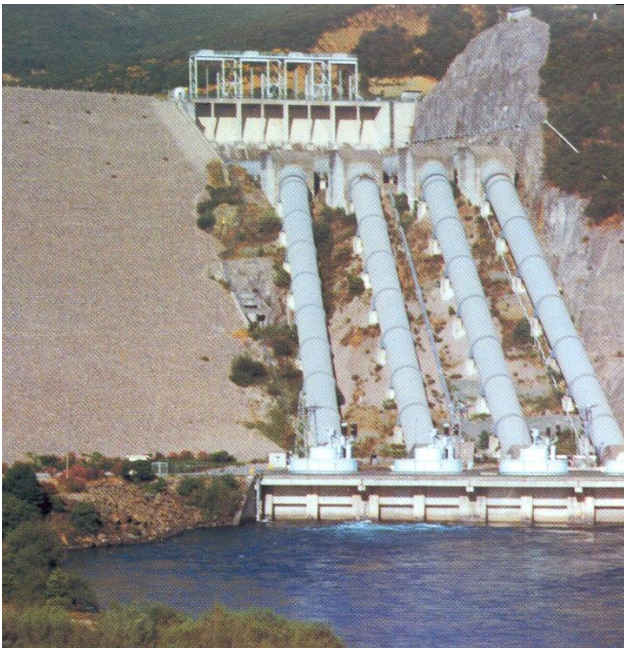


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1^ο και 5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Υδραυλική ενέργεια



Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης

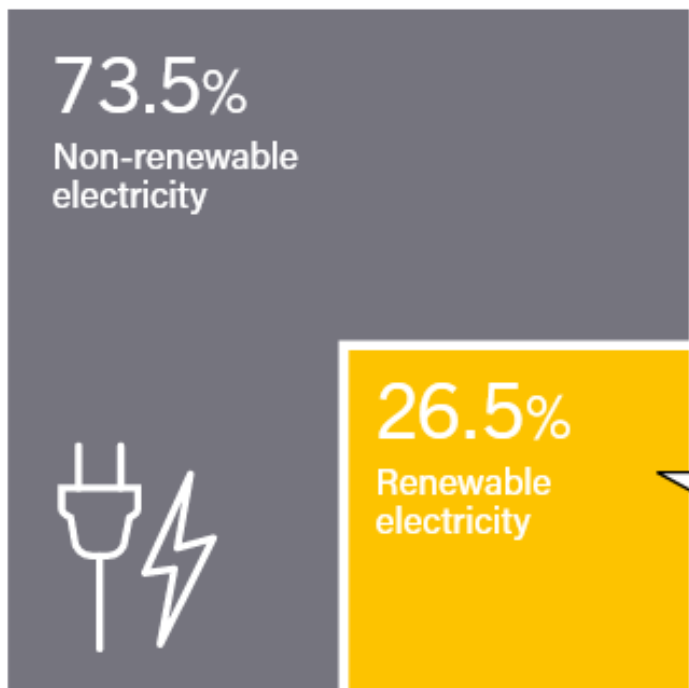
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2018-19

Νερό και ενέργεια

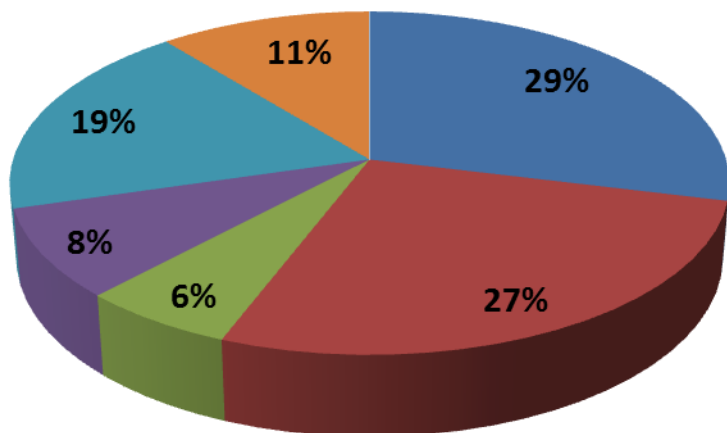
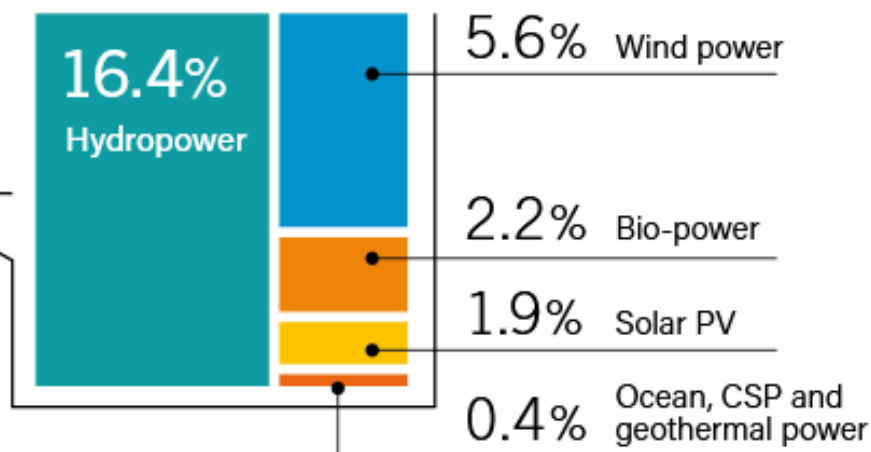
- Το νερό ως **παραγωγός ενέργειας**:
 - Άμεσος παραγωγός: υδροηλεκτρική ενέργεια
 - Έμμεσος παραγωγός:
 - Βιοκαύσιμα (άρδευση)
 - Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί (ψύξη)
- Το νερό ως **καταναλωτής ενέργειας**:
 - Άντληση υπόγειου νερού
 - Μεταφορά νερού μέσω καταθλιπτικών αγωγών
 - Επεξεργασία νερού (αφαλάτωση)
- Το νερό ως **ρυθμιστής ενέργειας**:
 - Αποθήκευση υδροδυναμικής ενέργειας σε ταμιευτήρες
 - Κάλυψη ενεργειακών αιχμών μέσω μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων
 - Αντλησιοταμίευση
 - Περίσσεια νυχτερινής ενέργειας που παράγεται από σταθμούς βάσης
 - Περίσσεια μη ελεγχόμενης ενέργειας που παράγεται από άλλες ανανεώσιμες πηγές (υβριδικά συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας)

Η Υ/Η ενέργεια στο ενεργειακό μίγμα



Κατανομή παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας (2017)

(Πηγή: *Renewables 2018 Global Status Report*, Paris, REN21 Secretariat)



Κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (2017)

- Λιγνιτικοί σταθμοί (16 TWh)
 - Σταθμοί φυσικού αερίου (15 TWh)
 - Υδροηλεκτρικοί σταθμοί (4 TWh)
 - Πετρελαϊκοί σταθμοί σε ΜΔ νησιά (5 TWh)
 - Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (11 TWh)
 - Εισαγωγές (6 TWh)
- 56.9 TWh

Ιστορική αναδρομή (1)

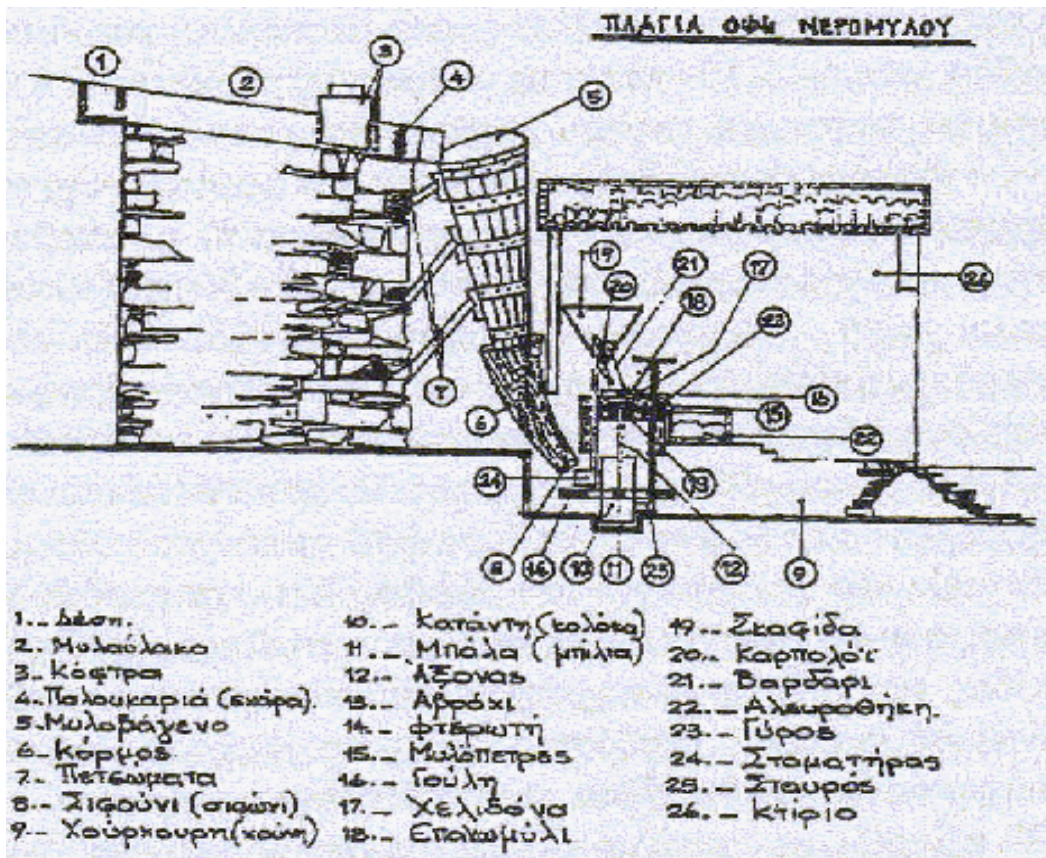
- Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας πραγματοποιούνταν από την αρχαιότητα μέσω των **υδρόμυλων/υδροτροχών**, για το άλεσμα των δημητριακών και την κοπή ξυλείας (υδροπρίονα) → μετατροπή σε **μηχανική ενέργεια**.
- Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας για **παραγωγή ηλεκτρισμού** έγινε στα τέλη του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



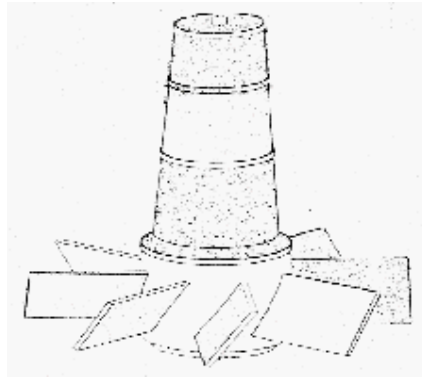
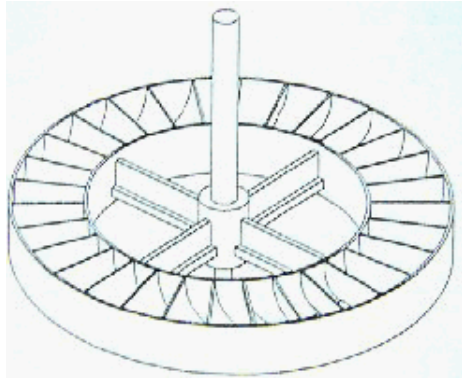
Υδρόμυλοι στην πόλη Hama της Συρίας (διασώζονται 17 από τους 30)
(Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Norias_of_Hama)



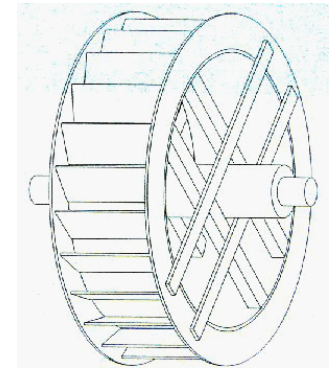
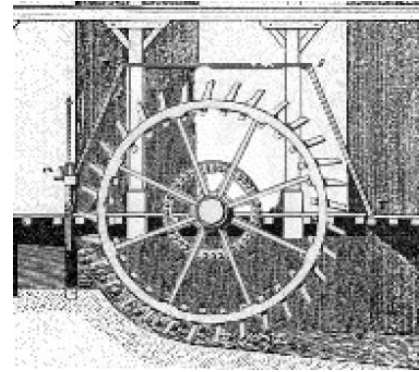
Ιστορική αναδρομή (2)



Ιστορική αναδρομή (3)



**Κατακόρυφος
υδροτροχός**



**Οριζόντιος
υδροτροχός**



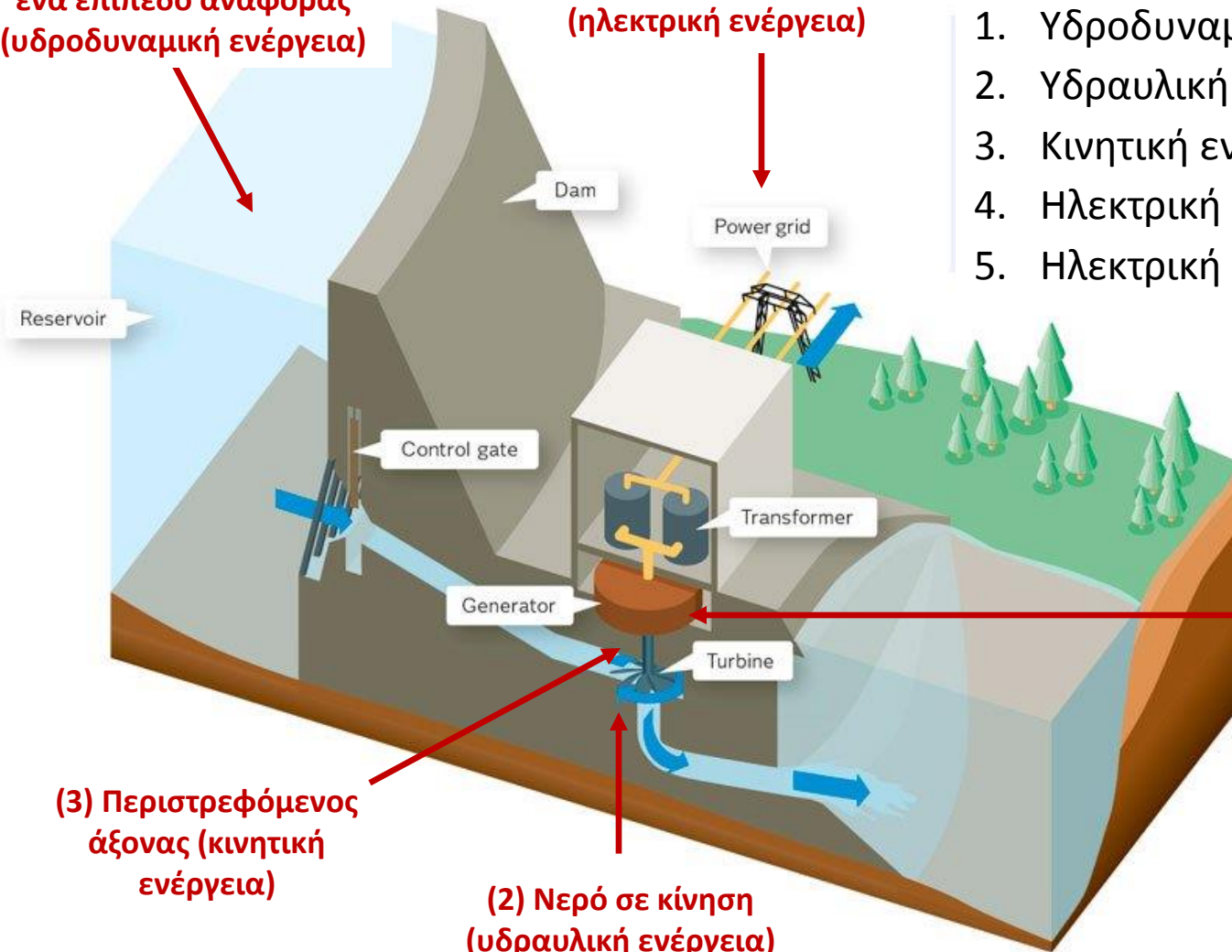
Γενική διάταξη & συνιστώσες συστήματος παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας

(1) Αποθηκευμένο νερό σε υψομετρική διαφορά από ένα επίπεδο αναφοράς (υδροδυναμική ενέργεια)

(5) Ρεύμα που αποδίδεται στο δίκτυο υψηλής τάσης (ηλεκτρική ενέργεια)

Υ/Η ενέργεια = σύστημα διαδοχικών ενεργειακών μετασχηματισμών:

1. Υδροδυναμική ενέργεια
2. Υδραυλική ενέργεια
3. Κινητική ενέργεια περιστροφής
4. Ηλεκτρική ενέργεια (χαμηλή τάση)
5. Ηλεκτρική ενέργεια (υψηλή τάση)

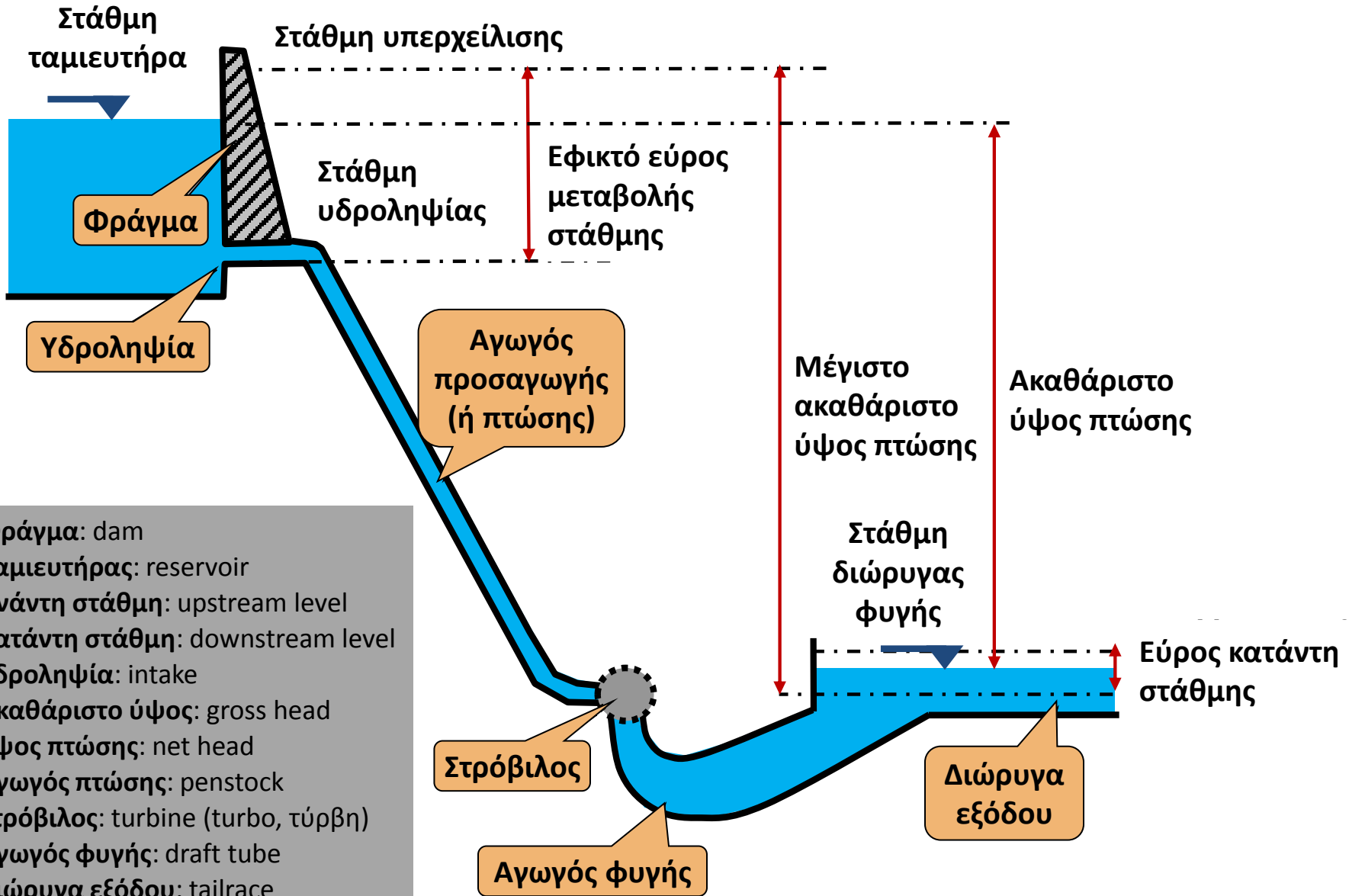


(4) Περιστρεφόμενο πηνίο σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (ηλεκτρική ενέργεια χαμηλής τάσης)

(3) Περιστρεφόμενος άξονας (κινητική ενέργεια)

(2) Νερό σε κίνηση (υδραυλική ενέργεια)

Βασικά υδροενεργειακά μεγέθη



Φράγμα: dam
Ταμιευτήρας: reservoir
Ανάντη 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

Υδροηλεκτρική ενέργεια (1)

- **Δυναμική ενέργεια νερού** μάζας m (kg) σε ύψος H (m) από το επίπεδο αναφοράς των στροβίλων (υδροδυναμική ενέργεια ή **υδροδυναμικό**, σε kJ):

$$E_{\Delta} = m g H = \rho g V H = \gamma V H \quad (1)$$

όπου ρ η πυκνότητα του νερού (1000 kg/m^3), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2), γ το ειδικό βάρος του νερού (9.81 kN/m^3) και V ο όγκος (m^3). Στα υδροενεργειακά έργα, η υψομετρική διαφορά H αναφέρεται και ως **ολικό** ή **ακαθάριστο ύψος πτώσης**.

- Μετατροπή δυναμικής ενέργειας σε **υδραυλική**:

$$E_{\gamma} = E_{\Delta} - \Delta E_{\gamma} = \gamma V \Delta H \quad (2)$$

όπου ΔH οι **υδραυλικές απώλειες** κατά τη **προσαγωγή** του νερού στους στροβίλους.

- Θέτοντας $\Delta H = H - H_n$, η σχέση (2) γράφεται:

$$E_{\gamma} = \gamma V H_n \quad (3)$$

όπου H_n το λεγόμενο **καθαρό ύψος πτώσης**.

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

$$E = \eta E_{\gamma} = \eta \gamma V H_n \quad (4)$$

όπου η ο **βαθμός απόδοσης των στροβίλων**. Η ποσότητα:

$$\Delta E_{\Sigma} = (1 - \eta) E_{\gamma} \quad (5)$$

εκφράζει το σύνολο των απωλειών (μάζας, υδραυλικές, μηχανικές) κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας (είσοδος στροβίλου) σε ηλεκτρική στο δίκτυο (έξοδος).

Υδροηλεκτρική ενέργεια (2)

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

$$Q = dV / dt \quad (6)$$

- Η παροχή που διέρχεται από τον αγωγό πτώσης (και τους στροβίλους) αποτελεί χαρακτηριστικό **μέγεθος σχεδιασμού** του Υ/Η έργου.
- Κατά τη λειτουργία του έργου, η παροχή των στροβίλων ρυθμίζεται μέσω πτερυγίων.

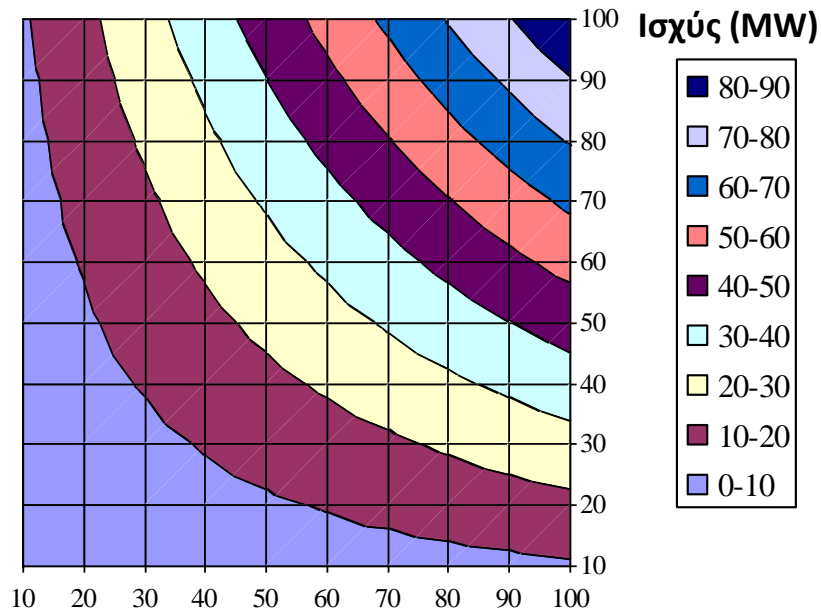
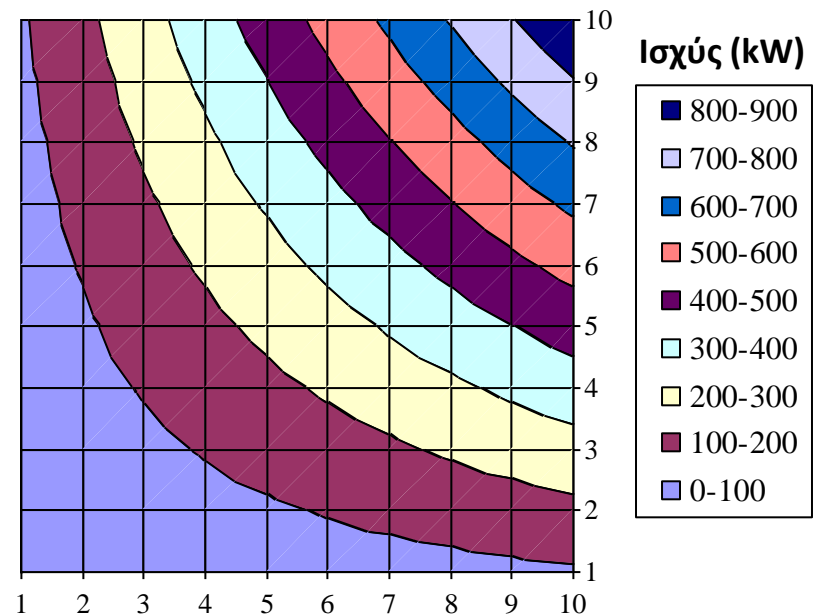
- Ο ρυθμός μεταβολής της παραγόμενης ενέργειας καλείται **ισχύς**:

$$P = dE / dt \quad (7)$$

- Από τις (4), (6) και (7) προκύπτει ότι η ισχύς που παράγεται από τους στροβίλους (σε kW) συνδέεται με την παροχή (σε m³/s) και το καθαρό ύψος πτώσης (σε m) μέσω της σχέσης:

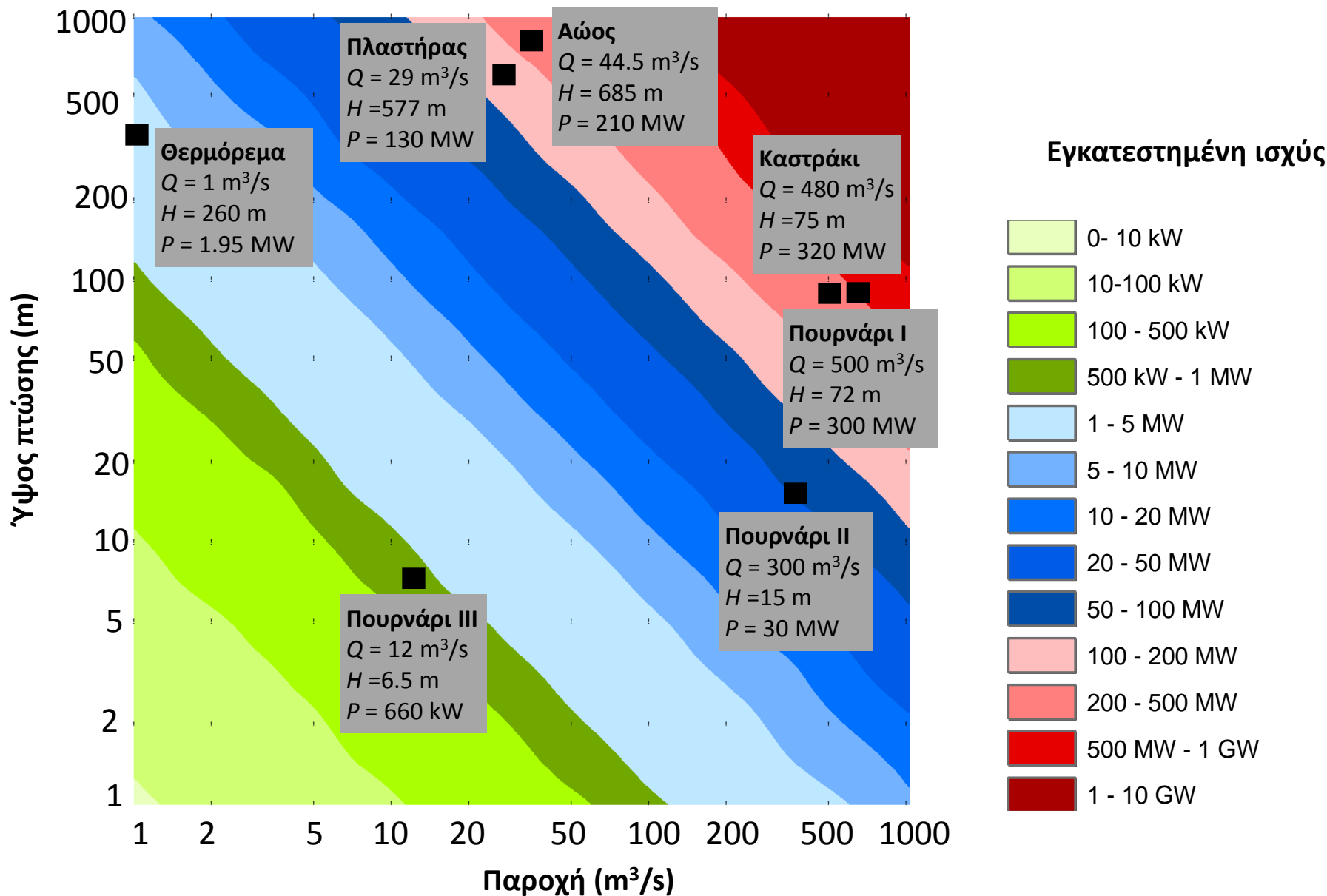
$$P = \eta \gamma Q H_n \quad (8)$$

- Ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός του τύπου, πλήθους και της συνολικά απαιτούμενης ισχύος των στροβίλων (**εγκατεστημένη ισχύς**).



Σχέσεις παροχής (m³/s) – ύψους πτώσης (m) για υποθετικό βαθμό απόδοσης $\eta = 0.90$

Παραδείγματα εγκατεστημένης ισχύος – ύψους πτώσης – παροχής σε υφιστάμενα έργα στην Ελλάδα



Απώλειες ενέργειας

- Οι υδραυλικές απώλειες $\Delta H = H - H_n$ εξαρτώνται από:
 - την παροχή στον αγωγό προσαγωγής (αναφέρεται και ως **αγωγός πτώσης**)
 - το υλικό και ηλικία του αγωγού (τραχύτητα)
 - τα γεωμετρικά μεγέθη του αγωγού (μήκος, διάμετρος)
 - τις αλλαγές γεωμετρίας (στροφές, στενώσεις, κτλ.) κατά τη διαδρομή του νερού μέχρι τους στροβίλους (**τοπικές απώλειες ενέργειας**)

- Γενική σχέση υδραυλικών απωλειών:

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

όπου J η κλίση της γραμμής ενέργειας (απώλειες ανά μέτρο μήκους), L το μήκος του αγωγού και οι τοπικές απώλειες.

- Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος προσαγωγής, ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση των υδραυλικών απωλειών (ενδεικτικό ποσοστό έως 5%).
- Οι **ηλεκτρομηχανολογικές απώλειες** εκφράζονται μέσω του **βαθμού απόδοσης των στροβίλων**, που γενικά εξαρτάται από την παροχή και το ύψος πτώσης.
- Κατά κανόνα, τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα λειτουργούν με σταθερή παροχή και συνεπώς μικρές διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης. Στα έργα αυτά, ο βαθμός απόδοσης φτάνει σε ποσοστά της τάξης του **$\eta = 90\%$** . Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται αξιοποίηση **πολύ μεγάλου ποσοστού του διαθέσιμου υδροδυναμικού** (υψηλότερου από κάθε άλλη πηγή ενέργειας, συμβατική ή ανανεώσιμη, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική).

Αρχικές εκτιμήσεις βασικών υδροενεργειακών μεγεθών

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 hm^3).
2. Επιλογή **χρόνου λειτουργίας στροβίλων**, T (σε h), ανάλογα με τη σκοπιμότητα του έργου στο ενεργειακό σύστημα (π.χ. έργο βάσης, έργο αιχμής).
3. Εκτίμηση **παροχής λειτουργίας στροβίλων** (σε m^3/s) (χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό των στροβίλων και τους υδραυλικούς υπολογισμούς των έργων προσαγωγής):

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

4. Εκτίμηση **καθαρού ύψους πτώσης**, H_n (σε 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** στροβίλων (τυπικό εύρος 0.85-0.92).
6. Εκτίμηση **μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας** (σε GWh , για $\gamma = 9.81 \text{ KN/m}^3$):

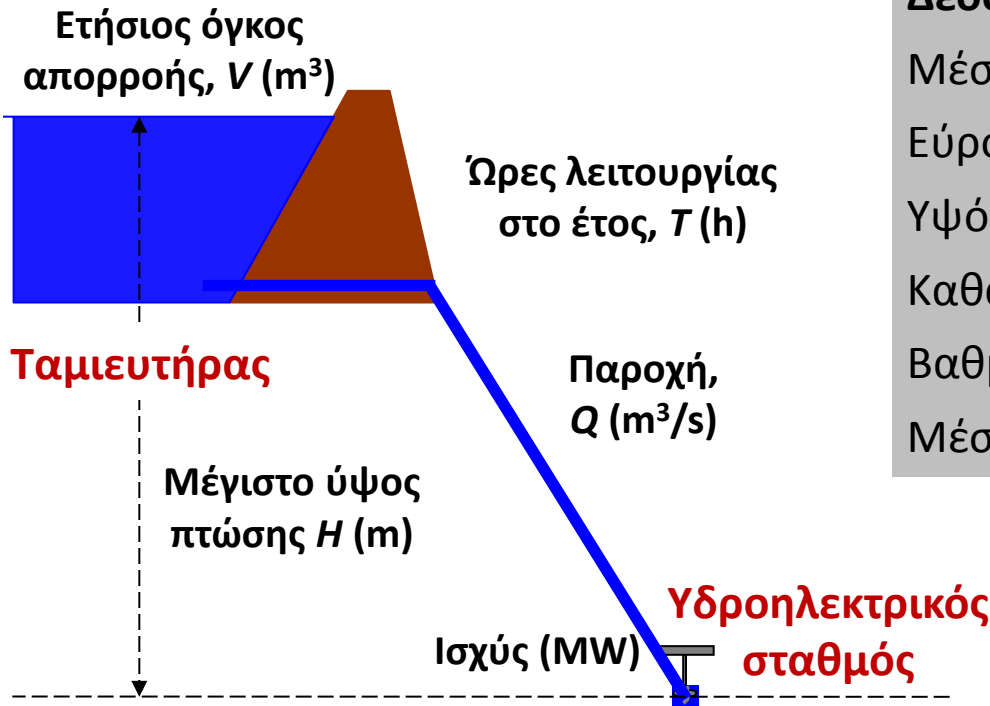
$$E = \eta \gamma V H_n / 3600$$

7. Εκτίμηση απαιτούμενης **ισχύος στροβίλων** (σε MW):

$$P = 1000 E / T$$

Η παραπάνω διαδικασία βασίζεται στην υπόθεση σταθερής παροχής λειτουργίας και σταθερού βαθμού απόδοσης των στροβίλων. Στην πράξη, οι συνθήκες αυτές επιτυγχάνονται μόνο σε μεγάλα Υ/Η έργα (ταμιευτήρες ικανής χωρητικότητας), στα οποία η εκροή του νερού είναι ελεγχόμενη.

Παράδειγμα με βάση τα δεδομένα του Υ/Η Πλαστήρα



Δεδομένα & παραδοχές
 Μέση ετήσια απορροή: **150 hm³**
 Εύρος στάθμης ταμιευτήρα: **+776 ως +792 m**
 Υψόμετρο σταθμού παραγωγής: **+206 m**
 Καθαρό ύψος πτώσης (εκτίμηση): **580 m**
 Βαθμός απόδοσης: **0.85**
 Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας: **201.5 GWh**

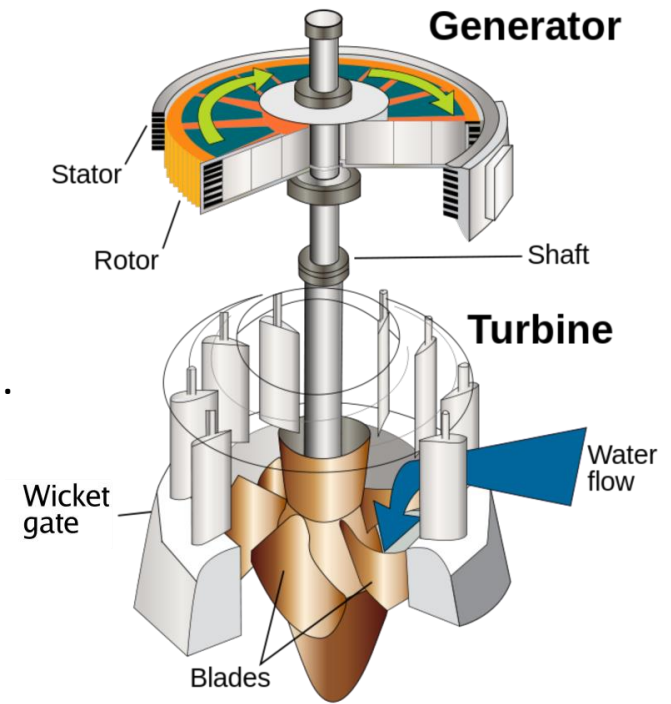
Ετήσιες ώρες λειτουργίας στροβίλων	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας	Παροχή λειτουργίας (m ³ /s)	Απαιτούμενη ισχύς στροβίλων (MW)
1500	0.17	27.8	134.3
3000	0.34	13.9	67.2
4500	0.51	9.3	44.8
8760	1.00	4.8	23.0

Για σταθερές τιμές των Q και η , ο συντελεστής δυναμικότητας ενός Υ/Η έργου ισούται με το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας του, ήτοι:

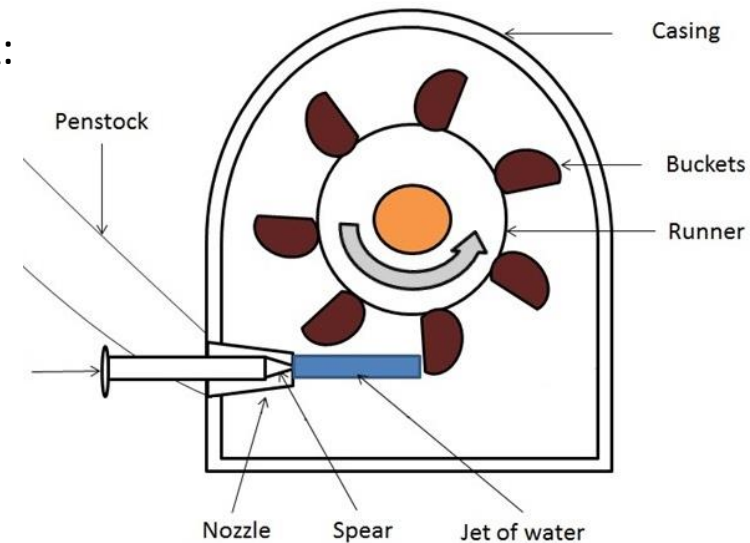
$\Sigma\Delta = T / 8760$

Η/Μ συνιστώσες: υδροστρόβιλοι, γεννήτριες & μετασχηματιστές

- ❑ **Υδροστρόβιλος (water turbine):** Συσκευή μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε περιστροφική κινητική ενέργεια ενός άξονα (shaft), οριζόντιου ή κατακόρυφου. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:
 - ❑ **Στρόβιλοι δράσης:** εκροή στην ατμόσφαιρα (αξιοποιείται η κινητική ενέργεια του νερού)
 - ❑ **Στρόβιλοι αντίδρασης:** ροή βυθισμένη (υπό πίεση)
- ❑ **Ηλεκτρογεννήτρια (electric generator):** Συσκευή μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική (εναλλασσόμενο ρεύμα). Περιλαμβάνει δύο τμήματα:
 - ❑ **Στάτορας (stator) ή στατόν ή επαγωγέας ή πόλοι μηχανής:** Ακίνητο μέρος, στο οποίο υπάρχουν μόνιμοι μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες
 - ❑ **Επαγωγίμο ή στρεπτόν ή ρότορας (rotor):** Κινητό μέρος, στο οποίο υπάρχουν πηνία.
- ❑ **Μετασχηματιστής (transformer):** Συσκευή μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε ρεύμα υψηλής ή υπερυψηλής τάσης.



Στρόβιλος αντίδρασης



Στρόβιλος δράσης

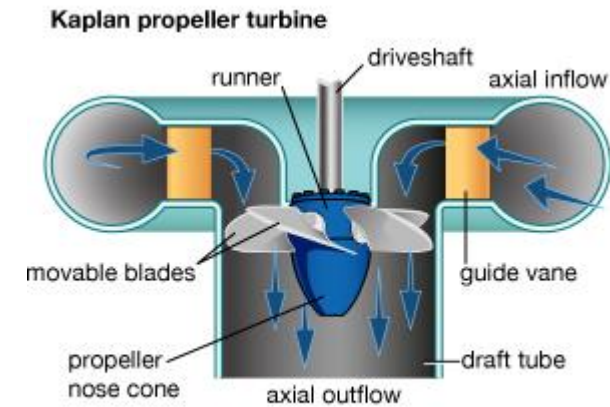
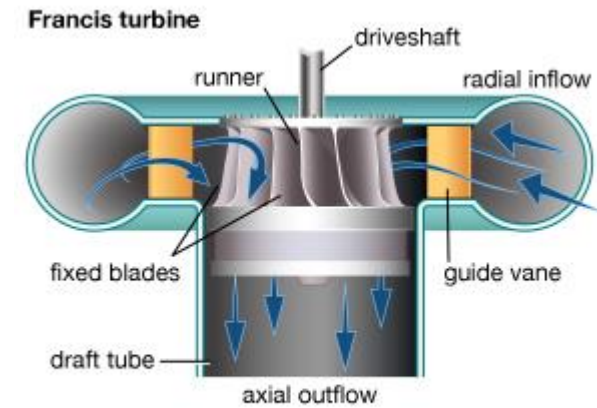
Τύποι στροβίλων

Στρόβιλοι δράσης ή μερικής προβολής

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

Στρόβιλοι αντίδρασης ή ολικής προσβολής

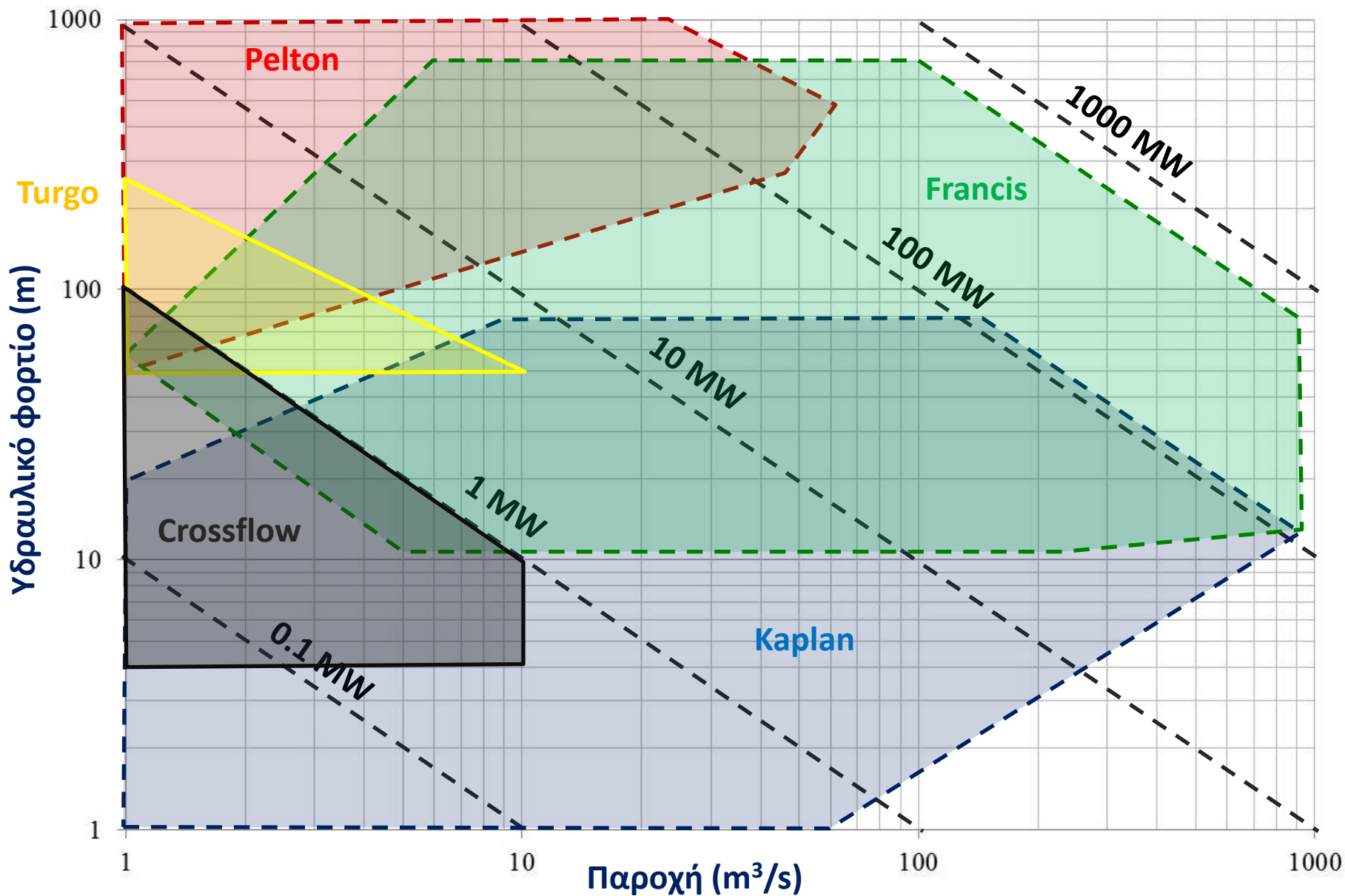
- ❑ **Francis:** Τυπικός τύπος στροβίλων για μεγάλα Υ/Η έργα. Κατάλληλοι για μέτρια ύψη πτώσης (60 ως 150 m) και αρκετά μεγάλο εύρος παροχών.
- ❑ **Kaplan:** Ενδείκνυται για μικρά ύψη πτώσης και μεγάλες παροχές. Κατάλληλος για χαμηλά φράγματα σε μεγάλα ποτάμια και για ΜΥΗΕ σε υδραγωγεία.



Ο βαθμός απόδοσης ενός στροβίλου δεν είναι σταθερός ούτε μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Η εκτίμησή του γίνεται με βάση εργαστηριακές μετρήσεις. Για κάθε στρόβιλο υπάρχει ένας συνδυασμός τιμών ύψους πτώσης και παροχής που μεγιστοποιεί τον βαθμό απόδοσης.



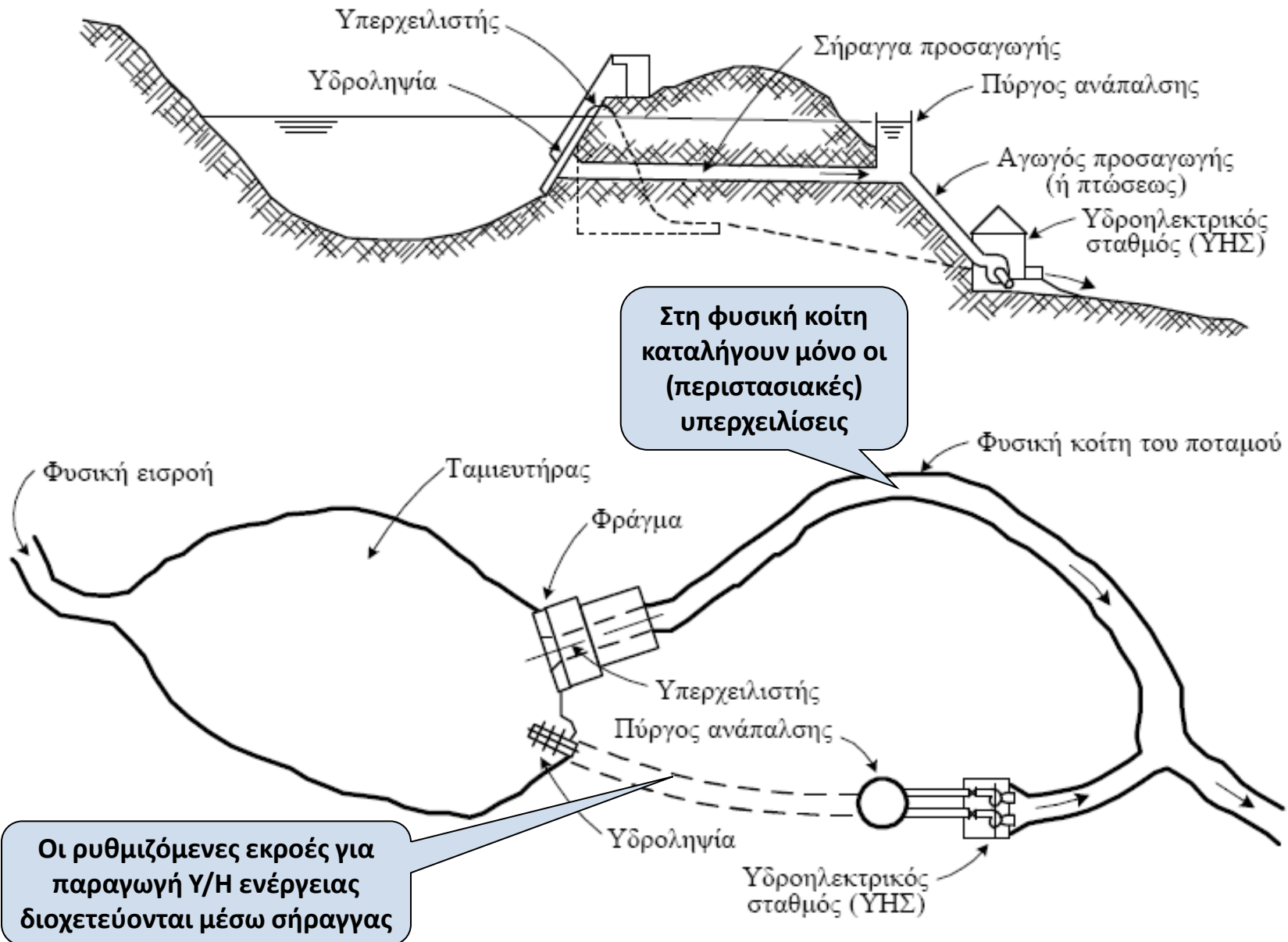
Εύρος εφαρμογής διαφορετικών τύπων στροβίλων



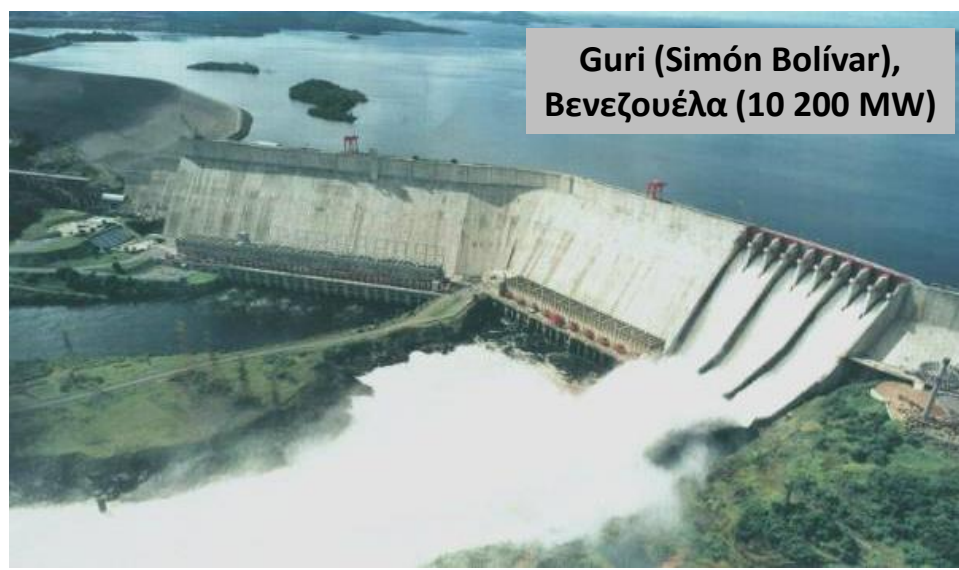
Κατηγορίες υδροηλεκτρικών έργων

- **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 απορροής 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.
- Σύστημα εκμετάλλευσης της **παλίρροιας (πλήρως προβλέψιμες εισροές, 24ωρος κύκλος)**

Γενική διάταξη (μεγάλων) Υ/Η έργων με ταμίευση

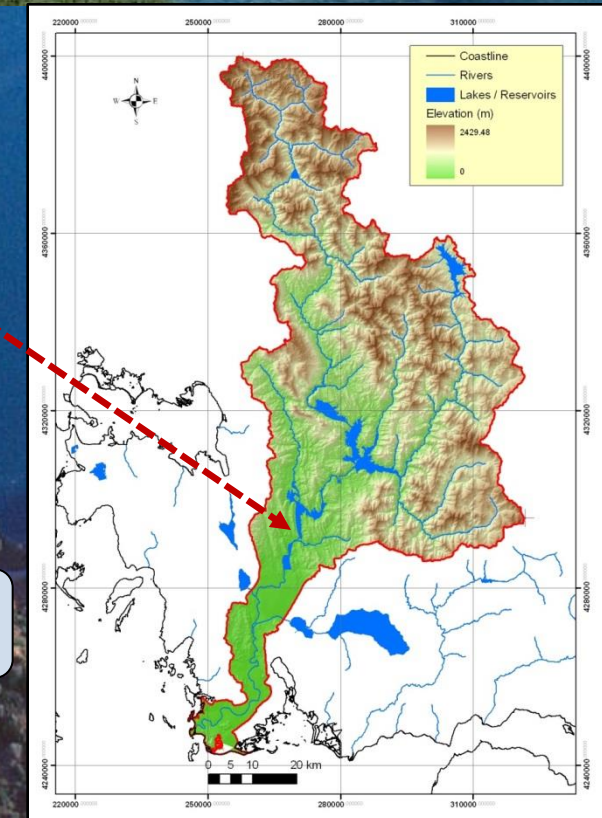


Τα μεγαλύτερα Υ/Η έργα του κόσμου



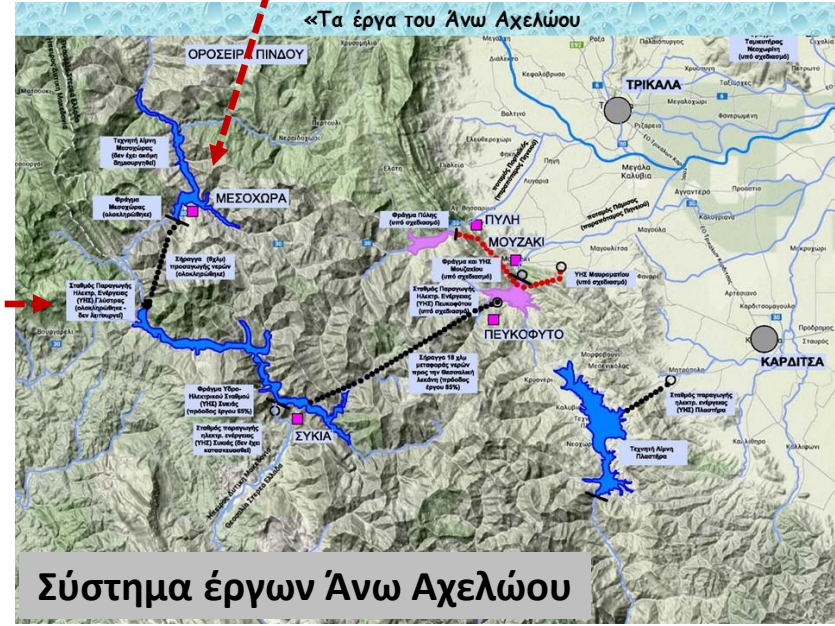
Παράδειγμα: Καστράκι (Αχελώος)

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



Παράδειγμα: Μεσοχώρα (Αχελώος)

- Ταμιευτήρας χωρητικότητας 358 hm³
- Υδροληψία +731.0 m, υπερχείλιση +770.0 m → ωφέλιμος όγκος 225 hm³
- Προσαγωγή μέσω σήραγγα εκτροπής, μήκους 7.5 km (έξοδος ΥΗΣ +550.0 m)
- Μέγιστο ύψος πτώσης 220 m
- Ισχύς 4×80 = 160 MW (Francis)
- Έργο ολοκληρωμένο εδώ και περίπου 15 έτη, εκτός λειτουργίας



Παράδειγμα: Πλαστήρας (Αχελώος)

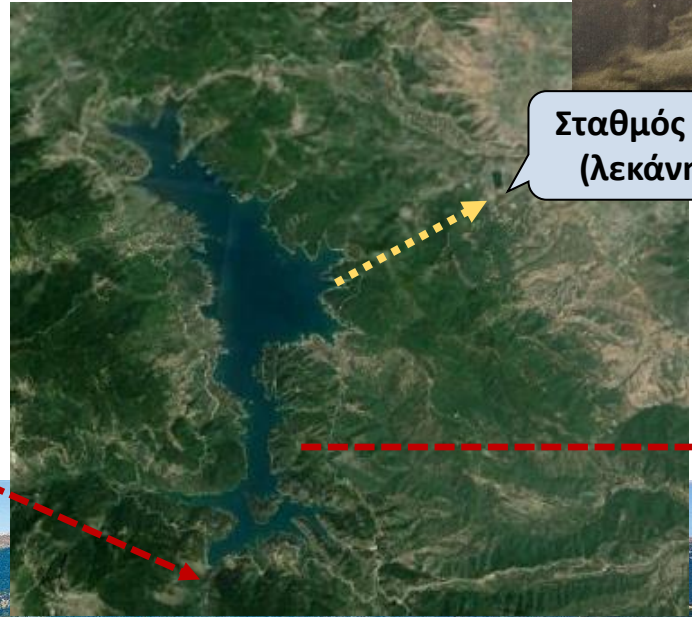
- Ταμιευτήρας χωρητικότητας 362 hm³
- Υδροληψία +776.0 m, υπερχείλιση +792.0 m → ωφέλιμος όγκος 286 hm³
- Μέγιστο ύψος πτώσης 586 m (έξοδος ΥΗΣ +206.0 m)
- Ισχύς 130 MW (3 Pelton)



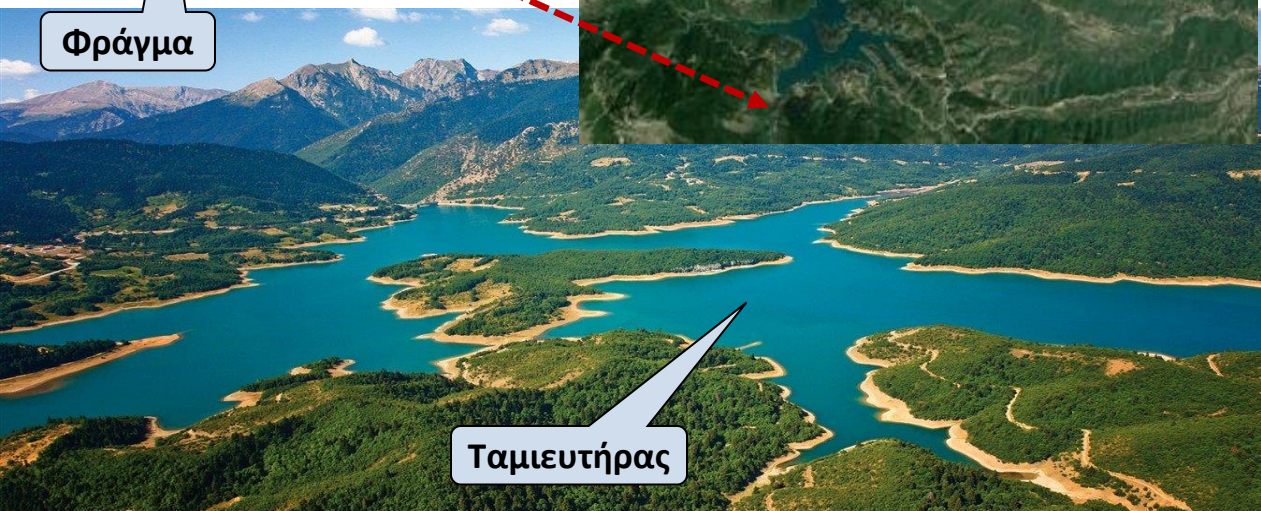
Αγωγός
πτώσης



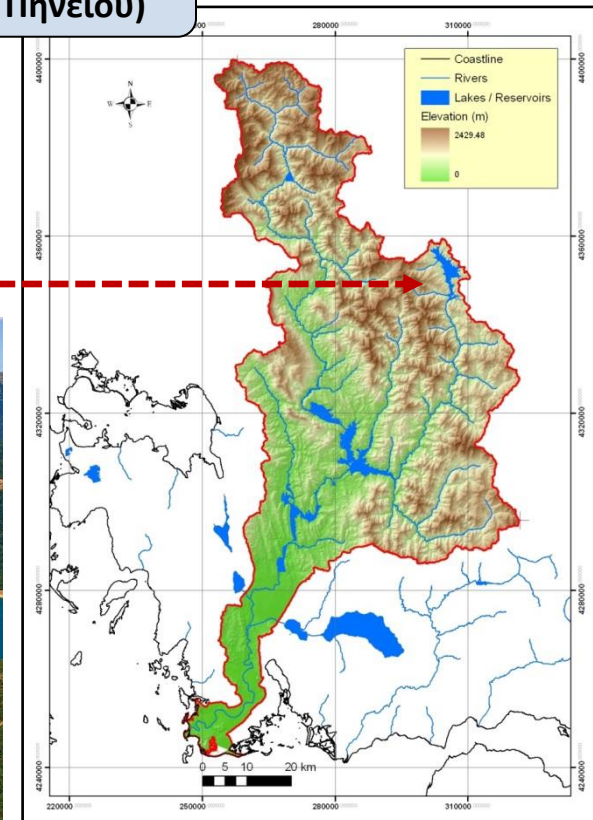
Φράγμα



Σταθμός παραγωγής
(λεκάνη Πηνειού)



Ταμιευτήρας



Πλεονεκτήματα 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
- ❑ Πολύ υψηλός βαθμός απόδοσης (ειδικά για ΑΠΕ)
- ❑ Μεγάλη αξιοπιστία υδροστροβίλων
- ❑ Παραγωγή ενέργειας χωρίς διακυμάνσεις
- ❑ Μεγάλη διάρκεια ζωής (συμβατικός ωφέλιμος χρόνος ζωής 100 έτη)
- ❑ Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης

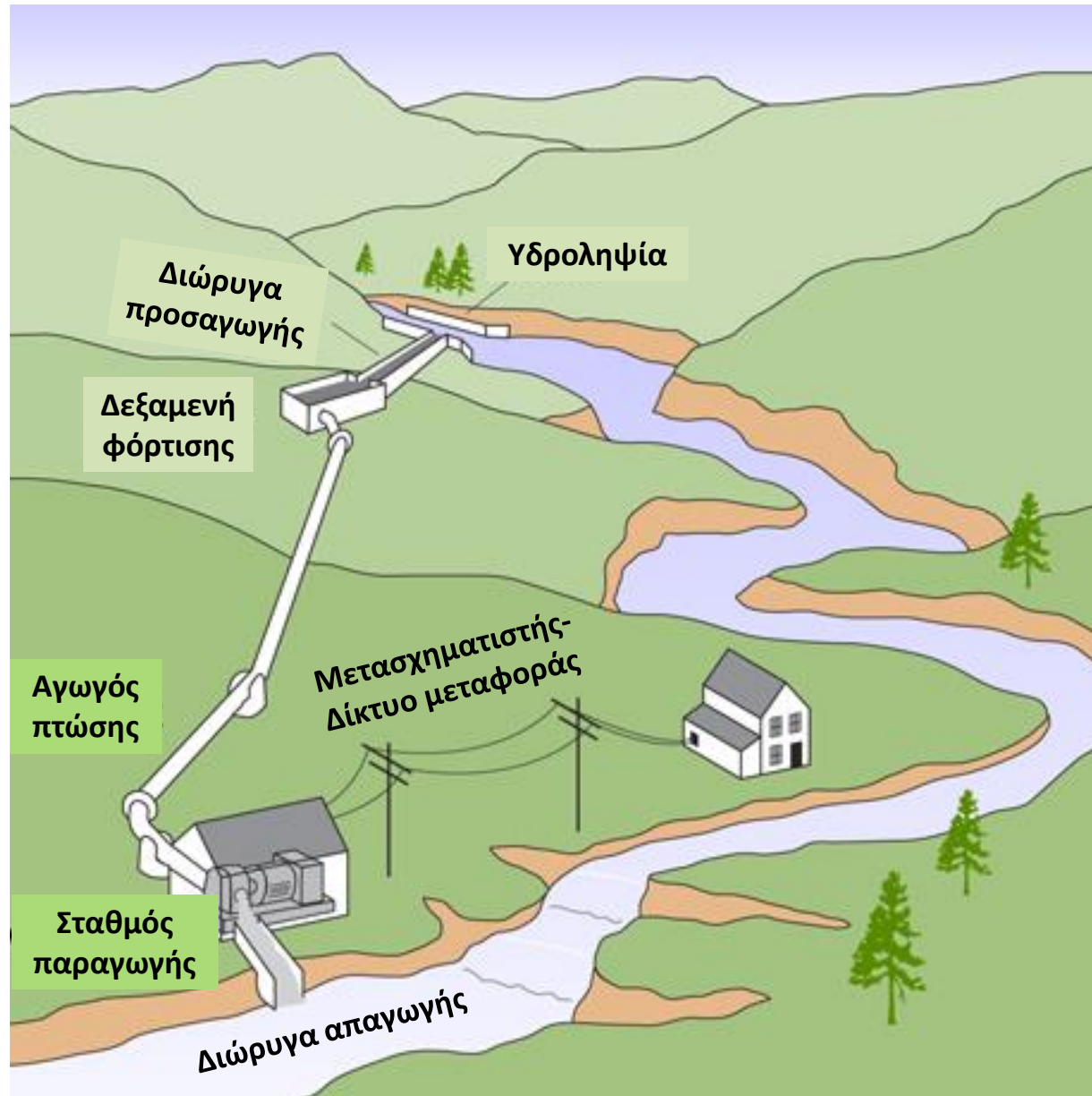
Λοιπά πλεονεκτήματα:

- ❑ 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 περιοχής

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

Σύμφωνα με το ισχύον νομικό πλαίσιο, μικρό υδροηλεκτρικό έργο (ΜΥΗΕ) θεωρείται 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

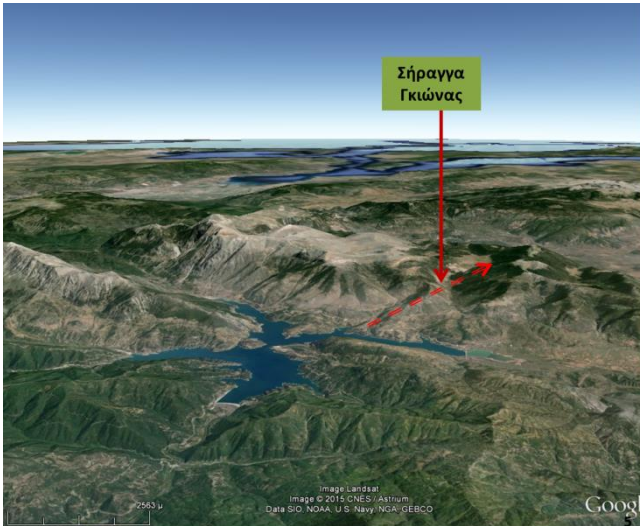
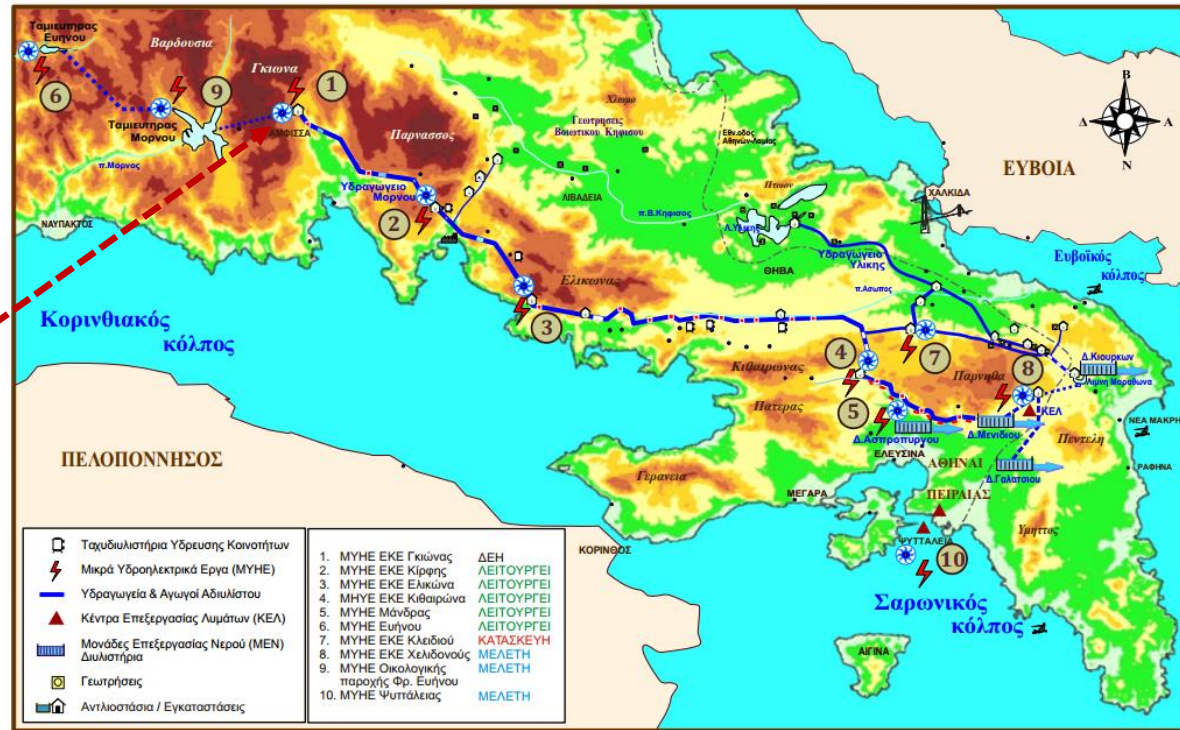


Παράδειγμα: ΜΥΗΕ Θεοδώριανων (ρ. Γκούρας, Άραχθος)



Παράδειγμα: ΜΥΗΕ Γκιώνας (κανάλι Μόρνου)

- Παροχή 7.8 ως 14.5 m³/s
- Ύψος πτώσης 30.0 ως 66.1 m
- Ισχύς 8.67 MW (34 GWh/έτος)



Κατανάλωση ενέργειας μέσω άντλησης

- Για να ανυψωθεί μια ποσότητα νερού V κατά μια υψομετρική διαφορά Δz , με χρήση αντλιών, απαιτείται κατανάλωση ενέργειας:

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

όπου H_M το λεγόμενο **μανομετρικό ύψος** και η ο **βαθμός απόδοσης** των αντλιών.

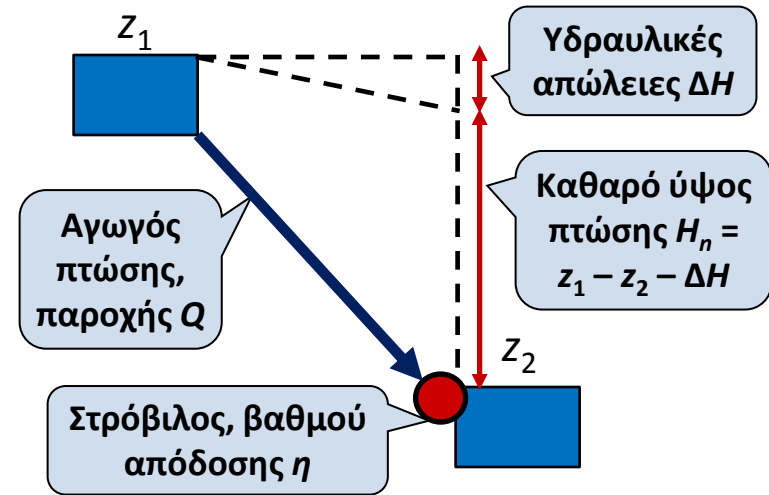
- Το μανομετρικό ύψος εκφράζει την **υδραυλική ενέργεια** που απαιτείται προκειμένου να καλυφθεί η υψομετρική διαφορά, Δz , και οι υδραυλικές απώλειες, ΔH , κατά τη μεταφορά του νερού (απώλειες ενέργειας στον λεγόμενο **καταθλιπτικό αγωγό**):

$$H_M = \Delta z + \Delta H$$

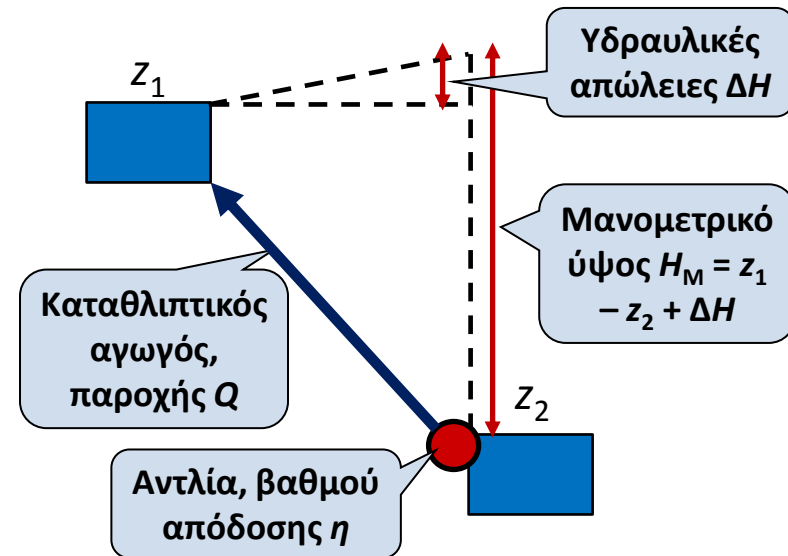
- Ο βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος της **μηχανικής ενέργειας** που παρέχει η αντλία προς την ηλεκτρική ενέργεια που της παρέχεται.
- Η απαιτούμενη ισχύς μιας αντλίας ισούται με:

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

όπου Q η διερχόμενη παροχή.



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

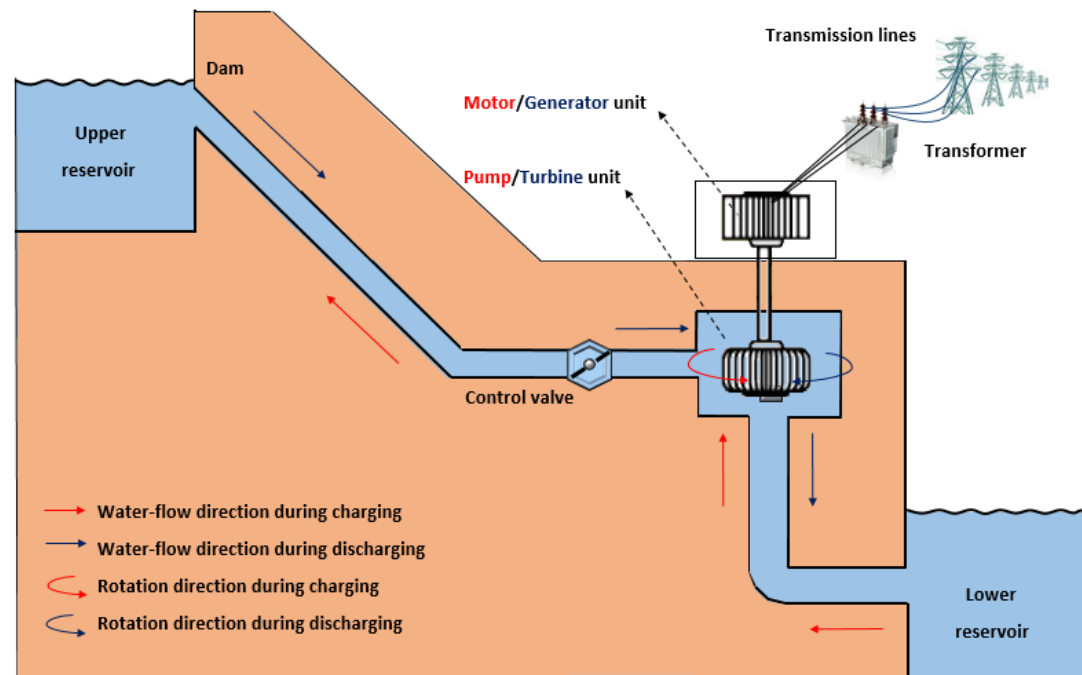


Καταναλισκόμενη ισχύς: $P = \gamma Q (\Delta z + \Delta H) / \eta$

Συστήματα άντλησης-ταμίευσης (αντλιοσταμείωση)

- Συνιστώσες συστήματος:
 - Διασυνδεδεμένα έργα αποθήκευσης, 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)

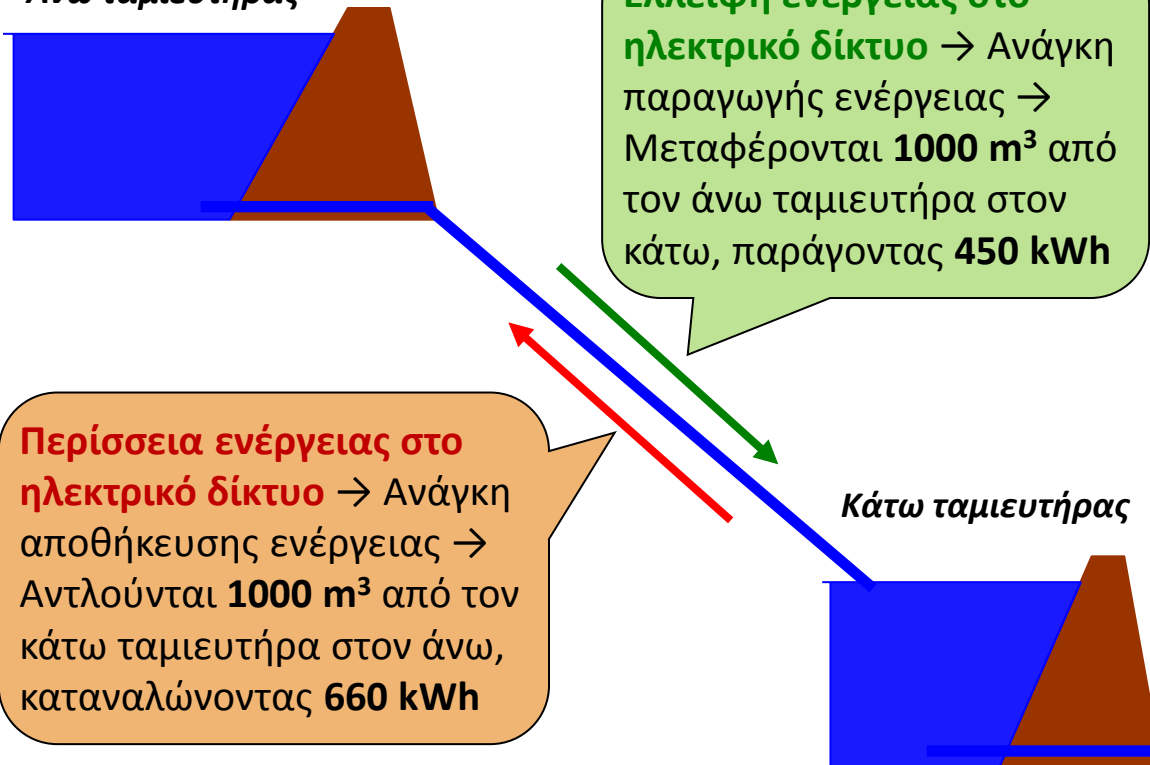


Αριθμητική εφαρμογή

Δεδομένα & παραδοχές:

- Δύο ταμιευτήρες με διάταξη αντλησιοταμίευσης, σε υψομετρική διαφορά 200 m
- Μεταφορά όγκου νερού 1000 m^3 από τον άνω στον κάτω ταμιευτήρα και αντίστροφα
- Καθαρό ύψος πτώσης 195 m (5 m απώλειες ενέργειας στον αγωγό για μεταφορά 1000 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



Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης **αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας**, χάνοντας ποσοστό της τάξης του 30%.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή της ενέργειας είναι μισή στις περιόδους που υπάρχει περίσσεια (π.χ. νύχτα), προκύπτει **οικονομικό όφελος** από την όλη διαδικασία.

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

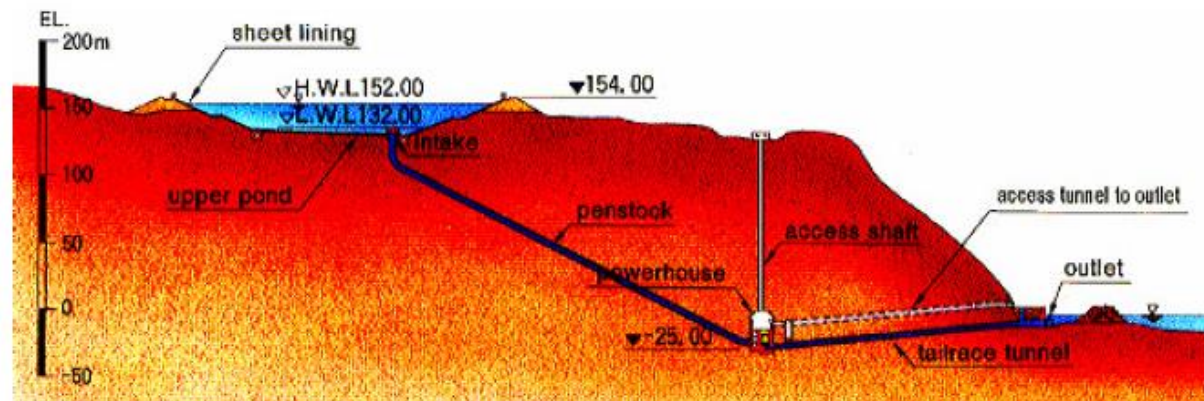
Παράδειγμα αντλησιοταμίευσης: Kazunogawa (Ιαπωνία)

- ❑ Λειτουργεί από το 2001 στην περιοχή Yamnashi-Ken της Ιαπωνίας, και αποτελείται από δύο ταμιευτήρες χωρητικότητας 19.2 και 18.4 hm³, με υψομετρική διαφορά 685 m.
- ❑ Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας, ισχύος 1600 MW, βρίσκεται 500 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και συνδέεται με τον άνω και κάτω ταμιευτήρα με σήραγγες μήκους 5 και 3 km.



Παράδειγμα αντλησιοταμίευσης: Okinawa (Ιαπωνία)

- Το πρώτο έργο άντλησης-ταμίευσης στον κόσμο που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό (έναρξη λειτουργίας 1999).
- Ισχύς 30 MW, ύψος πτώσης 140 m, μέγιστη παροχή 26 m³/s
- Κατά τη λειτουργία του έργου δημιουργήθηκαν σοβαρά προβλήματα εξαιτίας:
 - της διήθησης θαλασσινού νερού από τη δεξαμενή στο έδαφος
 - της προσκόλλησης θαλάσσιων οργανισμών στο εσωτερικό των αγωγών
 - της διάβρωσης των στροβίλων και άλλων μεταλλικών στοιχείων



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.

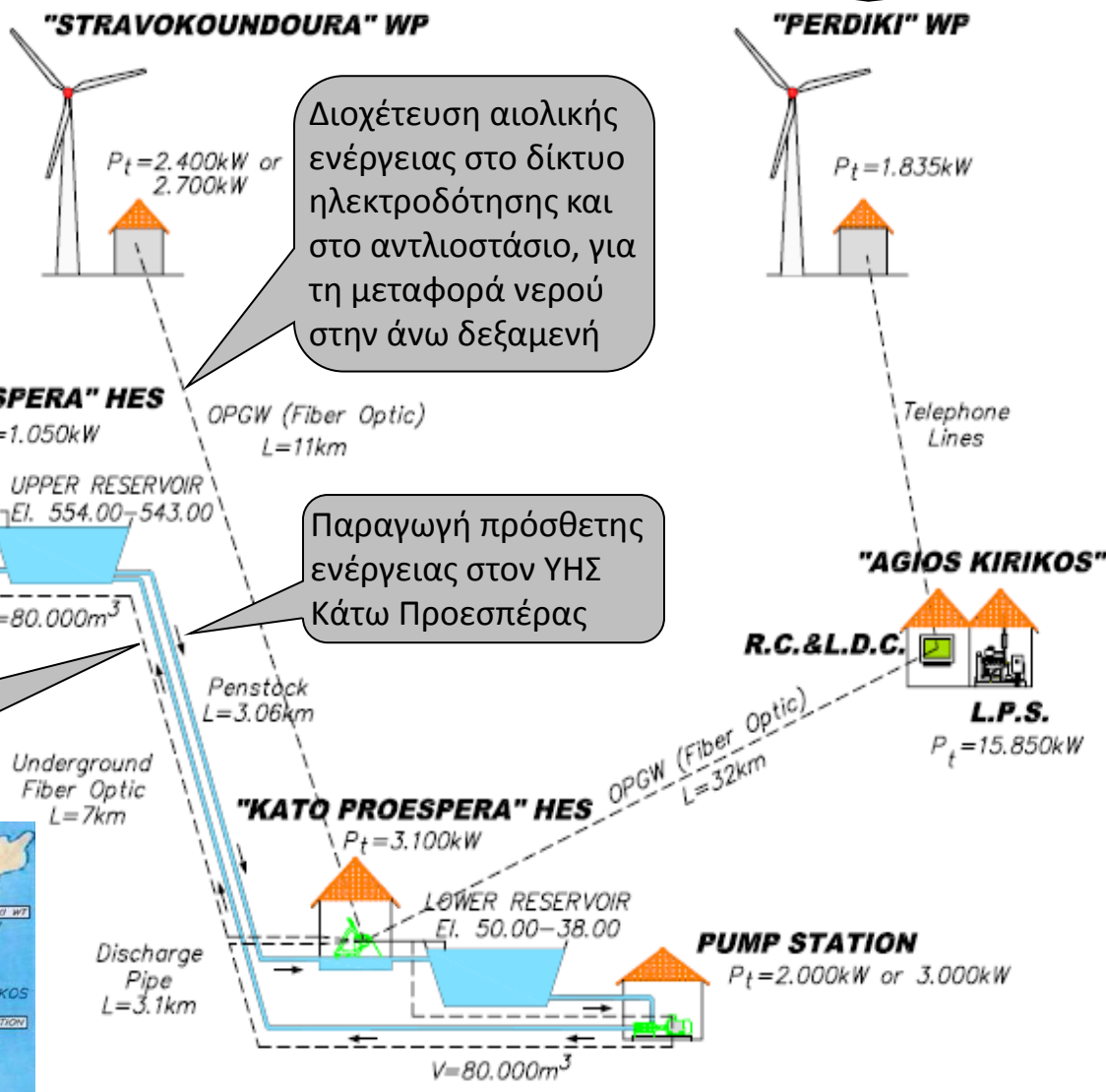
Το καλοκαίρι το νερό του ταμιευτήρα Πέζι διατίθεται κυρίως για ύδρευση και άρδευση

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**