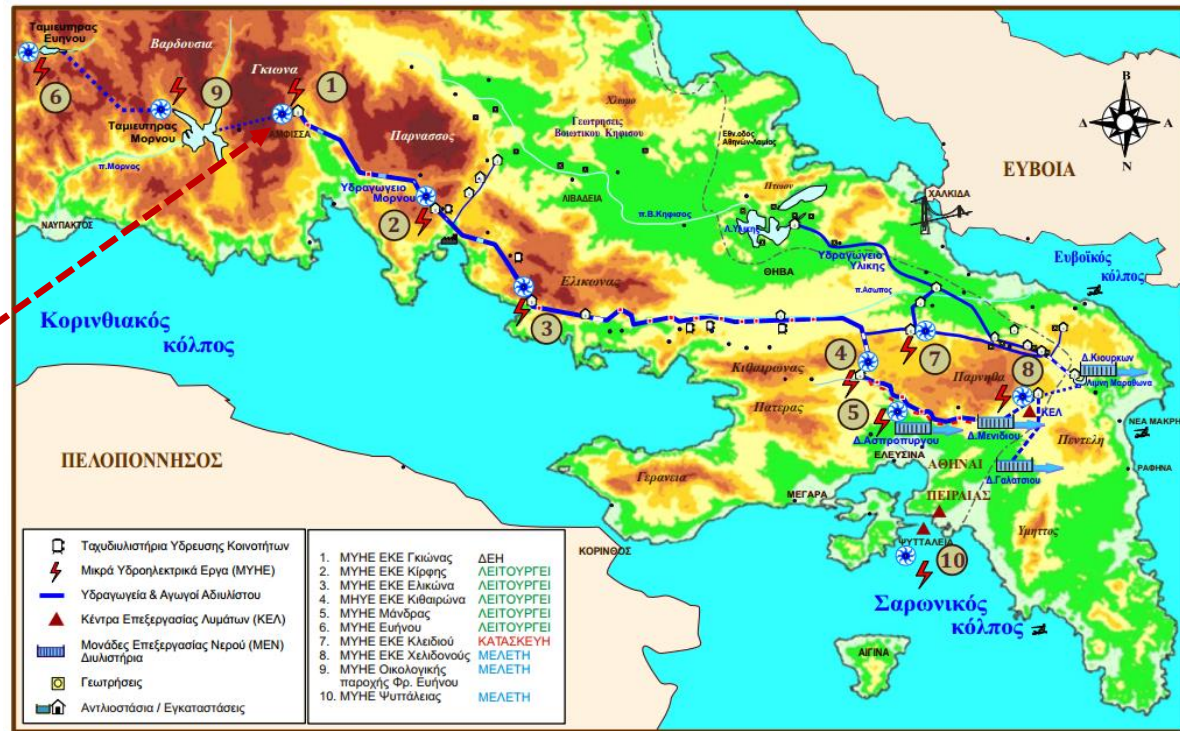
# Παράδειγμα: ΜΥΗΕ Θεοδώριανων (ρ. Γκούρας, Άραχθος)





# Παράδειγμα: ΜΥΗΕ Γκιώνας (κανάλι Μόρνου)

- Παροχή 7.8 ως 14.5 m<sup>3</sup>/s
- Ύψος πτώσης 30.0 ως 66.1 m
- Ισχύς 8.67 MW (34 GWh/έτος)



# Πλεονεκτήματα υδροηλεκτρικής ενέργεια (ειδικότερα, των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων)

---

## Ως προς τα ενεργειακά χαρακτηριστικά:

- ❑ Αποθήκευση «καυσίμου» (απορροή ποταμού)
- ❑ Ελεγχόμενες εκροές, σε αντίθεση με κάθε άλλη ΑΠΕ (περιλαμβανομένων των ΜΥΗΕ)
- ❑ Βέλτιστη επιλογή για την κάλυψη των αιχμών της ζήτησης
- ❑ Ταχύτατη παραλαβή και απόρριψη φορτίου
- ❑ Παραγωγή ενέργειας χωρίς διακυμάνσεις
- ❑ Πολύ υψηλός βαθμός απόδοσης
- ❑ Μεγάλη αξιοπιστία υδροστροβίλων
- ❑ Μεγάλη διάρκεια ζωής (συμβατικός ωφέλιμος χρόνος ζωής 100 έτη)
- ❑ Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης

## Λοιπά πλεονεκτήματα:

- ❑ Αντιπλημμυρική προστασία (ολική ή μερική ανάσχεση πλημμυρικών παροχών)
- ❑ Χρήση νερού και για άλλες ανάγκες (άρδευση, ύδρευση, περιβαλλοντική)
- ❑ Διαμόρφωση νέου φυσικού περιβάλλοντος (δημιουργία λίμνης και υδροβιότοπου)
- ❑ Μηδενική υποβάθμιση της ποιότητας του νερού & μηδενικές εκπομπές ρύπων
- ❑ Έργα υποδομής που συμβάλλουν στην ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής

# Το πλέγμα νερού-ενέργειας (water-energy nexus)

---

- Το νερό ως **παραγωγός ενέργειας**:
  - Άμεσος παραγωγός: υδροηλεκτρική ενέργεια
  - Έμμεσος παραγωγός: βιομάζα-βιοκαύσιμα (άρδευση), θερμοηλεκτρική ενέργεια (ψύξη ΑΗΣ), βιοαέριο (λύματα)
  - Συνέργειες με άλλες ΑΠΕ (π.χ. Φ/Β σε κανάλια & ταμιευτήρες, ΜΥΗΕ σε δίκτυα)
- Το νερό ως **καταναλωτής ενέργειας**:
  - Άντληση υπόγειου νερού μέσω γεωτρήσεων
  - Μεταφορά νερού μέσω αντλιοστασίων και καταθλιπτικών αγωγών
  - Επεξεργασία νερού (λύματα, αφαλάτωση)
- Το νερό ως **ρυθμιστής ενέργειας**:
  - Αποθήκευση υδροδυναμικής ενέργειας σε ταμιευτήρες
  - Κάλυψη ενεργειακών αιχμών μέσω μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων
  - Αξιοποίηση πλεονασμάτων ενέργειας για άντληση και επεξεργασία του νερού
  - Αποθήκευση ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης
    - Περίσσεια νυχτερινής ενέργειας που παράγεται από σταθμούς βάσης
    - Περίσσεια μη ελεγχόμενης ενέργειας που παράγεται από άλλες ανανεώσιμες πηγές (υβριδικά συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας)

# Κατανάλωση ενέργειας μέσω άντλησης

- Για να ανυψωθεί μια ποσότητα νερού  $V$  κατά μια υψομετρική διαφορά  $\Delta z$ , με χρήση αντλιών, απαιτείται κατανάλωση ενέργειας:

$$E = \gamma V h_m / \eta$$

όπου  $h_m$  το λεγόμενο **μανομετρικό ύψος** και  $\eta$  ο **βαθμός απόδοσης** των αντλιών.

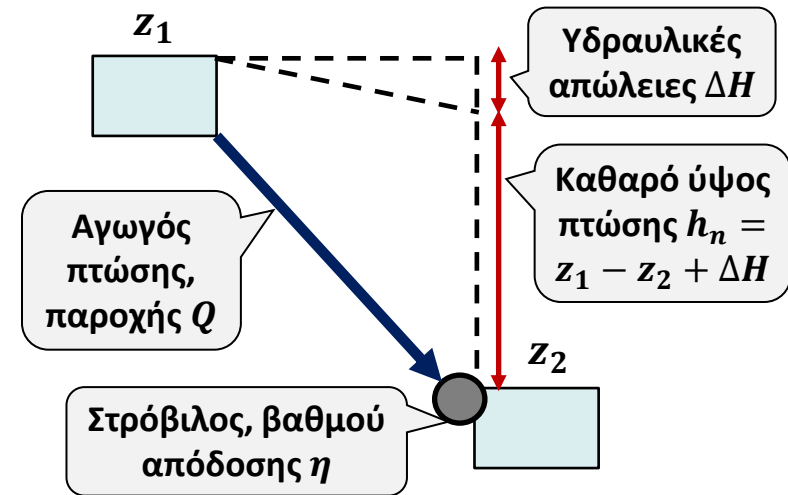
- Το μανομετρικό ύψος εκφράζει την **υδραυλική ενέργεια** που απαιτείται προκειμένου να καλυφθεί η υψομετρική διαφορά,  $\Delta z$ , και οι υδραυλικές απώλειες,  $\Delta H$ , κατά τη μεταφορά του νερού (απώλειες ενέργειας στον λεγόμενο **καταθλιπτικό αγωγό**):

$$h_m = \Delta z + \Delta H$$

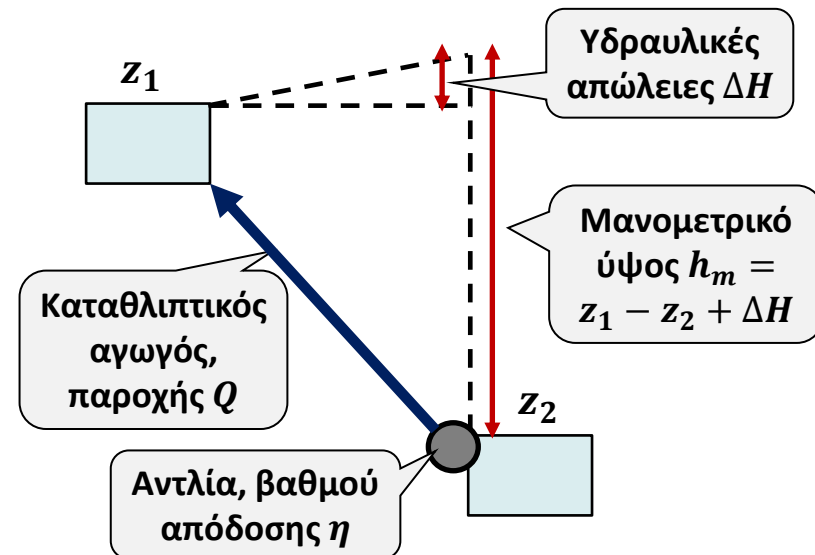
- Ο βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος της **υδραυλικής ενέργειας** που παρέχει η αντλία προς την ηλεκτρική ενέργεια που της παρέχεται.
- Η απαιτούμενη ισχύς μιας αντλίας ισούται με:

$$P = \gamma Q h_m / \eta$$

όπου  $Q$  η διερχόμενη παροχή.



Παραγόμενη ισχύς:  $P = \eta \gamma Q (\Delta z - \Delta H)$

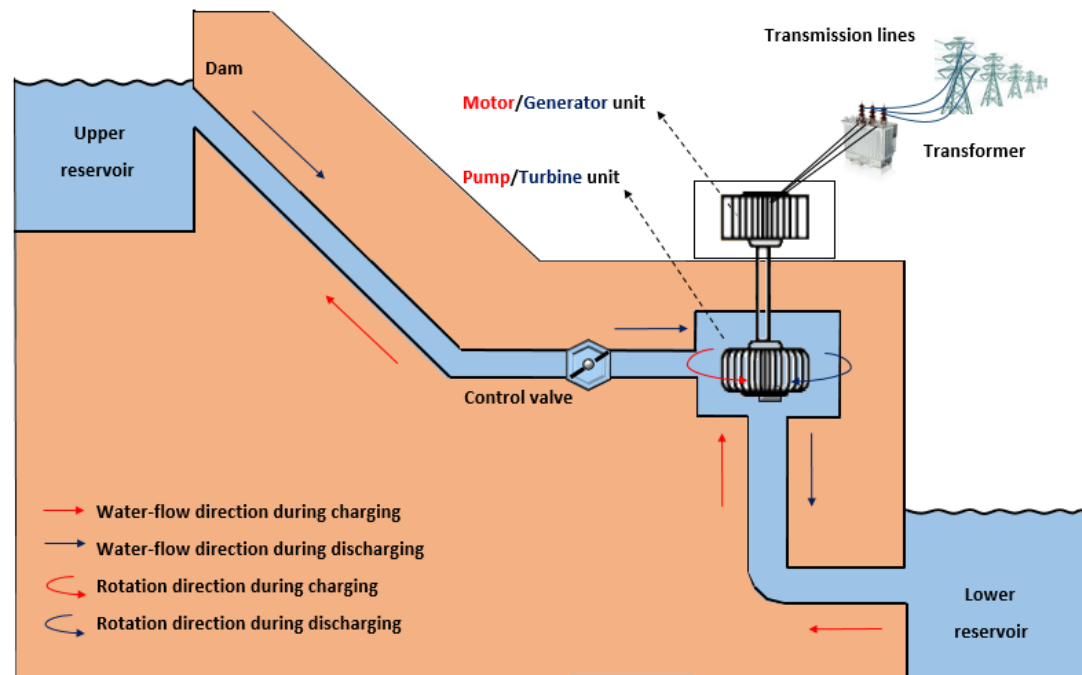


Καταναλισκόμενη ισχύς:  $P = \gamma Q (\Delta z + \Delta H) / \eta$

# Αποθήκευση ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης

- Συνιστώσες συστήματος αντλησιοταμίευσης (pumped hydropower storage):
  - Διασυνδεδεμένα έργα αποθήκευσης νερού, σε διαφορετικά υψόμετρα
  - Ενιαίος αγωγός στον οποίο τοποθετείται ειδικός τύπος στροβίλου, που επιτρέπει αντιστρεπτή ροή του νερού (αντλιοστρόβιλος) ή δύο παράλληλοι αγωγοί, ο ένας εξοπλισμένος με συμβατικό υδροστρόβιλο και ο άλλος με αντλία.
- Λειτουργία συστήματος:
  - Παραγωγή ενέργειας τις ώρες αιχμής της ζήτησης
  - Άντληση νερού για αποθήκευση ενέργειας, τις ώρες χαμηλής ζήτησης

- Παραδοσιακή θεώρηση → εκμετάλλευση της περίσσειας νυχτερινής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς βάσης (εξ ου και η χαμηλή τιμή του νυχτερινού ρεύματος)
- Σύγχρονη θεώρηση → εξομάλυνση ελλειμμάτων και πλεονασμάτων ενέργειας που δημιουργούνται λόγω της μη ελεγχόμενης παραγωγής από ΑΠΕ (υβριδικά συστήματα)

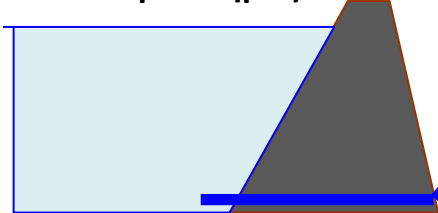


# Αριθμητική εφαρμογή

## Δεδομένα & παραδοχές

- Δύο ταμιευτήρες με διάταξη αντλησιοταμίευσης, σε υψομετρική διαφορά 200 m
- Μεταφορά όγκου νερού  $1000 \text{ m}^3$  από τον άνω στον κάτω ταμιευτήρα και αντίστροφα
- Καθαρό ύψος πτώσης 195 m (5 m απώλειες ενέργειας στον αγωγό για μεταφορά  $1000 \text{ m}^3$ )
- Μανομετρικό ύψος 205 m (μεταφέρεται η ίδια ποσότητα νερού στον ίδιο αγωγό, ανάστροφα)
- Βαθμός απόδοσης 0.85 (κατά προσέγγιση κοινός για την άντληση και την παραγωγή)

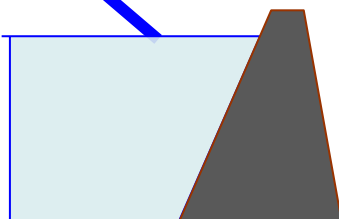
Άνω ταμιευτήρας



**Έλλειψη ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο** →  
Μεταφέρονται  **$1000 \text{ m}^3$**  από τον άνω ταμιευτήρα στον κάτω, παράγοντας **450 kWh**

**Περίσσεια ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο** →  
Αντλούνται  **$1000 \text{ m}^3$**  από τον κάτω ταμιευτήρα στον άνω, καταναλώνοντας **660 kWh**

Κάτω ταμιευτήρας



## Παρατηρήσεις

Η αντλησιοταμίευση είναι η μοναδική τεχνική αποθήκευσης ενέργειας στη **μεγάλη κλίμακα**.

Οι **συνολικές απώλειες** στον κύκλο είναι  $\sim 30\%$  (πολύ μικρότερες από άλλα μέσα αποθήκευσης, π.χ. μπαταρίες, που έχουν απώλειες και λόγω αυτοεκφόρτισης).

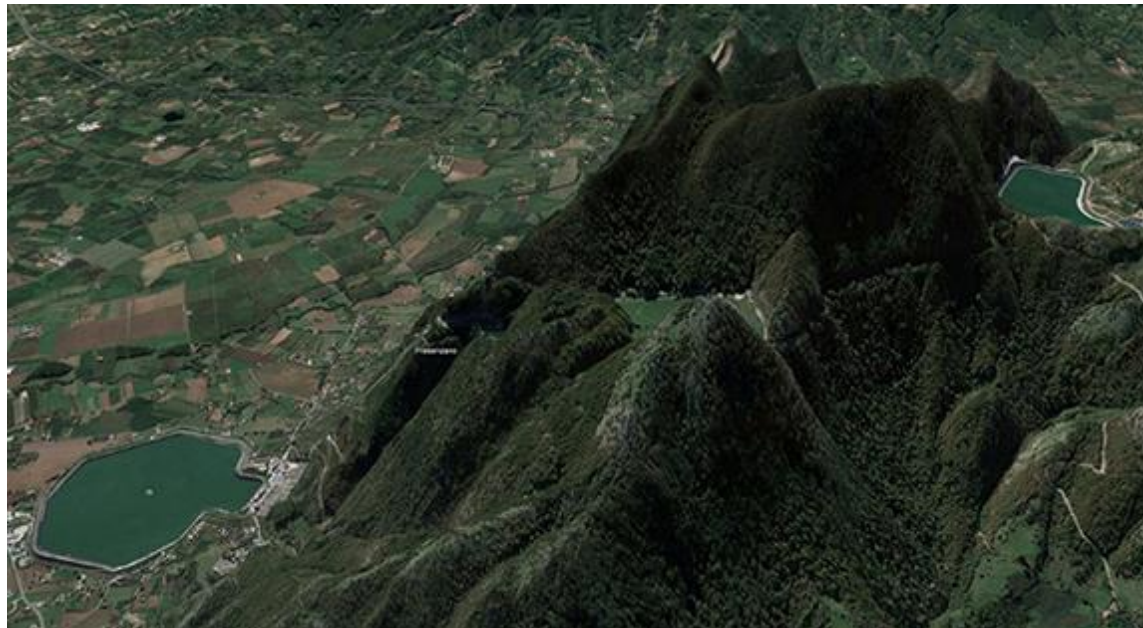
Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή της ενέργειας είναι πολύ χαμηλότερη τις περιόδους που υπάρχει περίσσεια παραγωγής, προκύπτει και σημαντικό **οικονομικό όφελος**.

# Γενικές διατάξεις έργων αντλησιοταμίευσης

- **Ανοιχτού κύκλου:** συνδυασμός λιμνοδεξαμενής ή ταμιευτήρα (ψηλά) και ταμιευτήρα ή υδροληψίας επί ποταμού (χαμηλά)
- **Κλειστού κύκλου:** λιμνοδεξαμενές πρακτικά ίσης χωρητικότητας, που ανακυκλώνουν νερό μεταξύ τους
- Για οποιαδήποτε διάταξη: **ουδέτερο υδατικό ισοζύγιο**



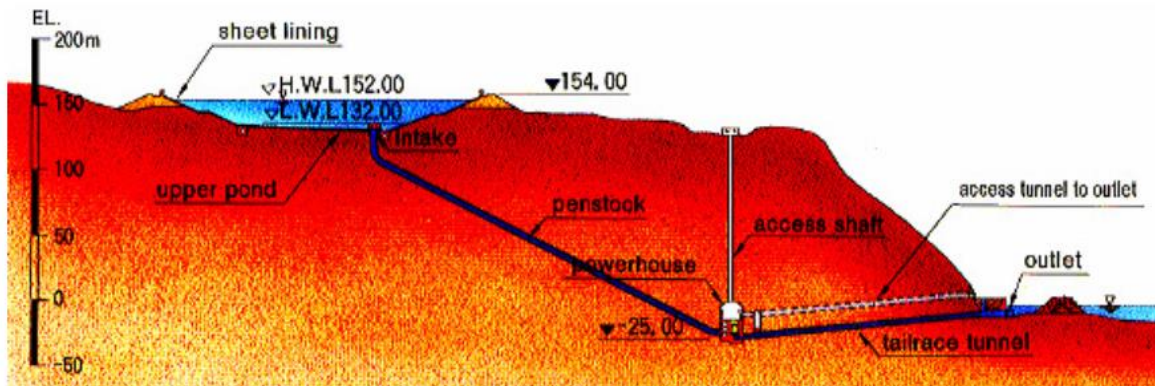
**Tumut 3:** Πρώτο έργο αποθήκευσης ενέργειας στην Αυστραλία (1973), εγκατεστημένη ισχύς 1650 MW, υψομετρική διαφορά 150.9 m



**Presenzano, Ιταλία:** Λιμνοδεξαμενές ίσης χωρητικότητας 6.0 hm<sup>3</sup>, εγκατεστημένη ισχύς 1000 MW, υψομετρική διαφορά 495 m (έναρξη λειτουργίας: 1991)

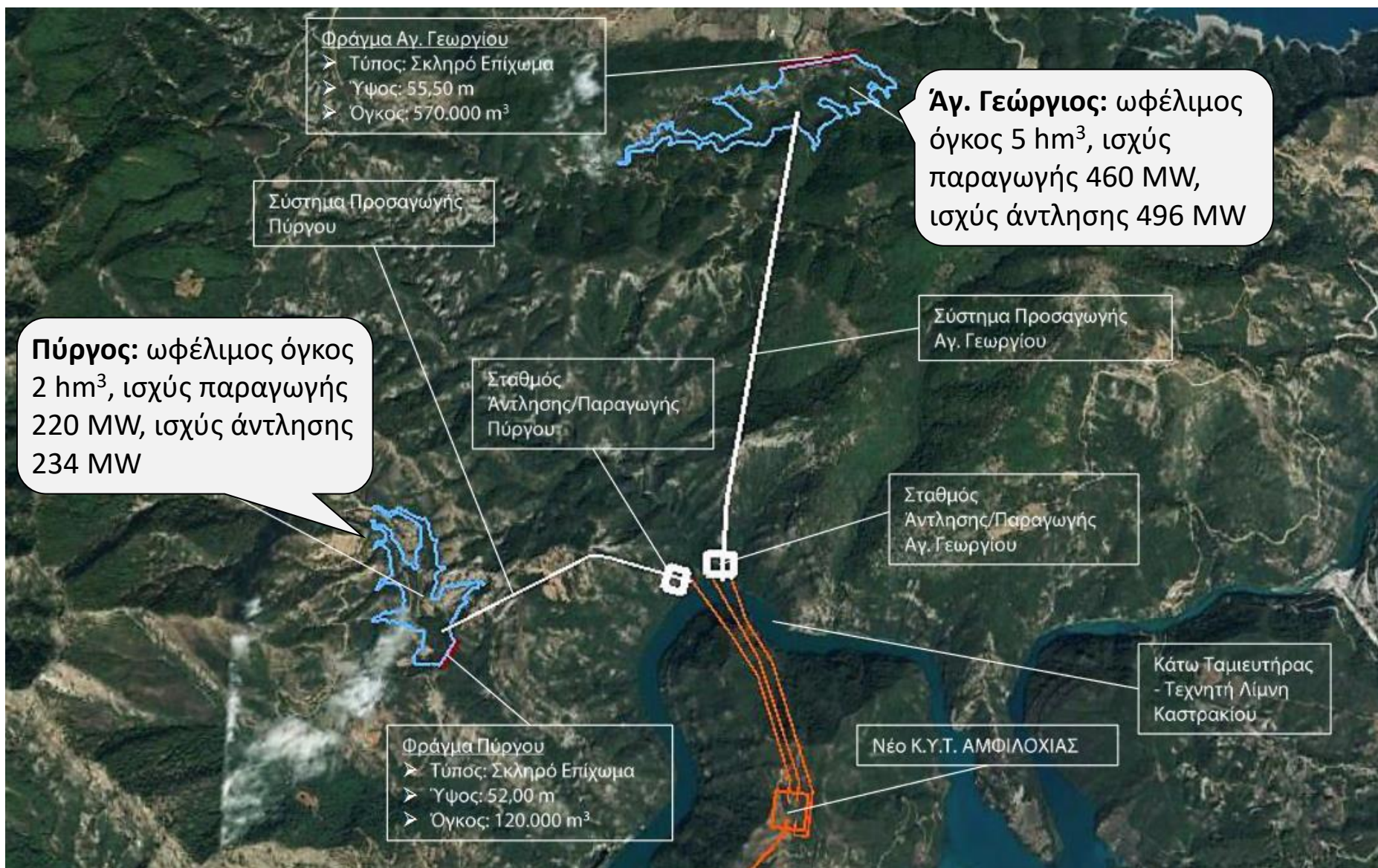
# Αντλησιοταμίευση με χρήση θαλασσινού νερού

- ❑ Χρήση της θάλασσας ως κάτω ταμιευτήρας και διαμόρφωση λιμνοδεξαμενής σε κοντινή απόσταση και μεγάλη υψομετρική διαφορά (πρόσφορη λύση για νησιά)
- ❑ **Okinawa (Ιαπωνία):** Το πρώτο τέτοιο έργο στον κόσμο (έναρξη λειτουργίας 1999, ισχύς 30 MW, ύψος πτώσης 140 m, παροχή 26 m<sup>3</sup>/s)
- ❑ Κατά τη λειτουργία του δημιουργήθηκαν σοβαρά προβλήματα λόγω: (α) διήθησης θαλασσινού νερού από τη δεξαμενή στο έδαφος, (β) προσκόλλησης θαλάσσιων οργανισμών στο εσωτερικό των αγωγών, και (γ) διάβρωσης των στροβίλων και των λοιπών μεταλλικών στοιχείων

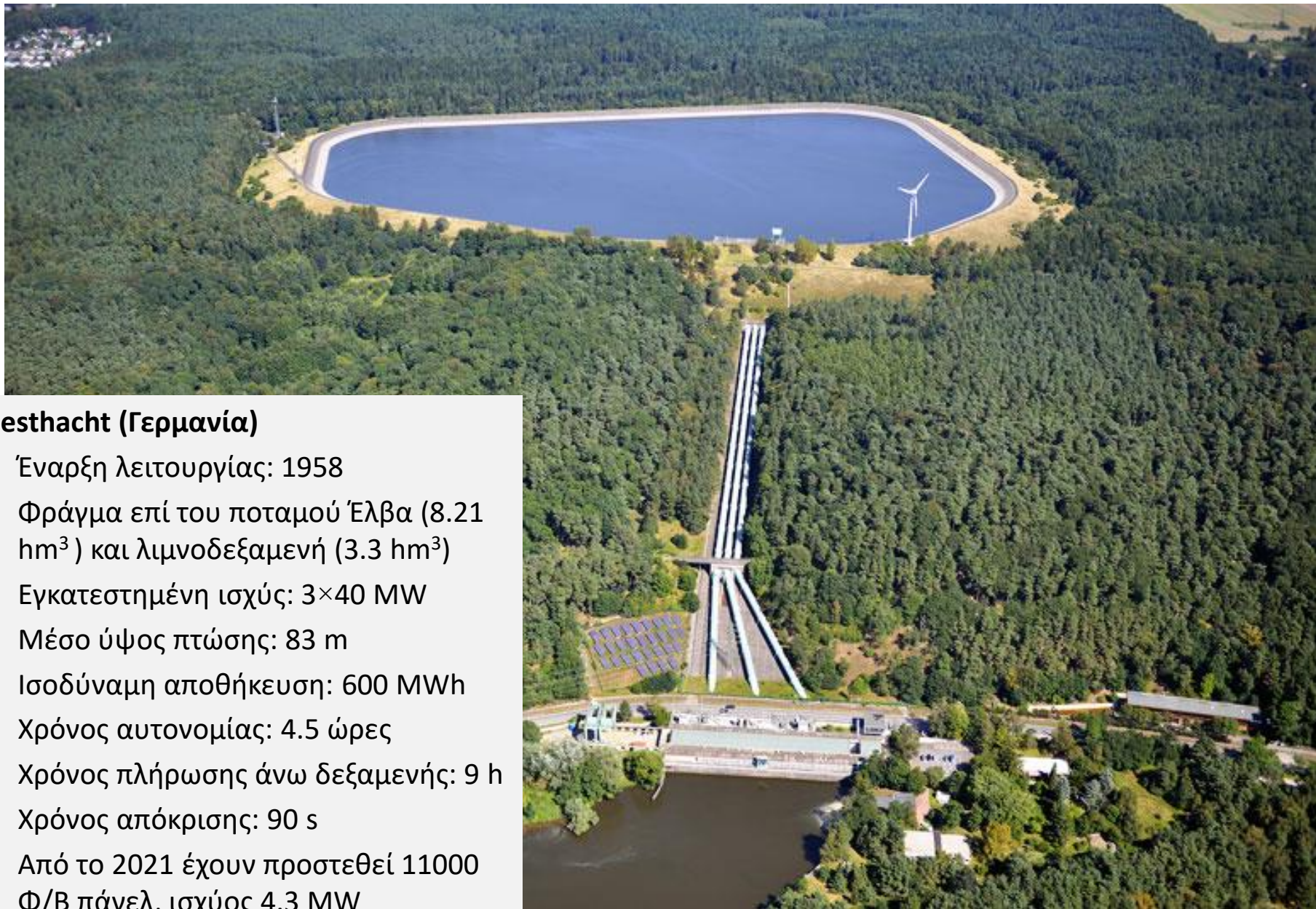




# Σύστημα αντλιοσταμείωσης Αμφιλοχίας με δύο ανεξάρτητες λιμνοδεξαμενές (Αγ. Γεώργιος, Πύργος)



# Συνδυασμός έργων αντλησιοταμίευσης με άλλες ΑΠΕ



## Geesthacht (Γερμανία)

- Έναρξη λειτουργίας: 1958
- Φράγμα επί του ποταμού Έλβα (8.21 hm<sup>3</sup>) και λιμνοδεξαμενή (3.3 hm<sup>3</sup>)
- Εγκατεστημένη ισχύς: 3×40 MW
- Μέσο ύψος πτώσης: 83 m
- Ισοδύναμη αποθήκευση: 600 MWh
- Χρόνος αυτονομίας: 4.5 ώρες
- Χρόνος πλήρωσης άνω δεξαμενής: 9 h
- Χρόνος απόκρισης: 90 s
- Από το 2021 έχουν προστεθεί 11000 Φ/Β πάνελ, ισχύος 4.3 MW

# Υβριδικό ενεργειακό έργο Ικαρίας

Το καλοκαίρι, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει την ημέρα. Η απαιτούμενη ισχύς είναι 4 MW το χειμώνα και 10 MW το καλοκαίρι.

Το καλοκαίρι το νερό του ταμιευτήρα Πέζι διατίθεται κυρίως για ύδρευση και άρδευση

Παραγωγή ενέργειας στον ΥΗΣ Άνω Προεσπέρας από τις υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα

Άντληση νερού τη νύκτα στην άνω δεξαμενή με χρήση της περίσσειας αιολικής ενέργειας

Διοχέτευση αιολικής ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτροδότησης και στο αντλιοστάσιο, για τη μεταφορά νερού στην άνω δεξαμενή

Παραγωγή πρόσθετης ενέργειας στον ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας

Το έργο έχει κοστίσει **23 Μ€** και αναμένεται να έχει ετήσια καθαρή απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας **11 GWh**

