

Ανανεώσιμη Ενέργεια & Υδροηλεκτρικά Έργα

8^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

2^ο εξάμηνο ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

Υδροηλεκτρική ενέργεια – Γενικές διατάξεις υδροενεργειακών έργων



Ανδρέας Ευστρατιάδης, Νίκος Μαμάσης & Δημήτρης Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ακαδημαϊκό έτος 2019-20

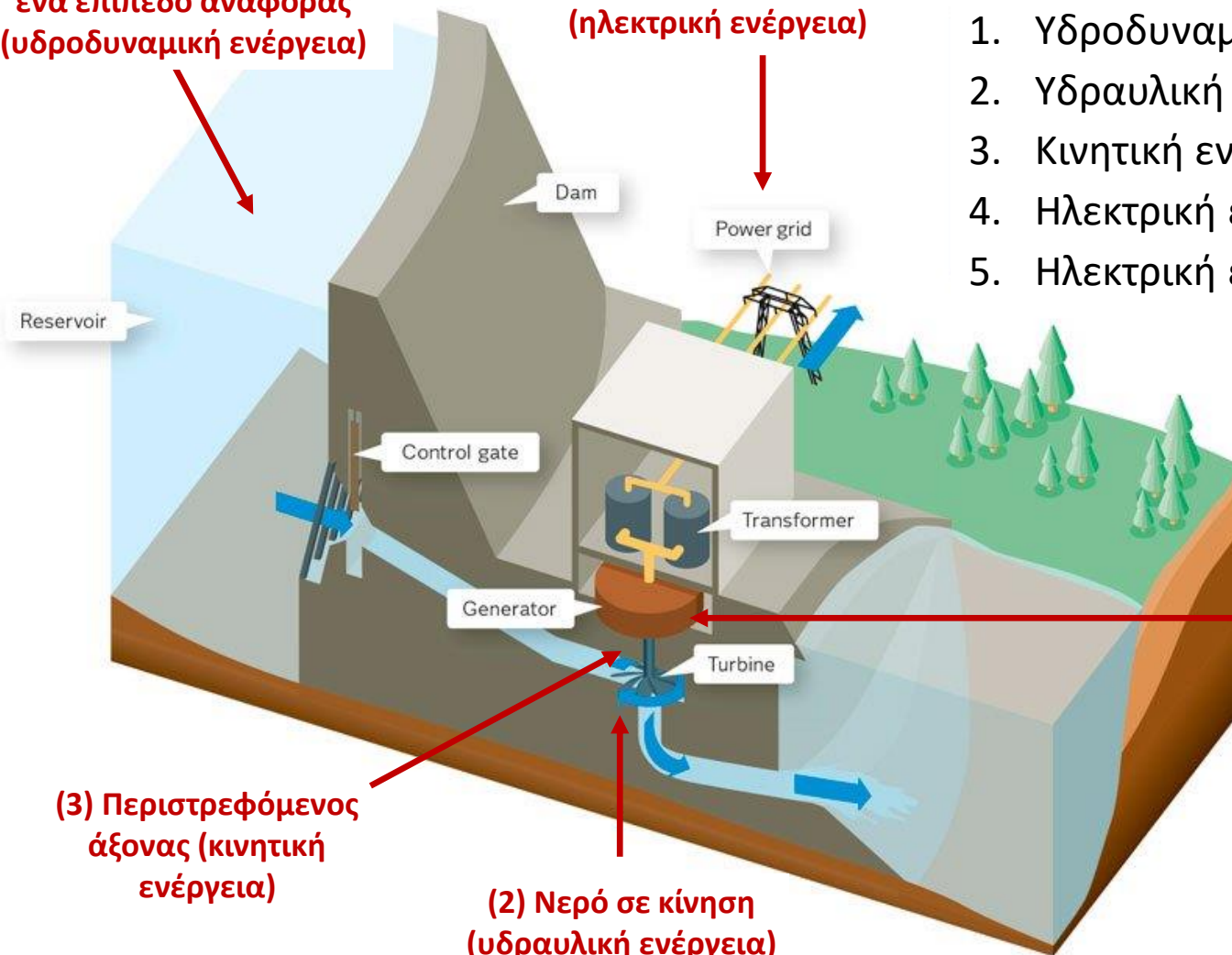
Γενική διάταξη & συνιστώσες συστήματος παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας

(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)

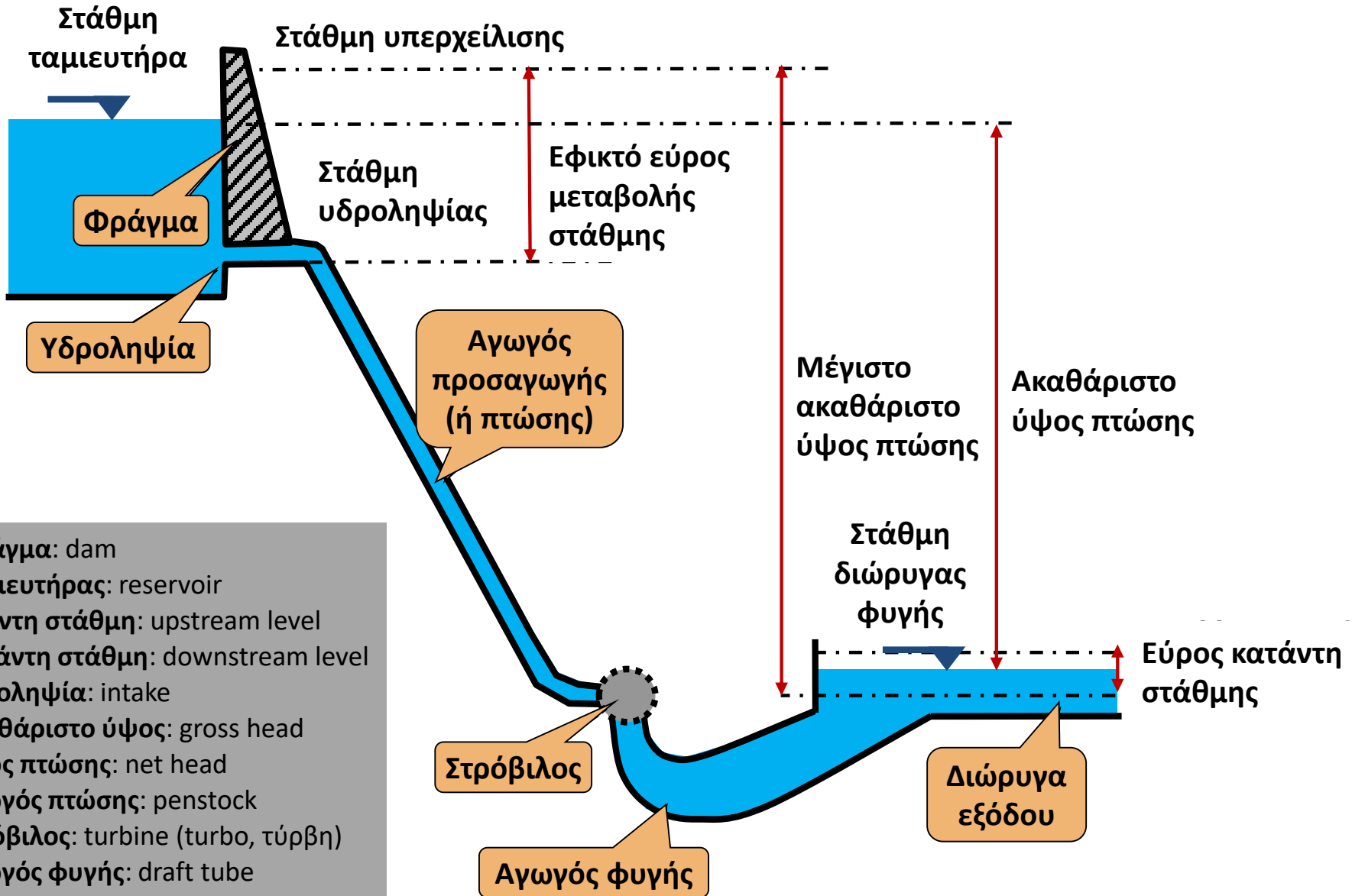


(4) Περιστρεφόμενο πηνίο σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (ηλεκτρική ενέργεια χαμηλής τάσης)

(3) Περιστρεφόμενος άξονας (κινητική ενέργεια)

(2) Νερό σε κίνηση (υδραυλική ενέργεια)

Υδροενεργειακά μεγέθη & ορολογία



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

Θεμελιώδεις έννοιες υδροδυναμικής (1)

- **Δυναμική ενέργεια** μάζας νερού m (kg) που είναι αποθηκευμένη σε ύψος h (m) από ένα επίπεδο αναφοράς (υδροδυναμική ενέργεια ή **υδροδυναμικό**, σε kJ):

$$E_{\Delta} = m g h = \rho g V h = \gamma V h$$

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).

- **Θεωρητική ισχύς** που μπορεί να αποδοθεί από μια **ιδεατή υδροδυναμική μηχανή**: (στρόβιλος), υποθέτοντας πλήρη αξιοποίηση της υδροδυναμικής ενέργειας:

$$P_0 = \gamma q h$$

όπου q η διερχόμενη παροχή.

- Στα υδροηλεκτρικά έργα, η ποσότητα h καλείται **ολικό ή ακαθάριστο ύψος πτώσης**, και ορίζεται ως η διαφορά του ανάντη και κατάντη ενεργειακού υψομέτρου, ήτοι $h = z - z_D$.
- Το **ανάντη ενεργειακό υψόμετρο** ταυτίζεται με τη στάθμη νερού, z , στην ανάντη διάταξη αποθήκευσης (μεταβλητή, για ταμιευτήρα, ή πρακτικά σταθερή, για δεξαμενή φόρτισης).
- Το κατάντη ενεργειακό υψόμετρο, z_D , εξαρτάται από τον τύπο των στροβίλων:
 - Σε **στροβίλους δράσης**, όπου πραγματοποιείται εκροή νερού στην ατμόσφαιρα μέσω ακροφυσίου, το ενεργειακό υψόμετρο είναι σταθερό και ίσο με τη στάθμη εξόδου.
 - Σε **στροβίλους αντίδρασης**, το ενεργειακό υψόμετρο εξαρτάται από τη στάθμη του νερού στην έξοδο του συστήματος (π.χ. διώρυγα φυγής), που είναι μεταβλητή (εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από την παροχή που διέρχεται από τους στροβίλους).

Θεμελιώδεις έννοιες υδροδυναμικής (2)

□ Απώλειες ισχύος στα υδροηλεκτρικά έργα:

- Κατά τη μεταφορά του νερού στους στροβίλους, ήτοι τη μετατροπή της υδροδυναμικής ενέργειας σε υδραυλική (= κινητική ενέργεια + ενέργεια πίεσης)
- Κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική (απώλειες στροβίλων, γεννητριών, μετασχηματιστών)

□ Μετατροπή υδροδυναμικής ισχύος σε **υδραυλική**:

$$P_Y = \gamma q h_n$$

όπου h_n το **καθαρό ύψος πτώσης**, που προκύπτει αφαιρώντας από το ολικό ύψος τις **υδραυλικές απώλειες** κατά τη **προσαγωγή** του νερού στους στροβίλους.

□ Ως **ύψος πτώσης** νοείται η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που διατίθεται στον στρόβιλο:

$$h_n = z - z_D - h_L$$

όπου h_L οι ενεργειακές απώλειες στο σύστημα προσαγωγής (υδραυλικές απώλειες), που διακρίνονται σε **γραμμικές** (λόγω τριβών) και **τοπικές** (λόγω γεωμετρικών αλλαγών).

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

$$P = \eta P_Y = \eta \gamma q h_n$$

όπου η ο **βαθμός απόδοσης των στροβίλων**.

- Η ποσότητα $(1 - \eta) P_Y$ εκφράζει τις συνολικές απώλειες ισχύος κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας που αποδίδεται στον στρόβιλο σε ηλεκτρική ενέργεια που εξάγεται στο δίκτυο υψηλής τάσης.

Θεμελιώδεις έννοιες υδροδυναμικής (3)

□ Στη γενική περίπτωση:

- ο βαθμός απόδοσης είναι συνάρτηση του ύψους πτώσης και της παροχής
- το ύψος πτώσης είναι συνάρτηση της ανάντη στάθμης και της παροχής (δεδομένου ότι οι υδραυλικές απώλειες είναι συνάρτηση της παροχής)
- η ανάντη στάθμη και η παροχή είναι χρονικά μεταβαλλόμενα

□ Με βάση τα παραπάνω, η **γενική σχέση της ισχύος** γράφεται:

$$P_t = \eta(z_t, q_t) \gamma q_t h_n(z_t, q_t)$$

□ Συνεπώς, η **παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια** ενέργεια είναι:

$$E_t = \int P_t dt = \gamma \int \eta(z_t, q_t) q_t h_n(z_t, q_t) dt$$

□ Θεωρώντας μόνο την παροχή ως μεταβλητή, η σχέση της υδροηλεκτρικής ενέργειας γράφεται στην απλοποιημένη μορφή:

$$E = \gamma \eta h_n \int q_t dt = \gamma \eta V h_n$$

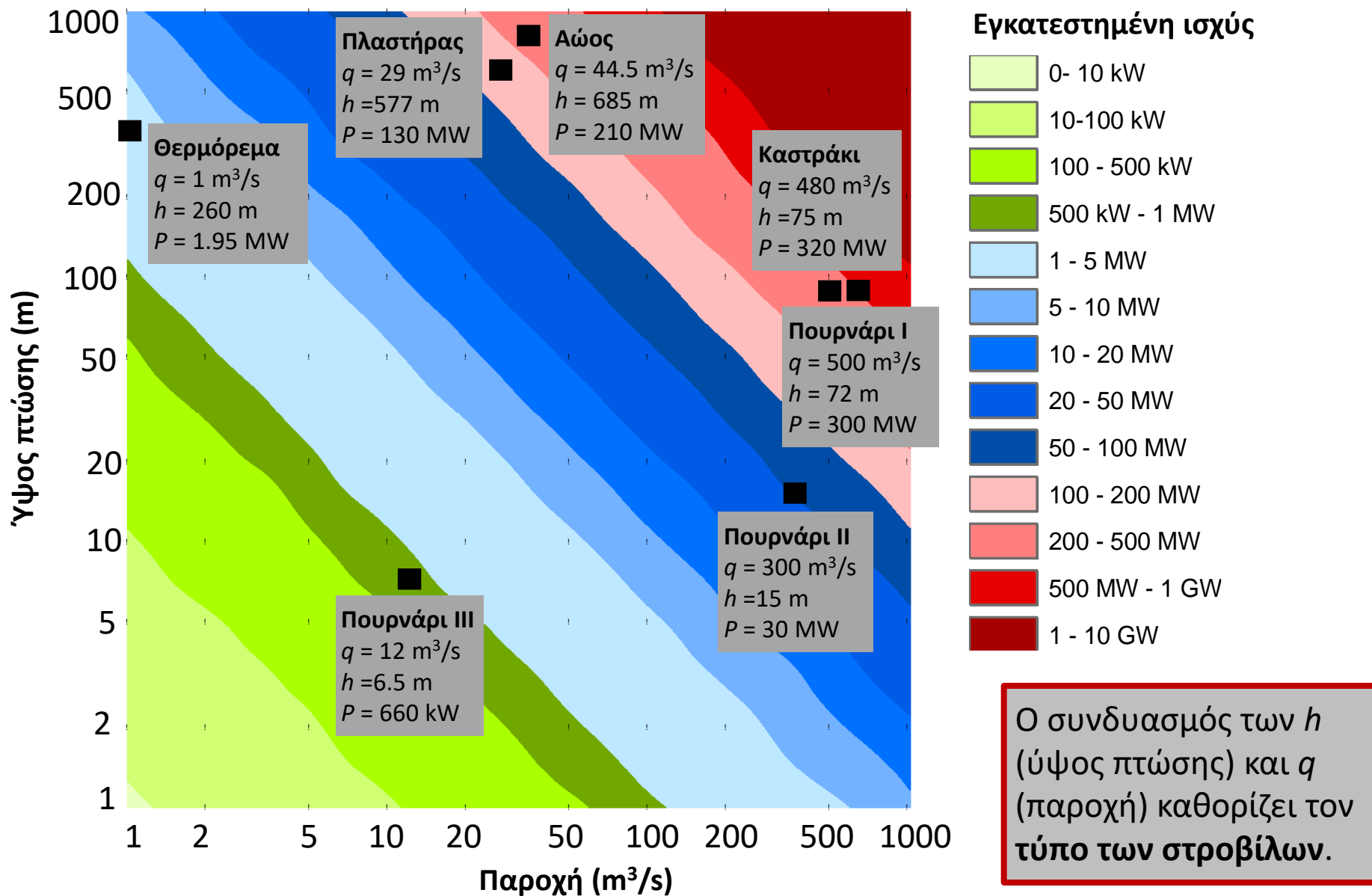
□ Θέτοντας $\psi := \gamma \eta h_n / h$, η παραγόμενη ενέργεια γράφεται στην ισοδύναμη μορφή:

$$E = \psi V h$$

□ Η ποσότητα ψ καλείται **ειδική ενέργεια**, στην οποία ενσωματώνεται το σύνολο των απωλειών κατά το μετασχηματισμό της υδροδυναμικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

□ Σε ένα **ιδεατό σύστημα μετατροπής**, ήτοι για $\eta = 1$ και $h_n = h$ (ήτοι $h_L = 0$), η ειδική ενέργεια γίνεται μέγιστη και ίση με 0.002725 kWh/m^4 (0.2725 GWh/hm^4).

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



Αρχικός υδροενεργειακός σχεδιασμός μεγάλων 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 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 (μεγάλα έργα, $\eta > 0.85$).
6. Εκτίμηση **μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας** (σε GWh , για $\gamma = 9.81 \text{ KN/m}^3$):

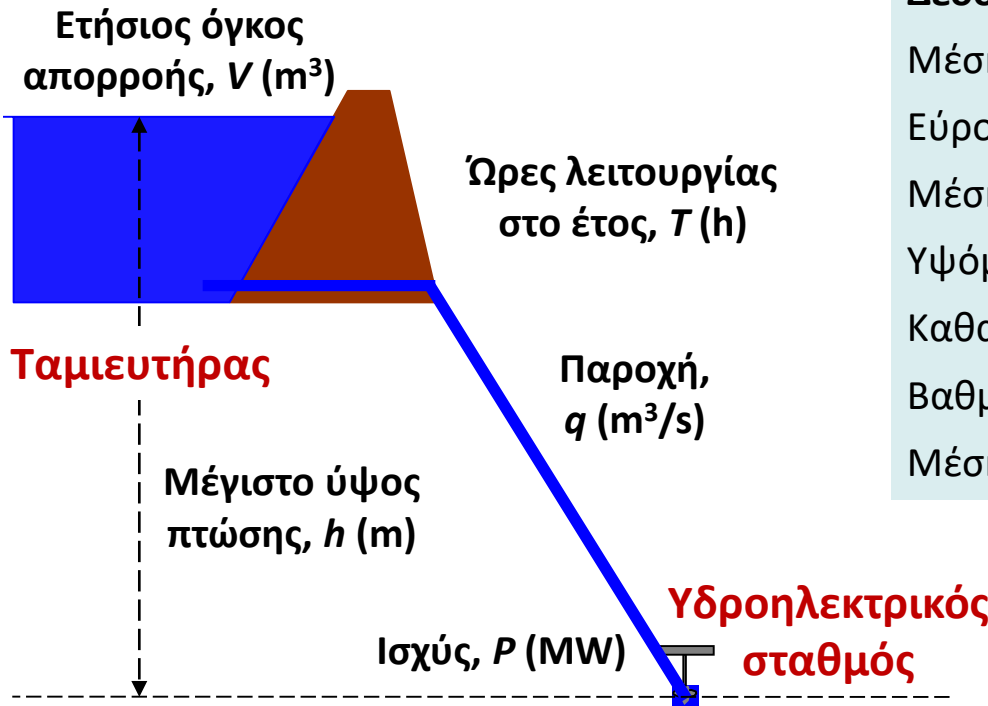
$$E = \eta \gamma V h_n / 3600$$

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 υπερετήσιας ρυθμιστικής ικανότητας)**, στα οποία η εκροή του νερού είναι ελεγχόμενη.

Παράδειγμα με βάση τα δεδομένα του Υ/Η Πλαστήρα



Δεδομένα & παραδοχές

Μέση ετήσια απορροή: $V = 150 \text{ hm}^3$

Εύρος στάθμης ταμιευτήρα: +776 ως +792 m

Μέση στάθμη: $z = +784 \text{ m}$

Υψόμετρο σταθμού παραγωγής: $z_D = +206 \text{ m}$

Καθαρό ύψος πτώσης (προσέγγιση): $h_n = 580 \text{ m}$

Βαθμός απόδοσης: $\eta = 0.85$

Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας: $E = 201.5 \text{ GWh}$

| 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 μεγάλου Υ/Η έργου είναι πρακτικά ίσος με το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας των στροβίλων σε πλήρη ισχύ, ήτοι:

$$\Sigma \Delta = T / 8760$$

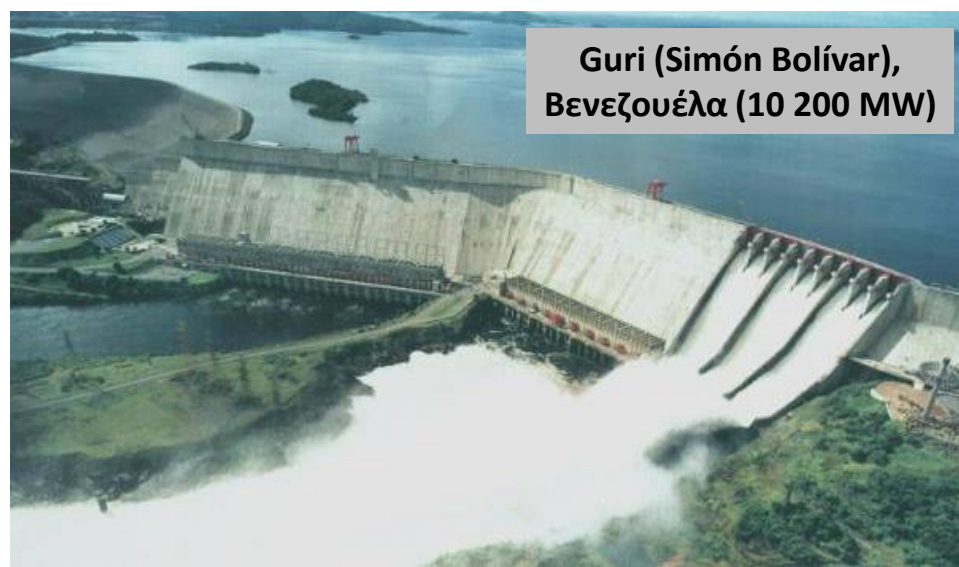
Κατηγορίες υδροηλεκτρικών έργων

- **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 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 ενεργειακό 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 (χαμηλότερη) λεκάνη (**φράγμα εκτροπής**)
- **(Μικρό) υδροηλεκτρικό έργο (ΜΥΗΕ), χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης:**
 - Επί του ρου ποταμού ή υδραγωγείου, για εκμετάλλευση της 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)**

Άλλοι τρόποι τυποποίησης υδροηλεκτρικών έργων

- Με βάση την **εγκατεστημένη ισχύ**:
 - Μικρά έργα, για $P < 15$ MW (όριο που εφαρμόζεται τώρα και στην Ελλάδα – σε άλλες χώρες εφαρμόζονται επίσης όρια από 5 έως 15 MW)
 - Επιπλέον κατηγοριοποίηση, με βάση τα όρια των 100 kW (mini) και 1 MW (micro)
 - Μεγάλα έργα, για $P > 15$ MW
- Με βάση το **ύψος πτώσης**:
 - Έργα μικρού ύψους, για $H < 30$ m
 - Έργα μεσαίου ύψους, για $30 < H < 200-300$ m
 - Έργα μεγάλου ύψους, για $H > 200-300$ m
- Με βάση τη **χρονική κατανομή της παραγόμενης ενέργειας**:
 - Έργα βάσης (συνεχής λειτουργία στροβίλων)
 - Έργα αιχμής (λειτουργία στροβίλων τις ώρες αιχμής της ενεργειακής ζήτησης)
 - Έργα αντιστρεπτής λειτουργίας (παραγωγή ενέργειας τις ώρες αιχμής της ζήτησης, άντληση τις ώρες περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας)
- Με βάση τις **χρήσεις νερού** που εξυπηρετεί το έργο:
 - Έργα απλού σκοπού (αποκλειστική λειτουργία για παραγωγή Υ/Η ενέργειας)
 - Έργα πολλαπλού σκοπού (αξιοποίηση του νερού για άρδευση, ύδρευση, κτλ.)

Τα μεγαλύτερα Υ/Η έργα του κόσμου



Τα μεγαλύτερα Υ/Η έργα της Ελλάδας

Κρεμαστά, Αχελώος (437 MW)



Πολύφυτο, Αλιάκμονας (375 MW)



Θησαυρός, Νέστος (384 MW)

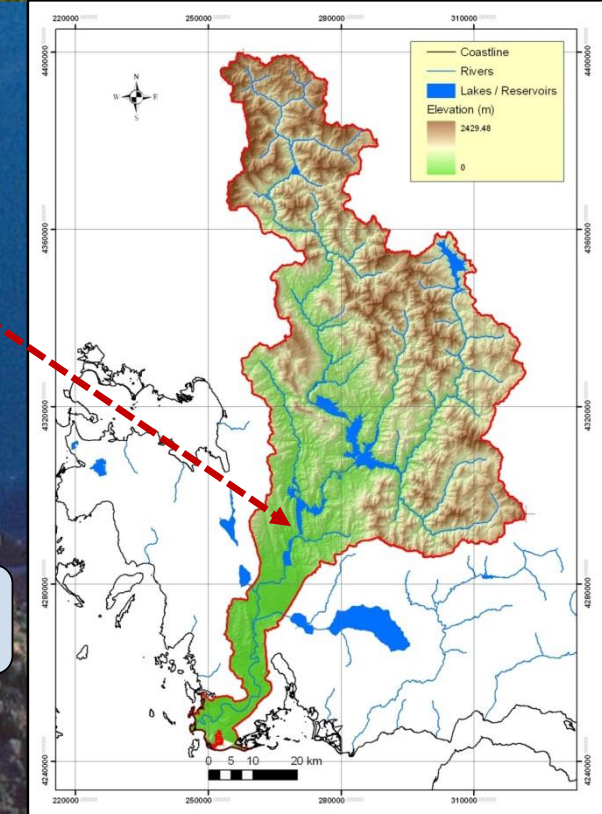


Καστράκι, Αχελώος (320 MW)



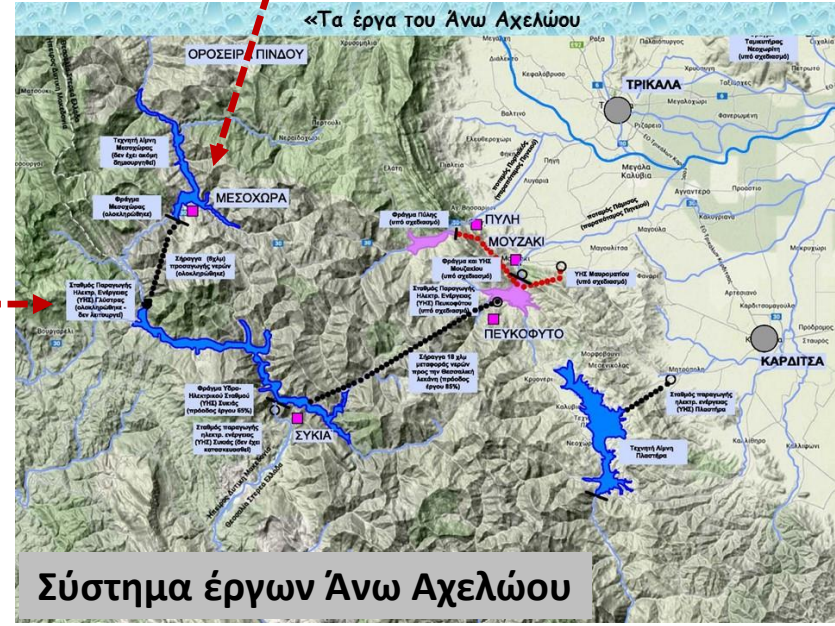
Παράδειγμα: Καστράκι (Αχελώος)

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



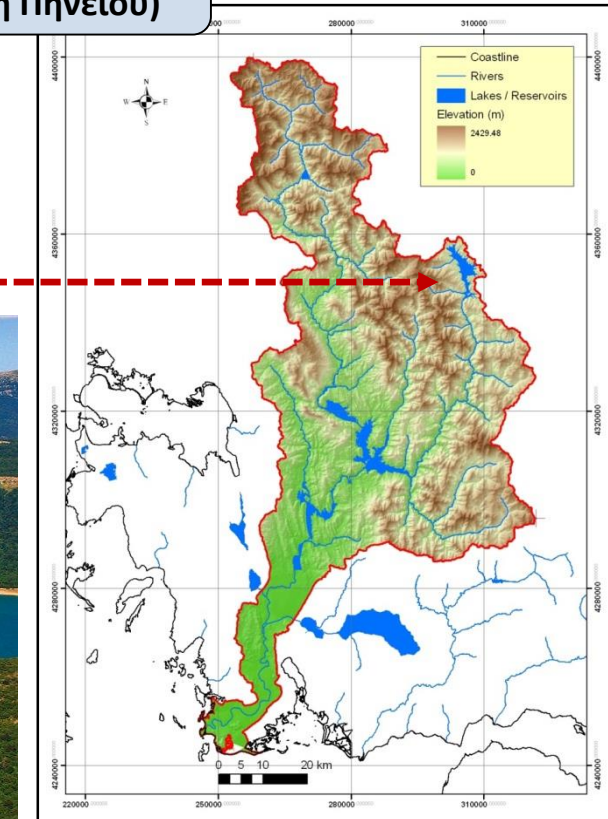
Παράδειγμα: Μεσοχώρα (Αχελώος)

- ❑ 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)



Συστήματα μεγάλων Υ/Η έργων: Αχελώος

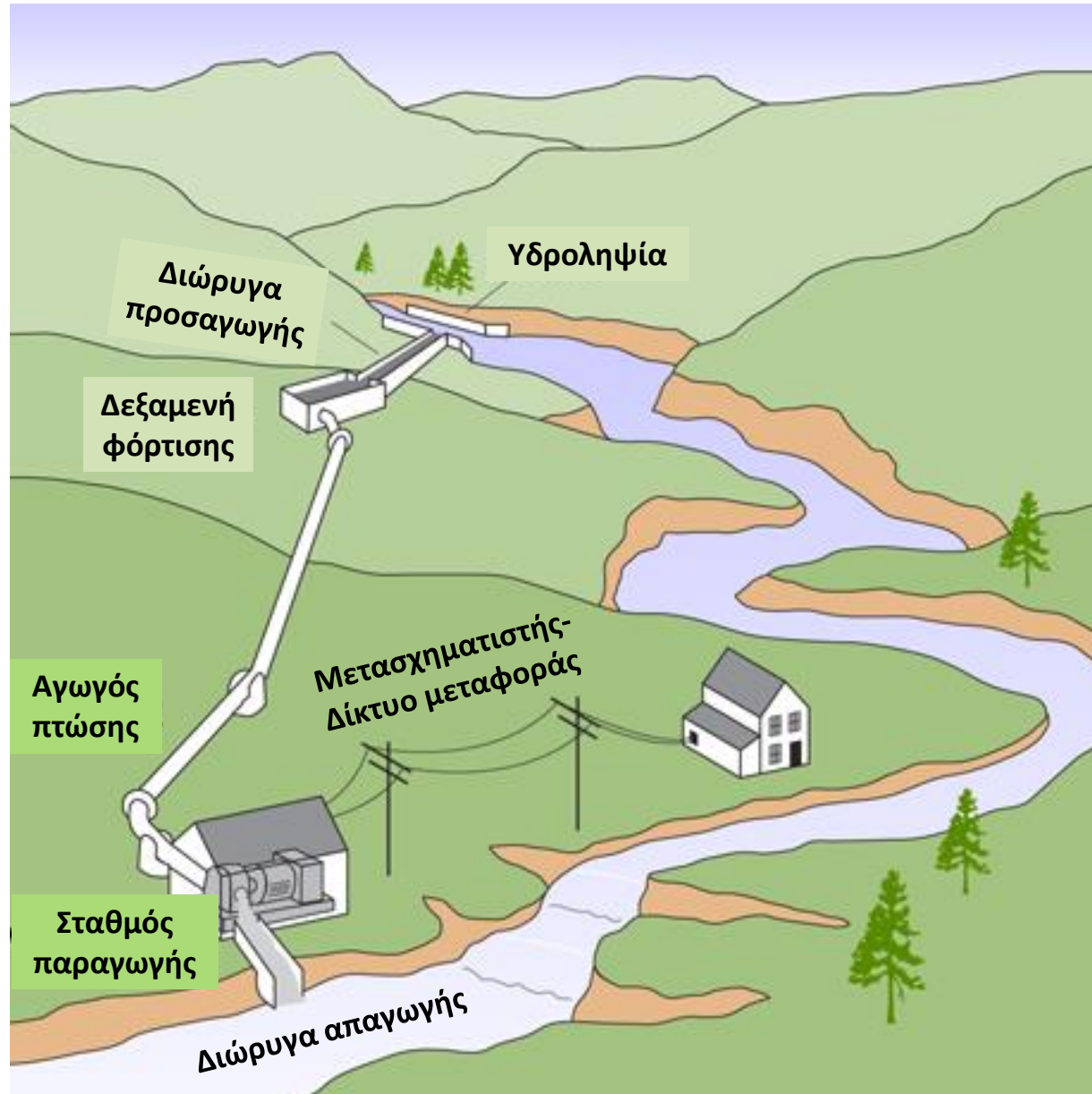


| | Πλαστήρας | Κρεμαστά | Καστράκι | Στράτος | Μεσοχώρα |
|--|---------------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------|
| Έκταση λεκάνης απορροής (km ²) | 161 | 3570 | 4118 | 4320 | 633 |
| Μέση ετήσια απορροή (hm ³) | 167 | 3600 | 3950 | 4110 | 730 |
| Ύψος φράγματος (m) | 83 | 160 | 96 | 26 | 135 |
| Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm ³) | 286 | 2800 | 90 | 10 | 225 |
| Ελάχιστη στάθμη λειτουργίας (m) | 776.0 | 227.0 | 142.0 | 67.0 | 731.0 |
| Μέγιστη στάθμη λειτουργίας (m) | 792.0 | 282.0 | 144.2 | 68.6 | 770.0 |
| Μέγιστο ύψος πτώσης (m) | 577.0 | 136.0 | 76.0 | 37.0 | 220.0 |
| Σταθμός παραγωγής | Εκτός λεκάνης | Κοντά στο φράγμα | Κοντά στο φράγμα | Υπόγειος | 7.5 km κατάντη |
| Τύπος στροβίλων | Pelton | Francis | Francis | Francis | Francis |
| Εγκατεστημένη ισχύς (MW) | 3×43=129 | 4×109=436 | 4×80=420 | 2×75=150 2×3=6 | 2×81=162 |
| Λοιπές χρήσεις νερού | Άρδευση, ύδρευση, αναψυχή | | Ύδρευση | Άρδευση, αναψυχή | |

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

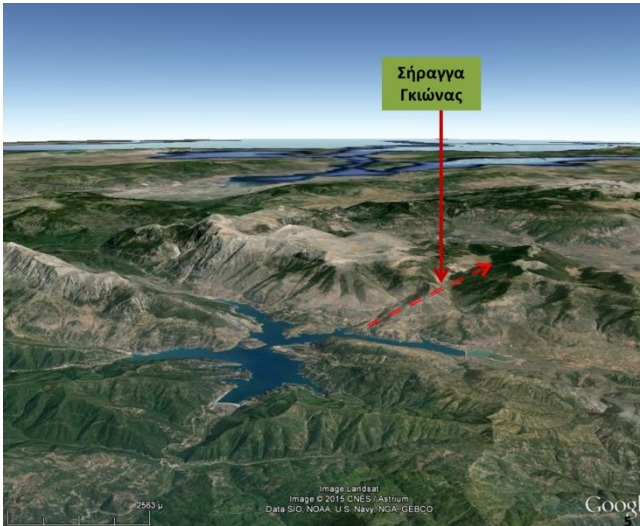
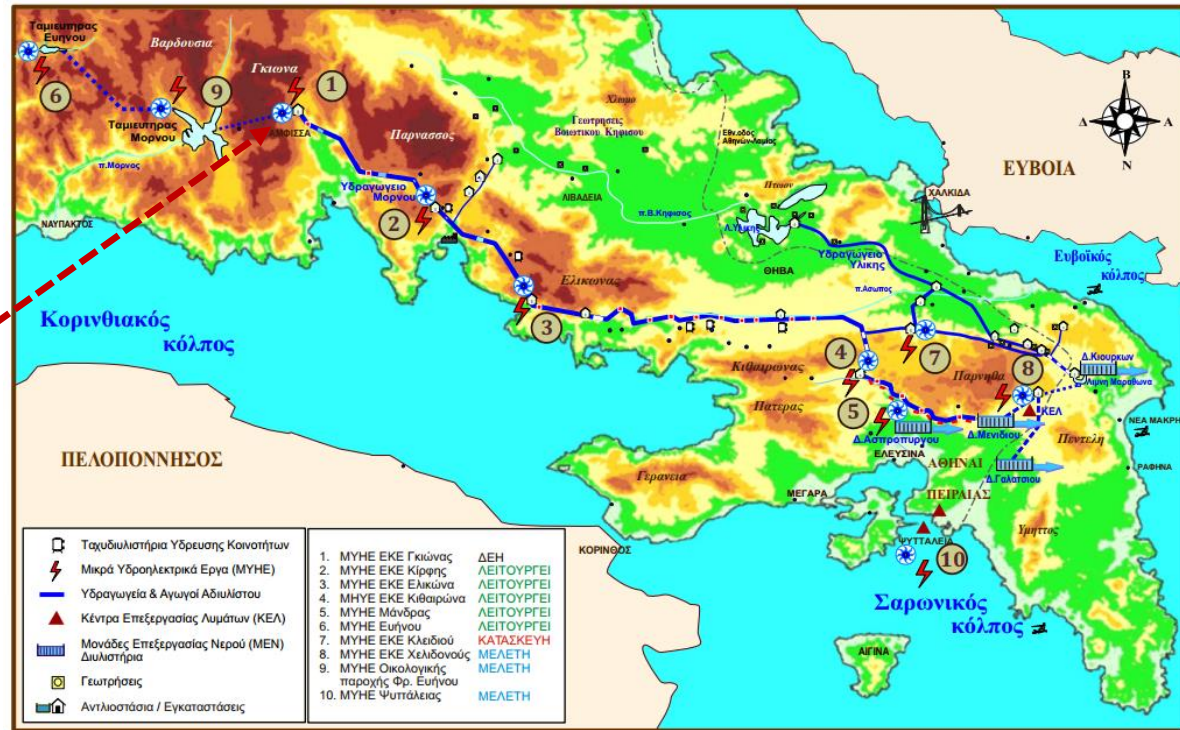


Παράδειγμα: ΜΥΗΕ Θεοδώριανων (ρ. Γκούρας, Άραχθος)



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)



Πλεονεκτήματα υδροηλεκτρικών έργων

Ως προς τα ενεργειακά χαρακτηριστικά:

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

**Μεγάλα ΥΗΕ
(ταμιευτήρες)**

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

Υδροηλεκτρικά έργα & περιβάλλον

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:

- ❑ Σημαντική διαφοροποίηση της φυσικής υδρολογικής διαίτας του ποταμού:
 - ❑ ποσοτική διαφοροποίηση, όταν γίνεται ολική ή μερική εκτροπή
 - ❑ εξομάλυνση ροής, εξάλειψη εποχικότητας, σημαντικά μειωμένη συχνότητα και μέγεθος πλημμυρικών ροών (αναρρύθμιση)
 - ❑ μη συνεχής ροή, εκροές τύπου παλμών (hydropeaking, ΥΗΕ αιχμής)
- ❑ Διακοπή συνέχειας ποταμού στο τμήμα μεταξύ του φράγματος και του ΥΗΣ:
 - ❑ αμελητέα, όταν ο σταθμός είναι κοντά στο φράγμα
 - ❑ σημαντική, όταν ο σταθμός είμαι μακριά (κυρίως σε μικρά ΥΗΕ)
- ❑ Συγκράτηση φερτών (μη αναστρέψιμη επίπτωση)
- ❑ Παρεμπόδιση κυκλοφορίας ψαριών
- ❑ Αλλαγή οικοσυστήματος από ποτάμιο σε λιμναίο
- ❑ Αισθητική όχληση σε περίπτωση έντονων διακυμάνσεων της στάθμης

Αντιμετώπιση προβλημάτων:

- ❑ Διατήρηση συνεχούς ροής (**περιβαλλοντική παροχή**) κατάντη του φράγματος ή του έργου υδροληψίας (για μικρά ΥΗΕ)
- ❑ Τεχνητές πλημμύρες
- ❑ Διατάξεις υποβοήθησης της διέλευσης των ψαριών (σε μικρά ΥΗΕ, πιλοτικά σε μεγάλα)