

Ενέργεια και Περιβάλλον

Υδροηλεκτρική ενέργεια



Νίκος Μαμάσης και Ανδρέας Ευστρατιάδης
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα 2025

Διάρθρωση παρουσίασης: *Υδροηλεκτρική ενέργεια*

- Εισαγωγή
- Χαρακτηριστικά υδροηλεκτρικών έργων
- Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα
- Μικρά Υδροηλεκτρικά έργα
- Συστήματα άντλησοταμίευσης-Υβριδικά
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Εισαγωγή

- ❑ 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).

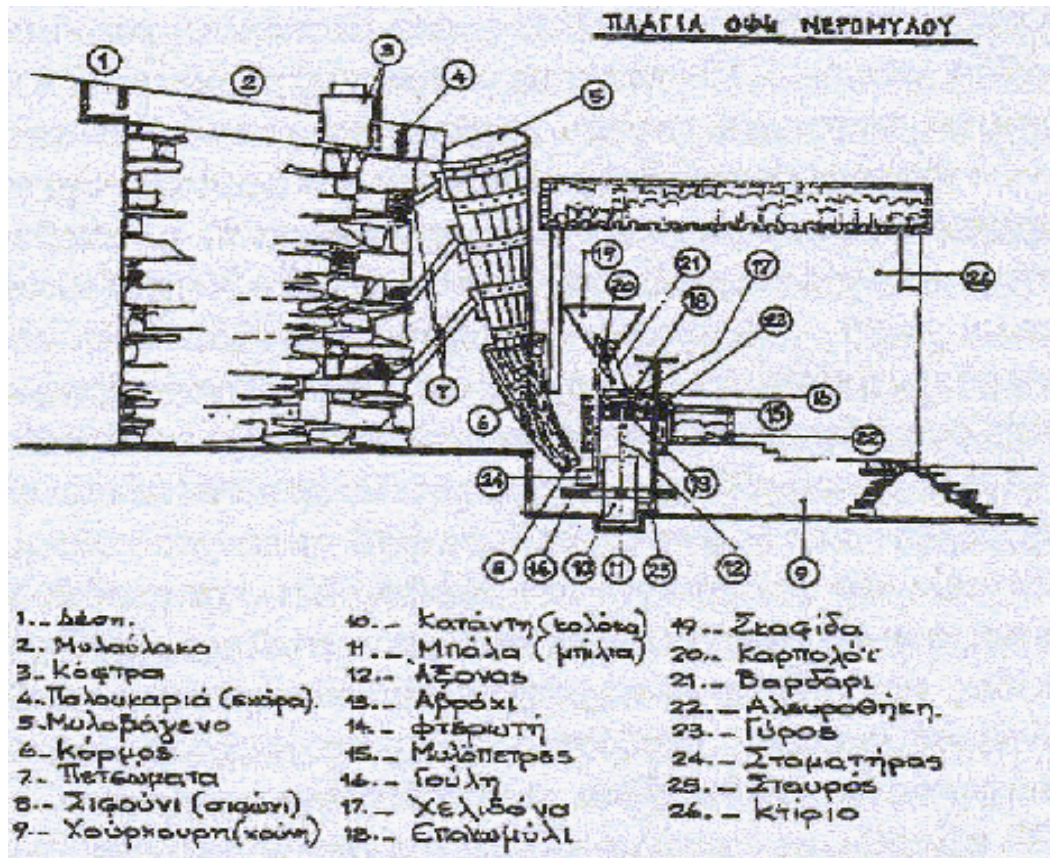


Υδρόμυλοι στην πόλη Hama της Συρίας (διασώζονται 17 από τους 30)
(Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Norias_of_Hama)



Εισαγωγή

Υδροτροχοί



<http://egaleo.freesevers.com/merh.htm>

Ανύψωση του νερού

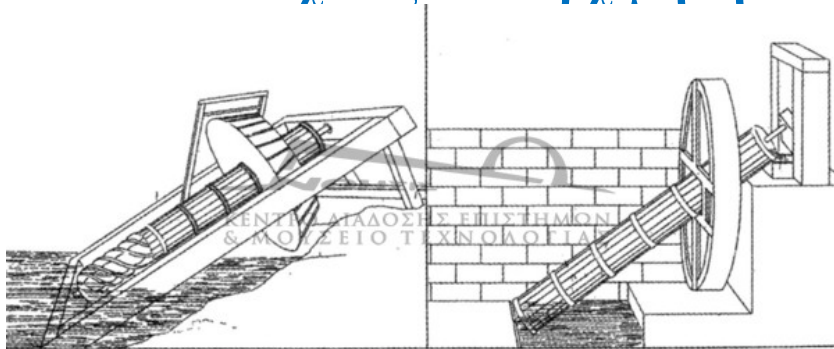
Shaduf (Κηλόνιο)

Αρχικά επινοήθηκαν μηχανισμοί όπου η ανύψωση γινόταν με παροχή ενέργειας από ανθρώπους ή ζώα

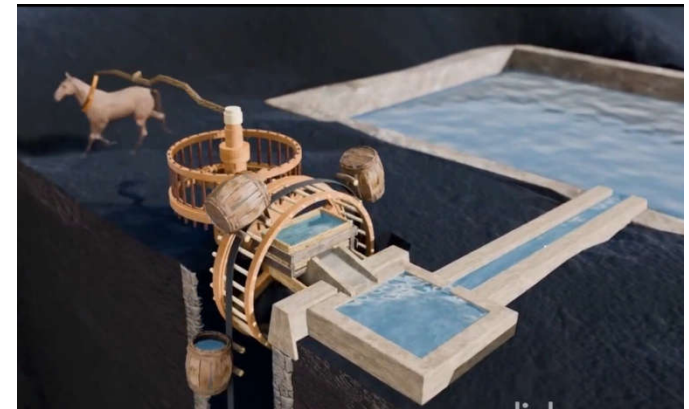
Εφευρέθηκε στη Μεσοποταμία την 4^η χιλιετία π.Χ. Ένας μέσος ρυθμός ανύψωσης είναι $2.5 \text{ m}^3/\text{d}$. Χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα σε πολλές περιοχές.



Κοχλίας του Αρχιμήδη

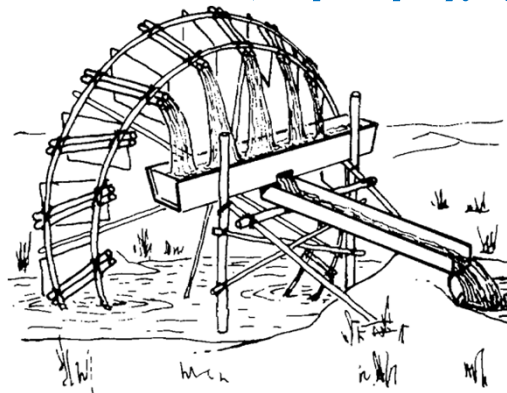


**Saqiya-
Ανύψωση
με
σύστημα
τροχών**



Στη συνέχεια επινοήθηκαν μηχανισμοί όπου η ανύψωση γινόταν με παροχή υδραυλικής ενέργειας

Η noria εφευρέθηκε από τους Ρωμαίους τον 4^ο αιώνα π.Χ.



Noria (υδροτροχός)



Ανύψωση του νερού

Saqiya στα Αραβικά σημαίνει «αυτό που δίνει νερό». Ονομάζεται και πέρσικος τρόχος. Εισήχθη στην Αίγυπτο από τους Πτολεμαίους τον 3^ο αιώνα π.Χ.

1. Περιστροφή του οριζόντιου τροχού με τη δύναμη των ζώων
2. Μετάδοση της περιστροφής στο κατακόρυφο τροχό
3. Στον κατακόρυφο τροχό υπάρχει αλυσίδα με δοχεία

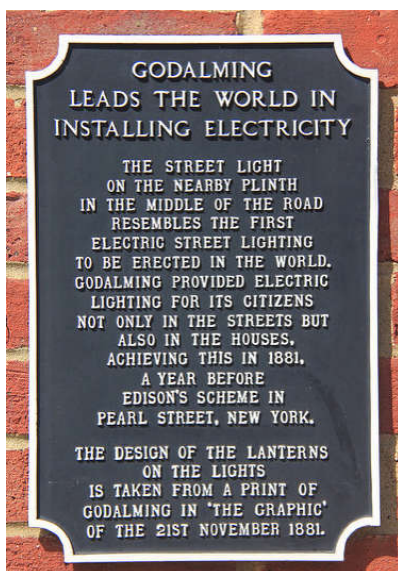
4. Τα δοχεία λόγω της περιστροφής του κατακόρυφου τροχού ανεβαινουν γεμάτα με νερο από το πηγάδι
5. Τα δοχεία αδειάζουν σε ανοιχτό αγωγό που βρίσκεται κάτω από τον κατακόρυφο τροχό
6. Το νερό μεταφέρει με βαρύτητα στην καλλιέργεια



Ιστορικό της υδροηλεκτρικής ενέργειας

Το πρώτο δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο έγινε το Σεπτέμβριο του 1881 στο Godalming, Surrey, U.K.

Τροφοδοτούσε 10 νοικοκυριά και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν από υδροτροχό στον ποταμό Wey



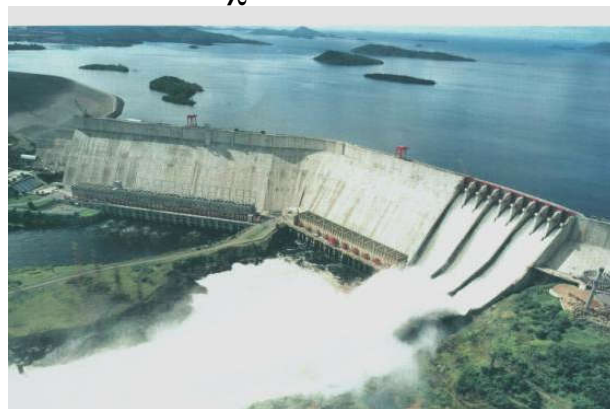
Η υδροηλεκτρική ενέργεια αναπτύχθηκε σημαντικά δεδομένων των πλεονεκτημάτων που έχει σε σχέση με τις άλλες μορφές ηλεκτροπαραγωγής

- Γρήγορη παραλαβή και απόρριψη φορτίου και κάλυψη των αιχμών της ζήτησης
- Νερό και για άλλες χρήσεις (άρδευση, ύδρευση, αντιπλημμυρική προστασία, αναψυχή)
- Ανανεώσιμη πηγή με δυνατότητα αποθήκευσης χωρίς υποβάθμιση του φυσικού πόρου
- Δυνατότητα αποθήκευσης άλλων μορφών ενέργειας

Το πρώτο υδροηλεκτρικό έργο στον κόσμο (Vulcan Street) λειτούργησε το **1882** στο Appleton, Wisconsin των ΗΠΑ, με εγκατεστημένη ισχύ **12.5 kW**



Σχεδόν 100 έτη αργότερα (**1986**) λειτούργησε το έργο Guri (Simón Bolívar) στη Βενεζουέλα με εγκατεστημένη ισχύ **10.2 GW**



Το **2011** λειτούργησε το μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό έργο στον κόσμο, στη θέση Three Gorges της Κίνας με εγκατεστημένη ισχύ **22.5 GW**

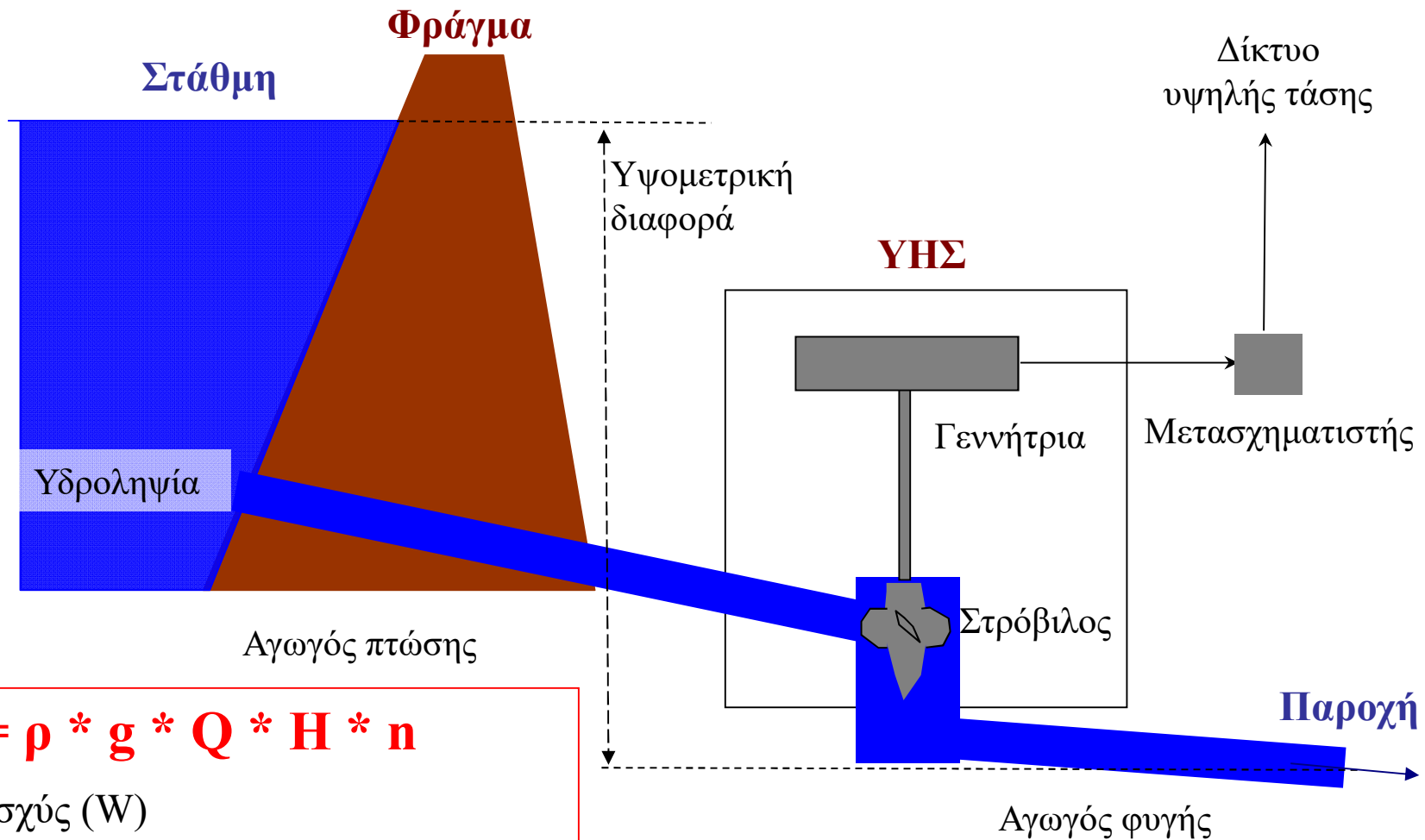


Τα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα του κόσμου



Χαρακτηριστικά υδροηλεκτρικών έργων

Συνιστώσες υδροηλεκτρικού σταθμού (ΥΗΣ)



$$I = \rho * g * Q * H * n$$

I: ισχύς (W)

ρ: πυκνότητα νερού 1000 kg/m³

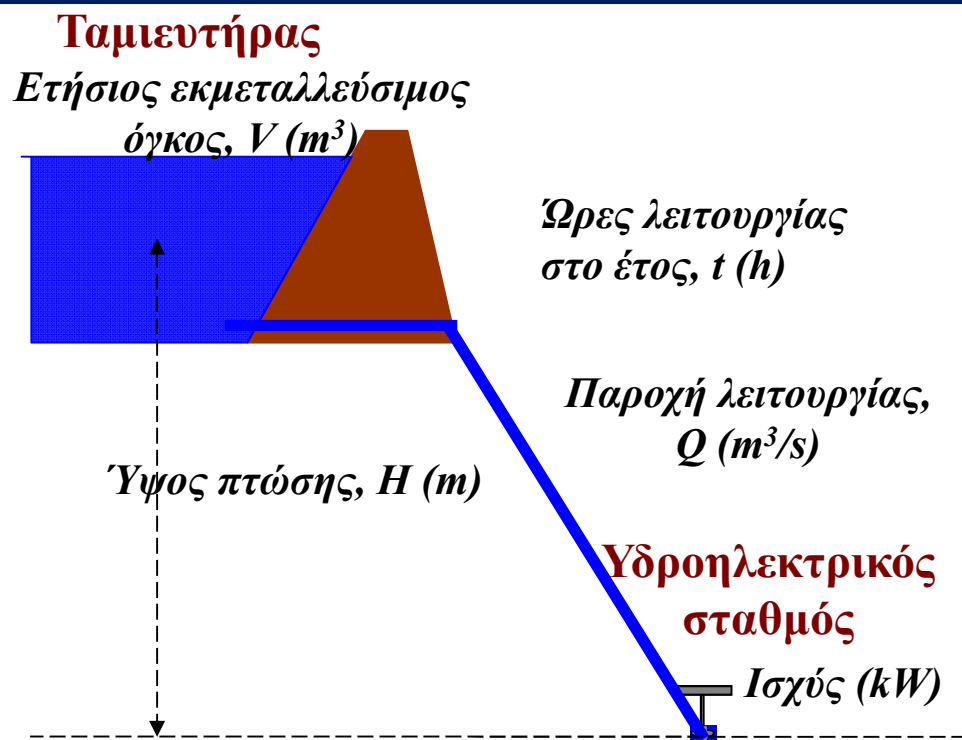
g: επιτάχυνση βαρύτητας 9.81 m/s²

Q: παροχή m³/s

H: υψομετρική διαφορά m

n: συνολικός βαθμός απόδοσης 85 %

$$I \text{ (kW)} = 9.81 * Q \text{ (m}^3\text{/s)} * H \text{ (m)} * n$$



Μέση ετήσια παροχή λειτουργίας

$$Q (m^3/h) = V(m^3)/t(h)$$

$$Q (m^3/h) = Q(m^3/s) * 3600$$

$$Q (m^3/s) * t(h) = V(m^3)/3600$$

Υπολογισμός ετήσιας ενέργειας

$$E (kWh) = g * n * H (m) * Q (m^3/s) * t(h)$$

$$E (kWh) = \frac{g * n * H (m) * V(m^3)}{3600}$$

$$E (kWh) \approx \frac{n * H (m) * V(m^3)}{367}$$

Ισχύς (I) και Ενέργεια (E)

$$I = \rho * g * n * H * Q$$

I: ισχύς (W)

ρ : πυκνότητα νερού 1000 kg/m^3

g: επιτάχυνση βαρύτητας 9.81 m/s^2

n: συνολικός βαθμός απόδοσης %

$$I (kW) = g * n * H (m) * Q (m^3/s)$$

$$E (kWh) = I (kW) * t (hr)$$

Παράδειγμα (με βάση τα δεδομένα ΥΗΣ Πλαστήρα)

Ετήσιος διατιθέμενος όγκος : **150 hm³**

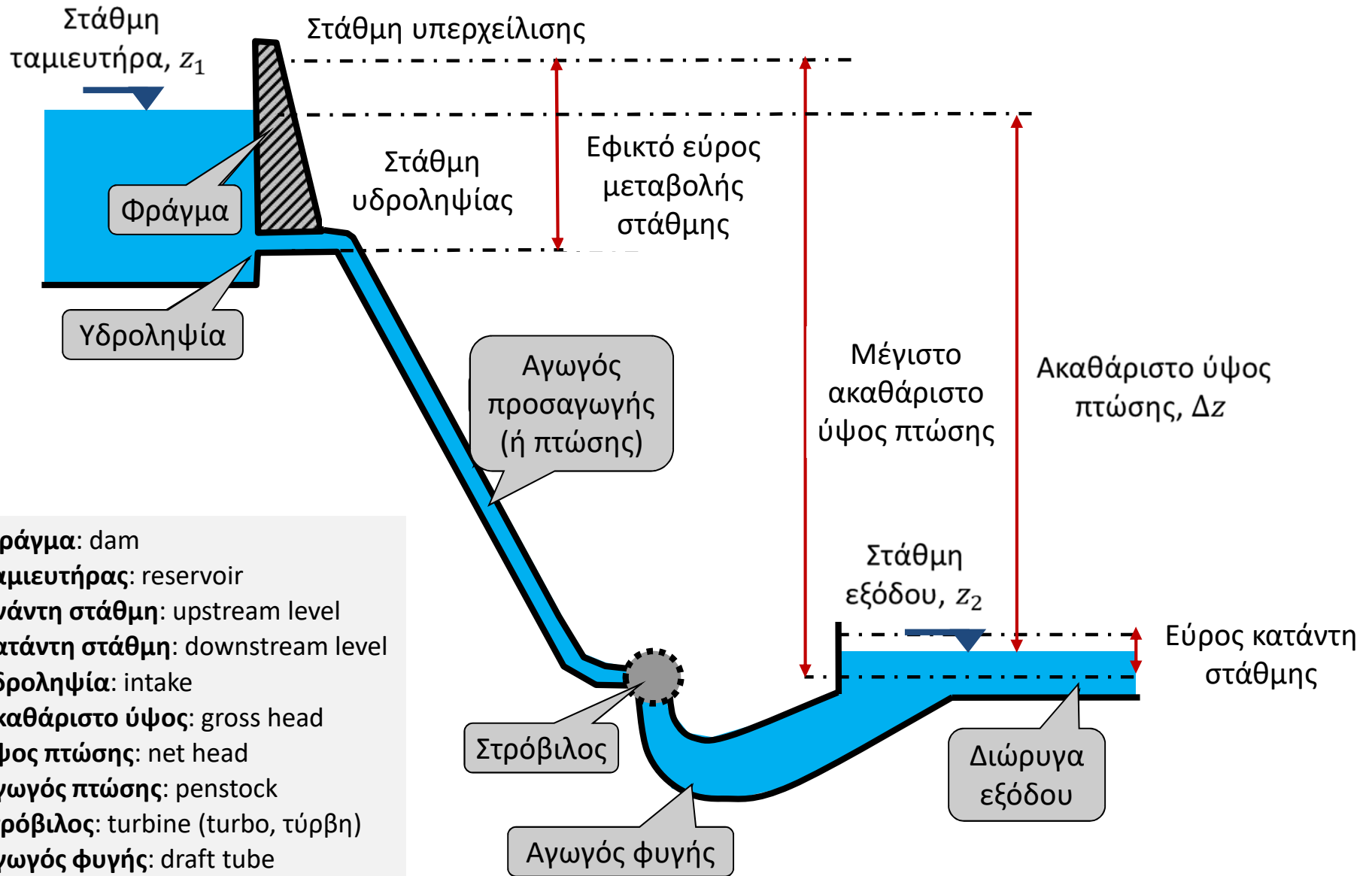
Ύψος πτώσης: **580 m**

Συνολικός βαθμός απόδοσης: **0.85**

Δυνητική ετήσια ενέργεια: **201.5 GWh**

Ώρες λειτουργίας	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας	Παροχή λειτουργίας (m^3/s)	Απαιτούμενη εγκατεστημένη Ισχύς (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

Σχηματική διάταξη και 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

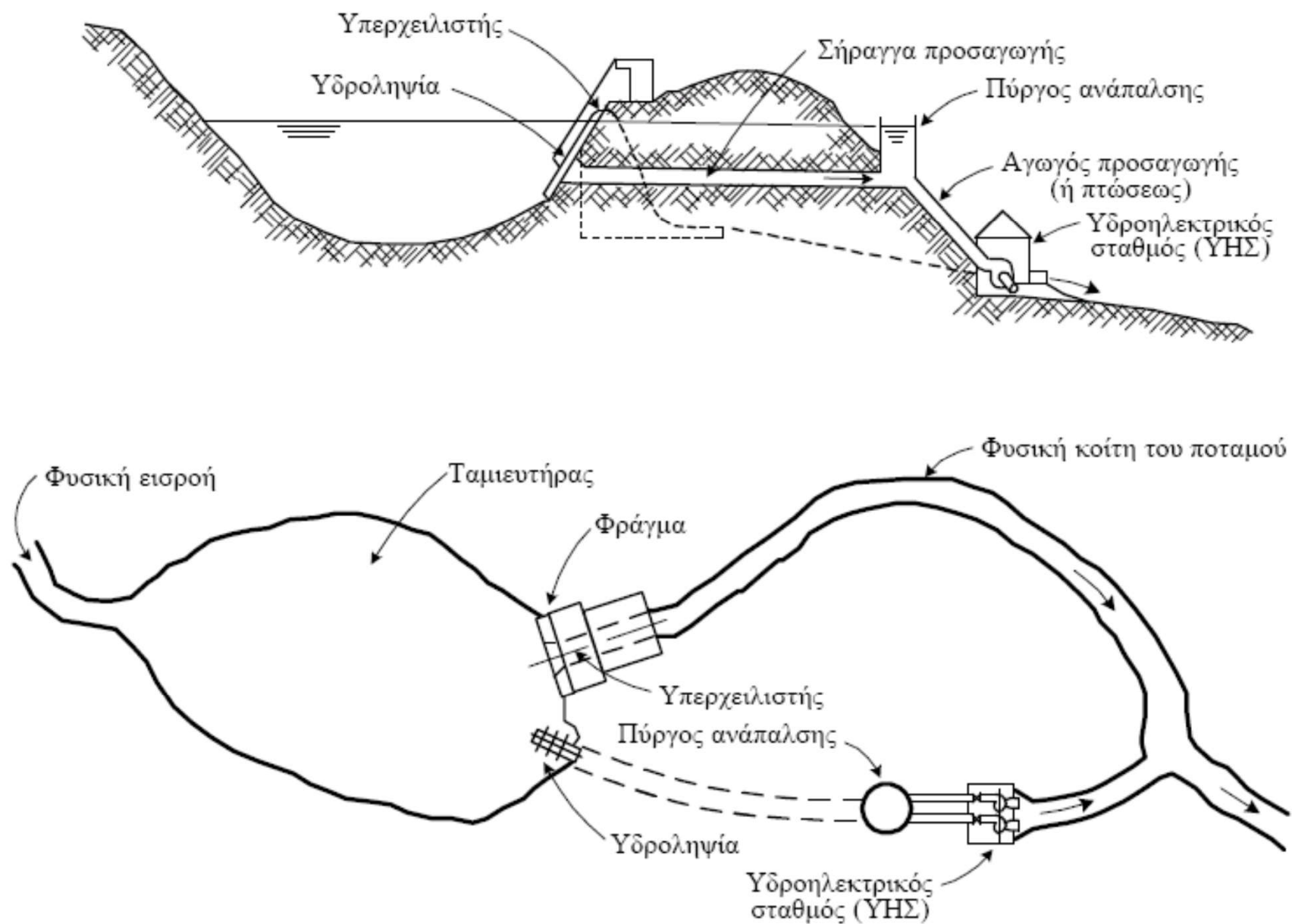
Στρόβιλος: turbine (turbo, τύρβη)

Αγωγός φυγής: draft tube

Διώρυγα εξόδου: tailrace

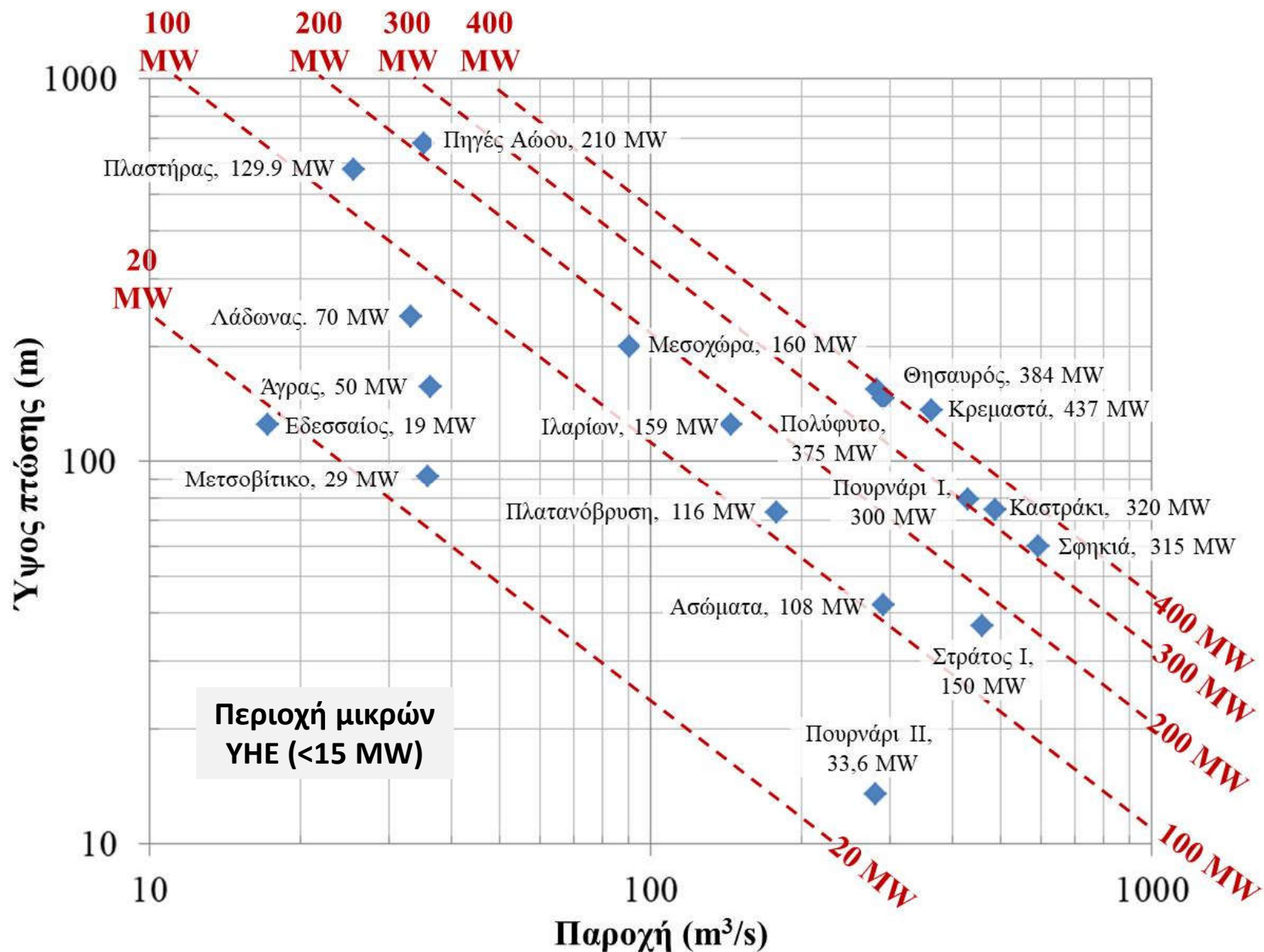
Χαρακτηριστικά υδροηλεκτρικών έργων

Σχηματική Διάταξη Συστήματος Παραγωγής

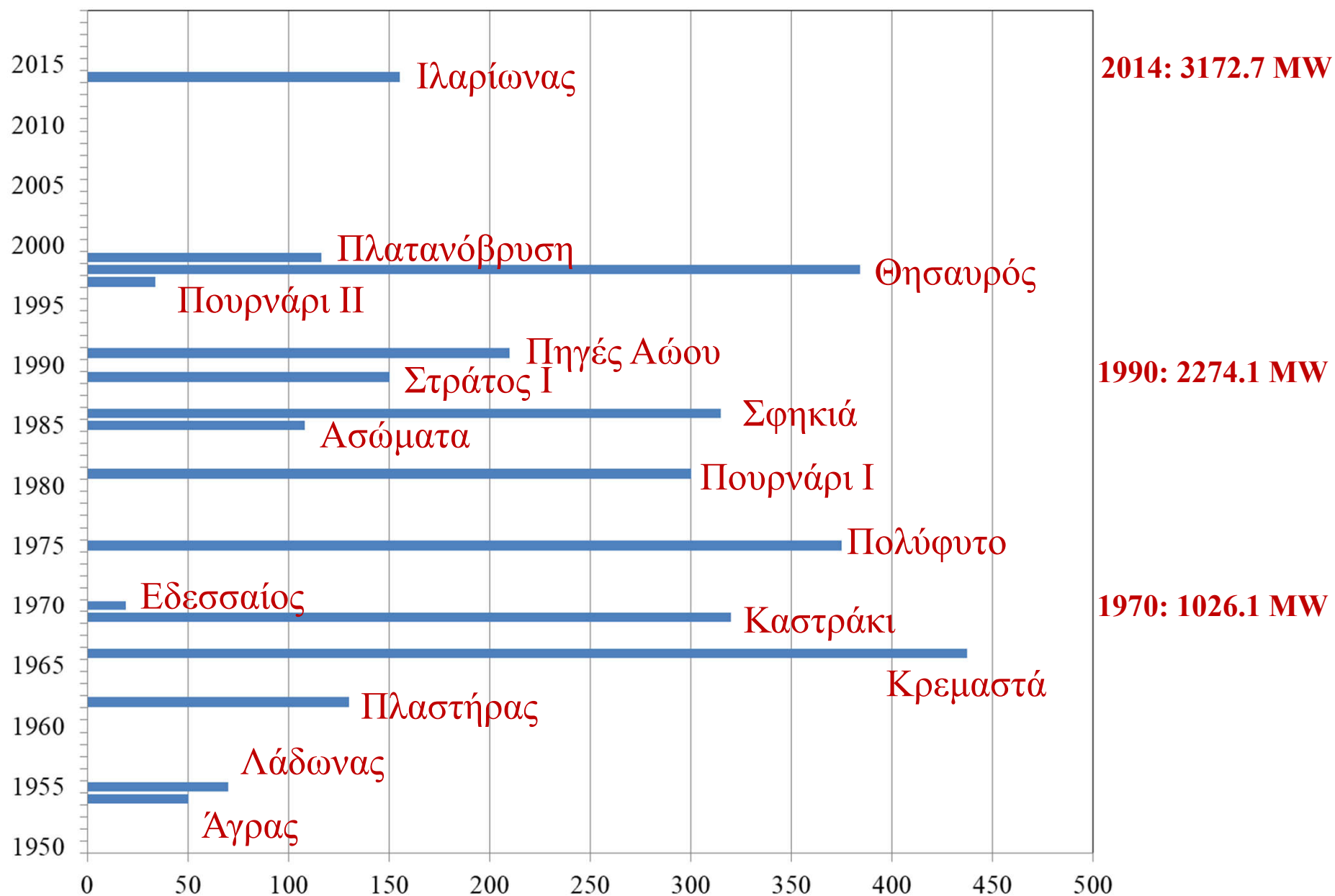


Χαρακτηριστικά υδροηλεκτρικών έργων

Σχέση Ισχύος-Παροχής-Ύψους πτώσης



Χρονική εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος (MW) μεγάλων ΥΗΣ



Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα

Η υδροηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα

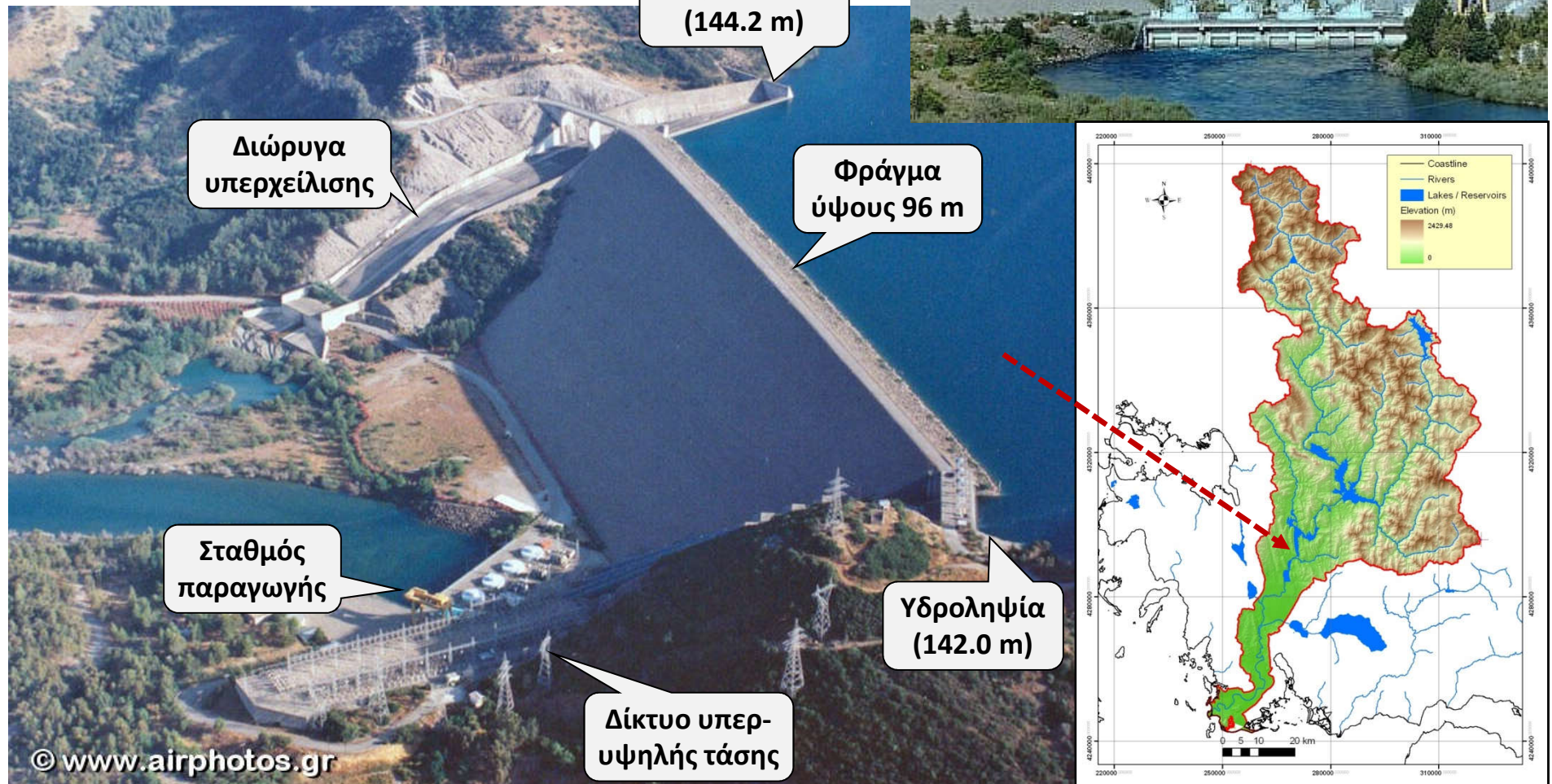
Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ



- Στη δυτική και βόρεια Ελλάδα υπάρχει ιδιαίτερα πλούσιο δυναμικό υδατοπτώσεων λόγω της διαμόρφωσης λεκανών απορροής και των σημαντικών βροχοπτώσεων
- Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 3.060 MW
- Η Μέση Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας είναι 4.000-5.000 GWh
- Η μέση συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 8-10%
- Η ενέργεια που προέρχεται από ΥΗΣ καλύπτει ηλεκτρικά φορτία αιχμής.
- Τα τρία μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα είναι στα Κρεμαστά (437 MW), στο Θησαυρό (384 MW) και στο Πολύφυτο (375 MW)
- Υπάρχει μεγάλη δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης υδροηλεκτρικών σταθμών.

Χαρακτηριστικά υδροηλεκτρικών έργων (Καστράκι-Αχελώος)

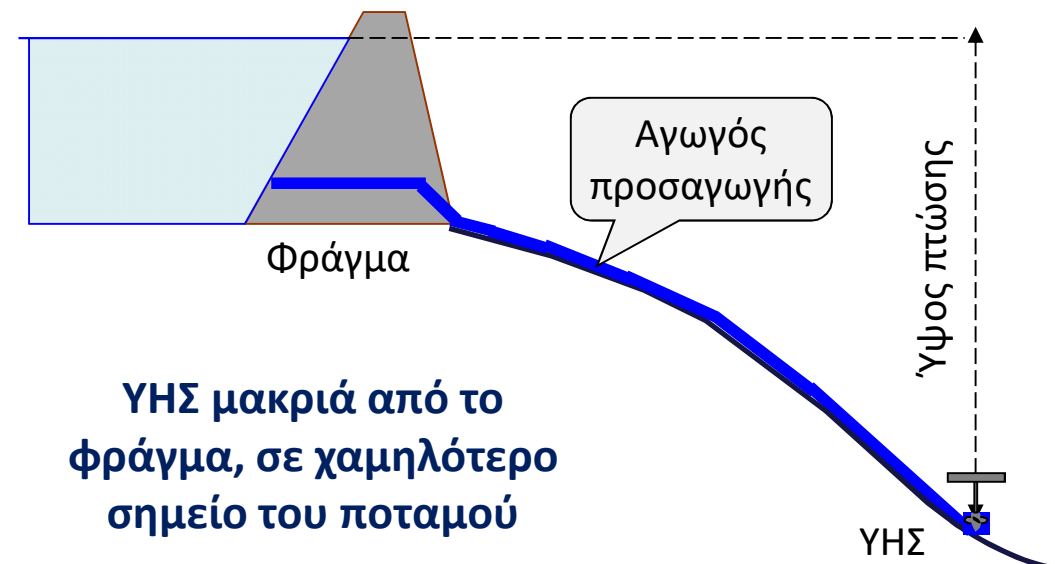
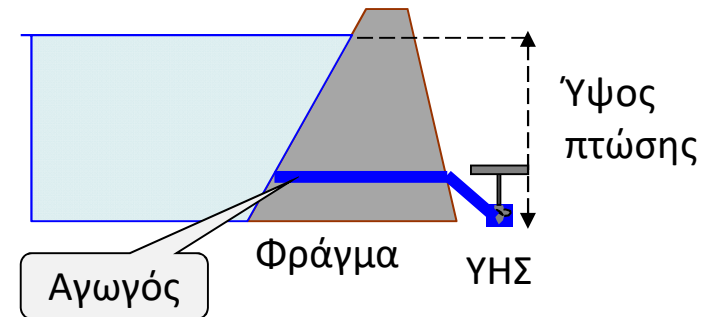
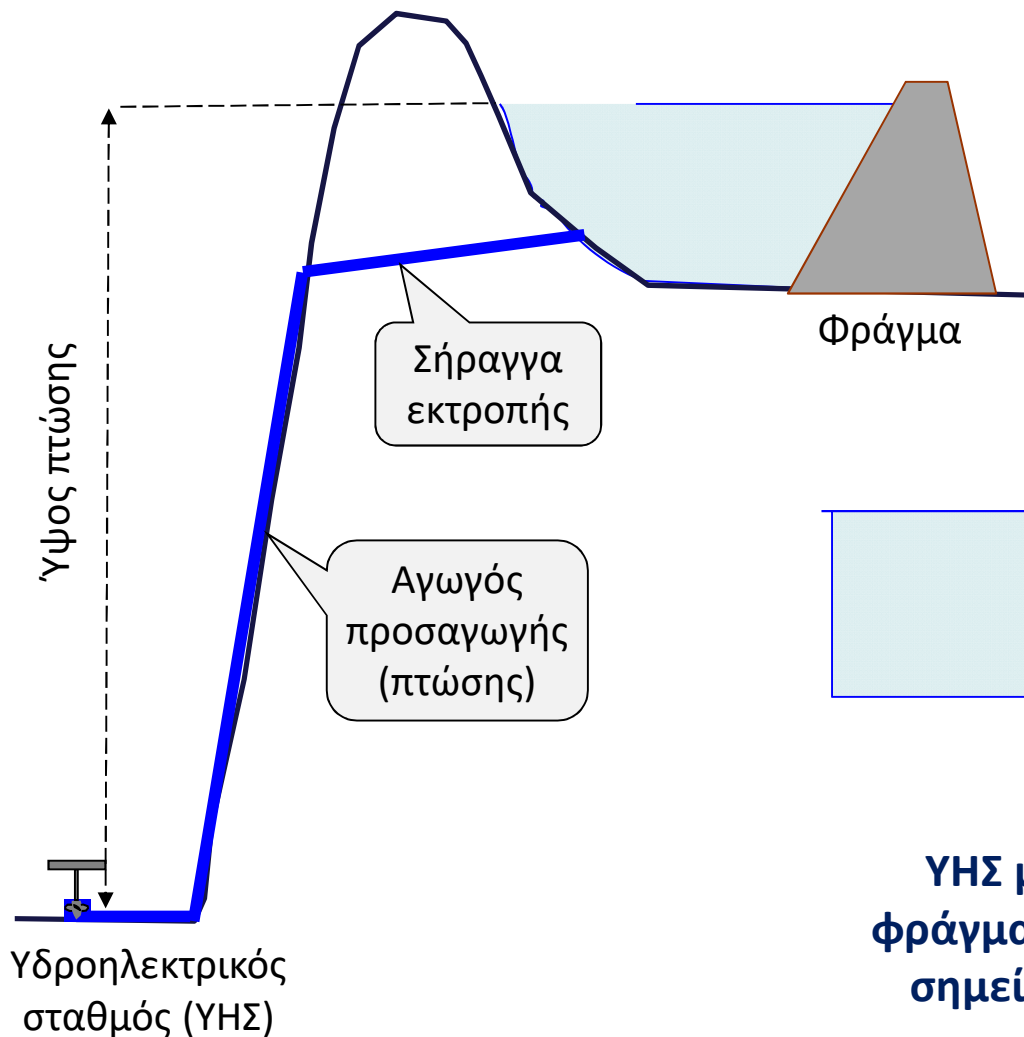
- ❑ Ταμιευτήρας χωρητικότητας 950 hm³
- ❑ Υδροληψία +142.0 m, υπερχειλίση +144.2 m → ωφέλιμος όγκος 50 hm³ (+50 hm³, θυροφράγματα)
- ❑ Ισχύς 4×80 = 320 MW (Francis)



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)



Χαρακτηριστικά υδροηλεκτρικών έργων

Παραδείγματα φραγμάτων



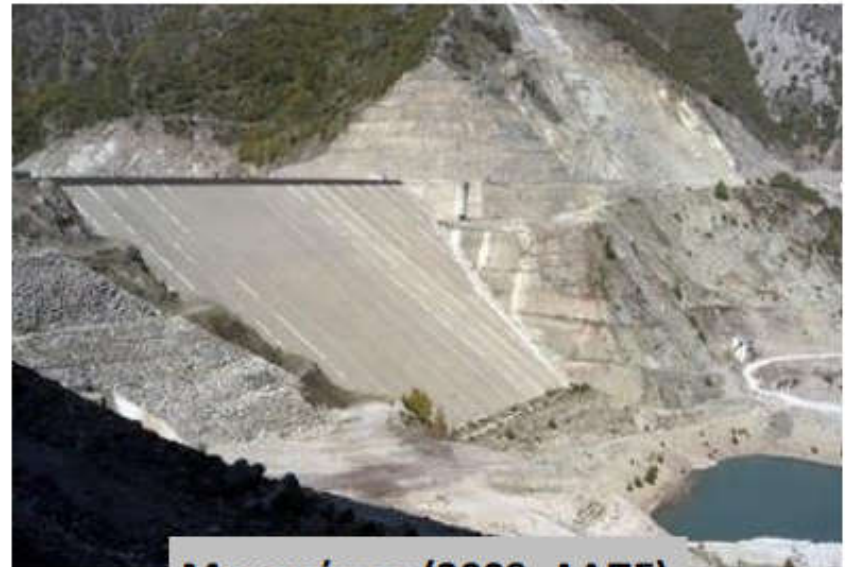
Λάδωνα (1955, αντιρρηδωτό)



Ταυρωπού (1959, τοξωτό)



Κρεμαστών (1965, χωμάτινο)



Μεσοχώρας (2009, ΛΑΠΣ)

Υδροστρόβιλοι

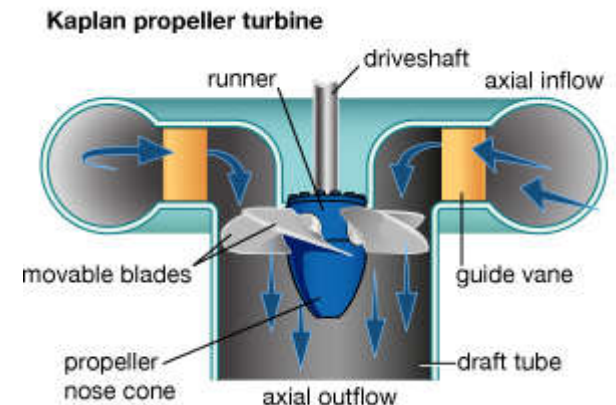
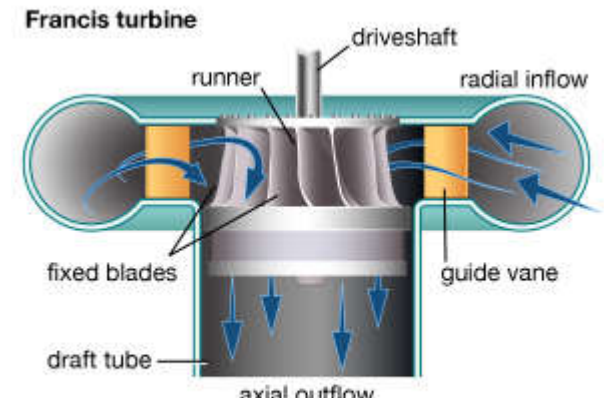
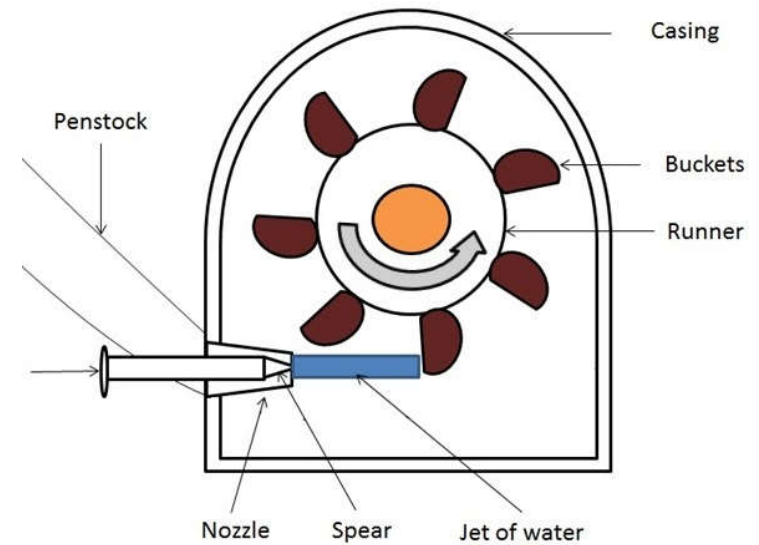
- ❑ **Σκοπός:** Μετατροπή υδραυλικής ενέργειας σε περιστροφική κινητική ενέργεια ενός **άξονα**, οριζόντιου ή κατακόρυφου.
- ❑ Διακρίνονται σε **στροβίλους δράσης** (εκροή στην ατμόσφαιρα, αξιοποιείται η κινητική ενέργεια του νερού) και **στροβίλους αντίδρασης** (ροή υπό πίεση)

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

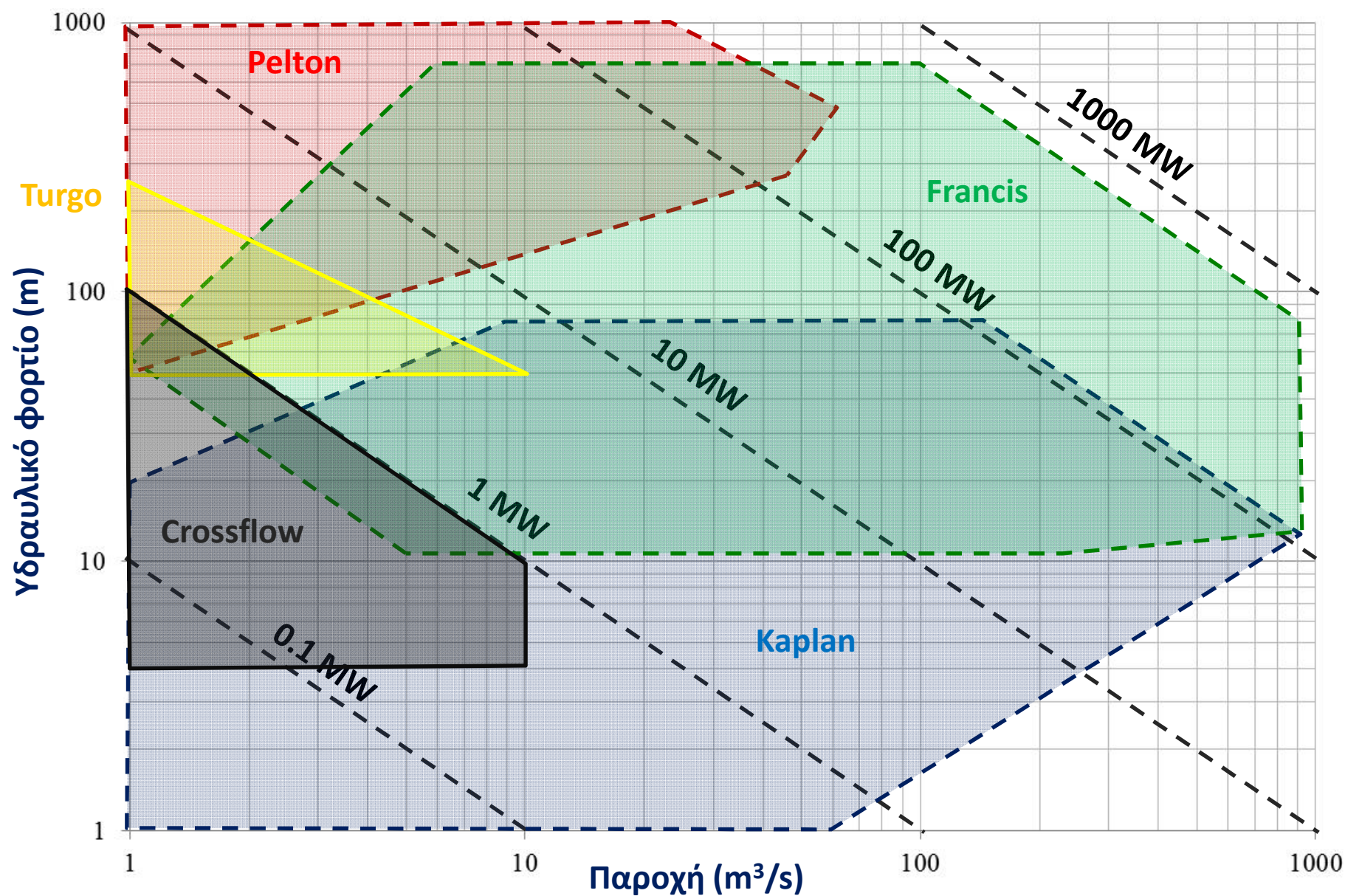
- ❑ **Francis:** Τυπικός τύπος στροβίλων για μεγάλα Υ/Η έργα. Κατάλληλοι για μέτρια ύψη πτώσης (60 ως 150 m) και αρκετά μεγάλο εύρος παροχών.
- ❑ **Kaplan:** Ενδείκνυνται για μικρά ύψη πτώσης και μεγάλες παροχές. Κατάλληλοι για χαμηλά φράγματα σε μεγάλα ποτάμια και για ΜΥΗΕ σε υδραγωγεία.



Υδροστρόβιλοι

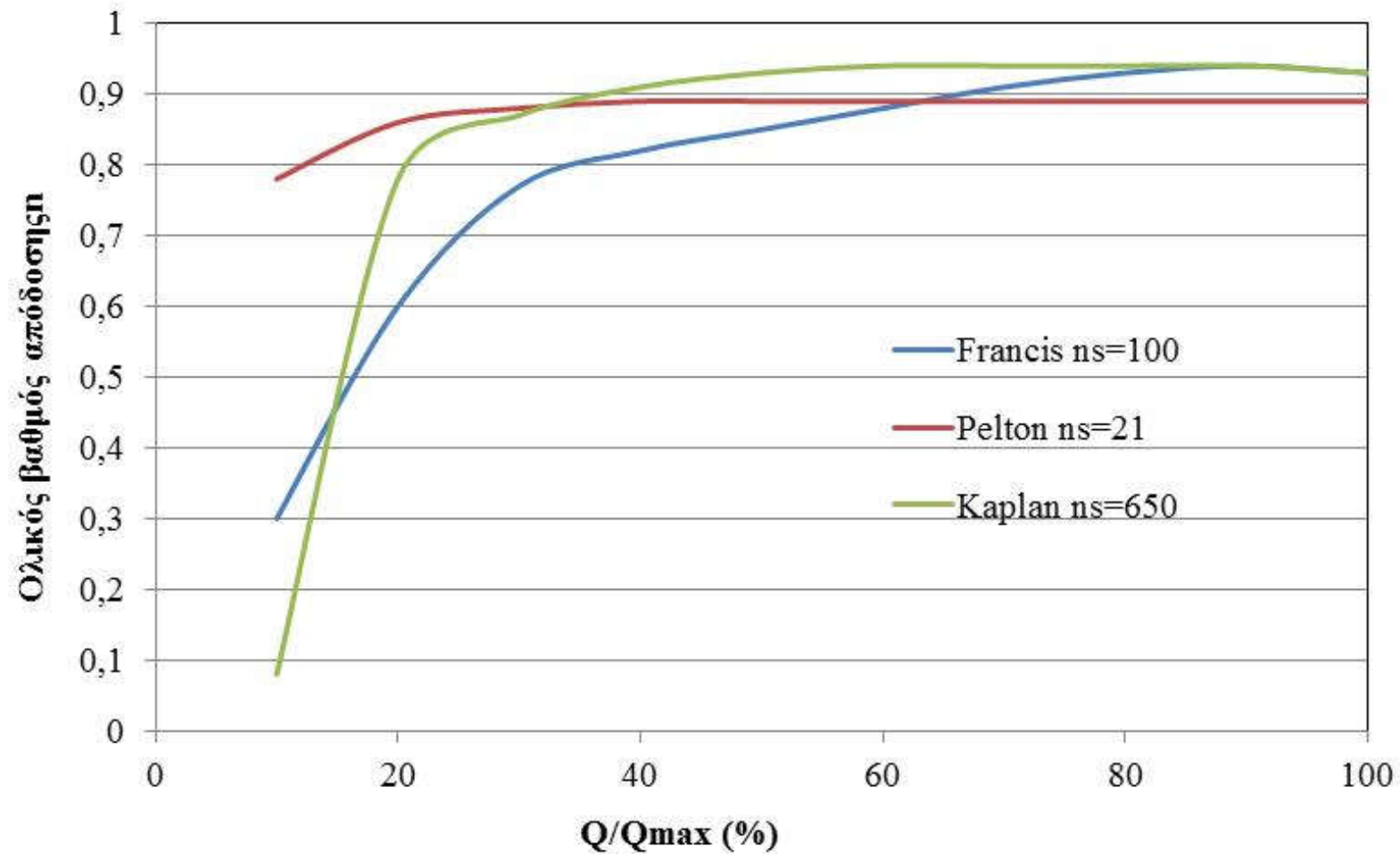


Εύρος εφαρμογής διαφορετικών τύπων στροβίλων



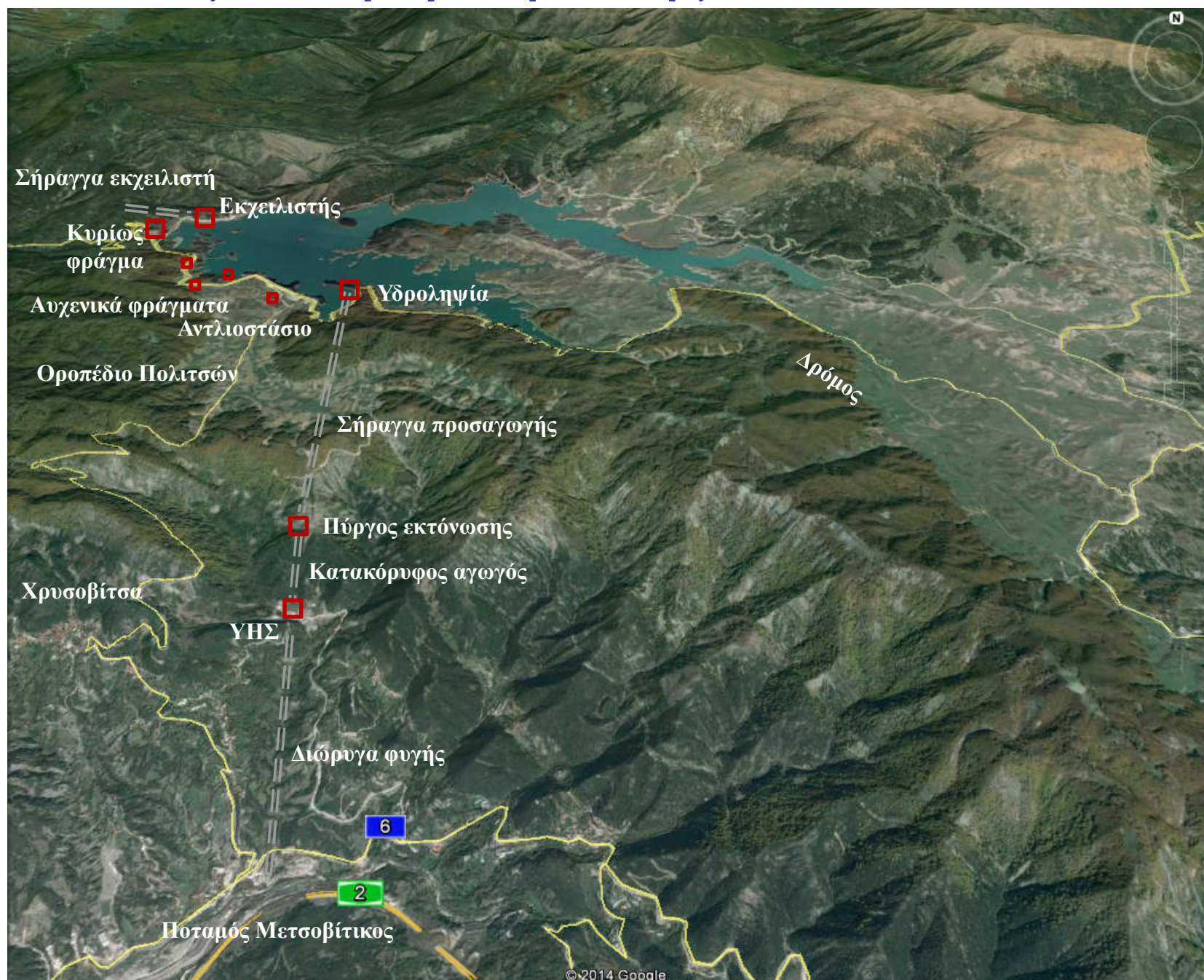
Μεγάλα και Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα

Καμπύλες στροβίλων



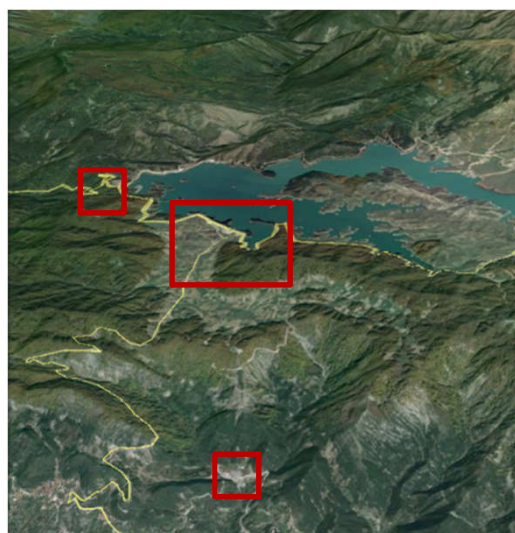
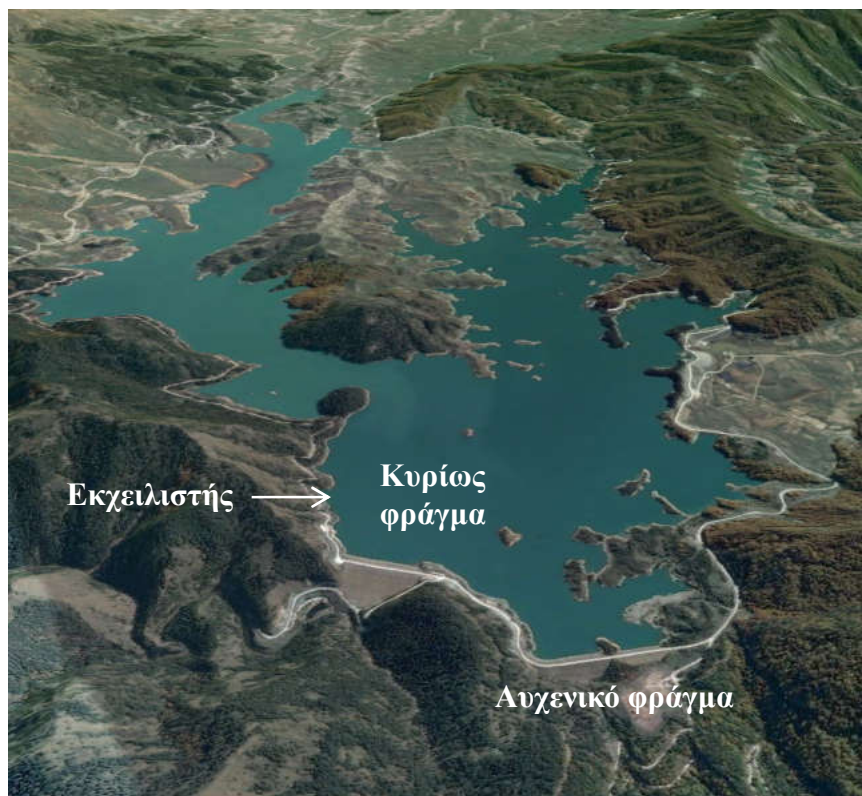
Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα

Υδροσύστημα Αώου



Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα

Συνιστώσες υδροσυστήματος Αώου



Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα

ΥΗΕ Πηγών Αώου (με εκτροπή των νερών από τον Αώο στον Άραχθο)

ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ

Κύριο φράγμα

Όγκος: 3.200.000 m³
Υψόμετρο στέψης: 1.349 m
Μήκος στέψης: 300 m
Πλάτος στέψης: 10 m
Ύψος πάνω από τη θεμελίωση: 77 m

Αυχενικά φράγματα

Όγκος: 900.000 m³
Υψόμετρο στέψης: 1.349 m
Μήκος στέψης: 130 m έως 280 m
Πλάτος στέψης: 10 m
Ύψος πάνω από τη θεμελίωση: 12 m έως 30 m

Βοηθητικό φράγμα Πολιτσών

Όγκος: 500.000 m³
Υψόμετρο στέψης: 1.349 m
Μήκος στέψης: 235 m
Πλάτος στέψης: 10 m
Ύψος πάνω από την θεμελίωση: 40 m

Εκχειλιστής

Θέση: Δεξιό αντέρεισμα του κύριου φράγματος
Τύπος: Κεκλιμένη σήραγγα διαμέτρου 4m και μήκους 60 m που ενώνεται με το κατάντη τμήμα του πώματος της σήραγγας εκτροπής.
Τεχνικά εισόδου: άνω τοξωτά θυροφραγματα 8,5m x 3,8m
Υψόμετρο στέψης: 1.303, 60 m
Παροχή: 160 m³/sec

Εκκενωτής

Θέση: Δεξιό αντέρεισμα του κυρίως φράγματος
Τύπος: Μεταλλικός αγωγός, διαμέτρου 2,5 m, σκυροδετημένος και εγκυβωτισμένος στο σώμα του φράγματος
Υψόμετρο πυθμένα εισόδου: 1.305 m
Υψόμετρο πυθμένα εξόδου: 1.275,5 m
Παροχή: 80 m³/sec
Ρύθμιση Λειτουργίας: Ένα θυρόφραγμα υψηλής πίεσης και μια βαλβίδα διασποράς στο έργο εξόδου.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Υδροληψία

Τύπος: Κατακόρυφη με σχάρες
Μέσα εμφράξεως: ασκοί εμφράξεως
Υψόμετρο πυθμένα: 1.306, 5 m

Φρέαρ θυροφράγματος

Θέση: 100 m κατάντη της υδροληψίας
Διάμετρος (εσωτ): 3,5 με 5,40 m
Ύψος: 40 m
Μέσα εμφράξης: θυρόφραγμα και ασκοί εμφράξης

Αγωγός Προσαγωγής

Σήραγγα Προσαγωγής

Διάμετρος εσωτ: 3,5 m
Μήκος: 2.990 m
Επένδυση: Σκυρόδεμα μέχρι τον πύργο ανάπασης (εκτόνωσης)
Παροχή: 44,5 m³/sec

Άνω βαλβίδα

Διάμετρος: 3m
Τύπος: Πεταλούδα

Πύργος Εκτόνωσης

Διάμετρος εσωτ: 7 m
Ύψος: 90 m
Επένδυση: Σκυρόδεμα

Κεκλιμένος αγωγός

Διάμετρος εσωτ: 3 m
Μήκος: 650 m
Επένδυση: Μεταλλική επένδυση σκυροδετημένη περιφερειακά

Κατακόρυφος αγωγός

Θέση: 1.700 m ΒΑ της Χρυσοβίτσας
Διάμετρος εσωτ: 2,8 m
Ύψος: 440 m
Επένδυση: Μεταλλική επένδυση σκυροδετημένη περιφερειακά

Σταθμός Παραγωγής

Σταθμός Παραγωγής

Θέση: 1.700 m ΒΑ Χρυσοβίτσας
Τύπος: Υπόγειος
Αριθμός μονάδων: 2

Στρόβιλοι

Τύπος: PELTON κατακόρυφου τύπου μιας ταχύτητας
Ονομαστική ισχύς: 120 MW
Εγκαταστημένη ισχύς: 105 MW
Αριθμός στροφών: 428 στρ/μίν
Ύψος πτώσης: 685 m

Γεννήτριες

Τύπου κατακόρυφου άξονα
Ονομαστική Ισχύς: 122 MW &
συντελεστής ισχύος 0,9
Τάση - Συχνότητα: 15,75 KV - 50 Hz

Μετασχηματιστές

Δύο τριφασικοί
Ονομαστική ισχύς: 122 MW
Τάσεις (υψηλή - χαμηλή): 161/17, 5 KW
Συχνότητα: 50 Hz

Υποσταθμός 150/20 KV

Θέση: Τοποθετημένος σε επίχωμα περίπου 200 m από την είσοδο της σήραγγας προσπέλασης
Εισερχόμενες γραμμές: 2 των 150 KV
Εξερχόμενες γραμμές: 3 των 50 KV

Σήραγγα φυγής

Θέση: Ανατολικά της Χρυσοβίτσας, με έργα εξόδου στην κοίτη του ποταμού Μετσοβίτικου
Διάμετρος (εσωτ) πεταλοειδούς διατομής: 4,7 m
Μήκος μέχρι το έργο εξόδου: 2.900m
Παροχή: 46,5 m³/sec

Ορισμός-Κατηγορίες Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων (ΜΥΗΕ)

Σύμφωνα με την Ελληνική Νομοθεσία Μικρό είναι ένα Υδροηλεκτρικό Έργο εγκατεστημένης ισχύος μέχρι 15 MWp. Ένας τυπικός Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός (ΜΥΗΣ), εκμεταλλεύεται τη δυναμική ενέργεια του νερού με μετατροπή της αρχικά σε κινητική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Η εγκατάσταση ενός ΜΥΗΣ, αξιοποιεί την υψομετρική διαφορά της φυσικής πτώσης των νερών και μέσω ενός υπό πίεση υδραυλικού συστήματος, διοχετεύει το νερό σε ένα στρόβιλο. Ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο, συνήθως διαθέτει απλά μία ορεινή υδροληψία, ή και ένα μικρό ταμιευτήρα, για περιορισμένη ρύθμιση της ροής.

Ως προς την ονομαστική ισχύ

- micro (< 0.1 MW)
- mini (0.1-1 MW)
- μικρό (1-10 MW)

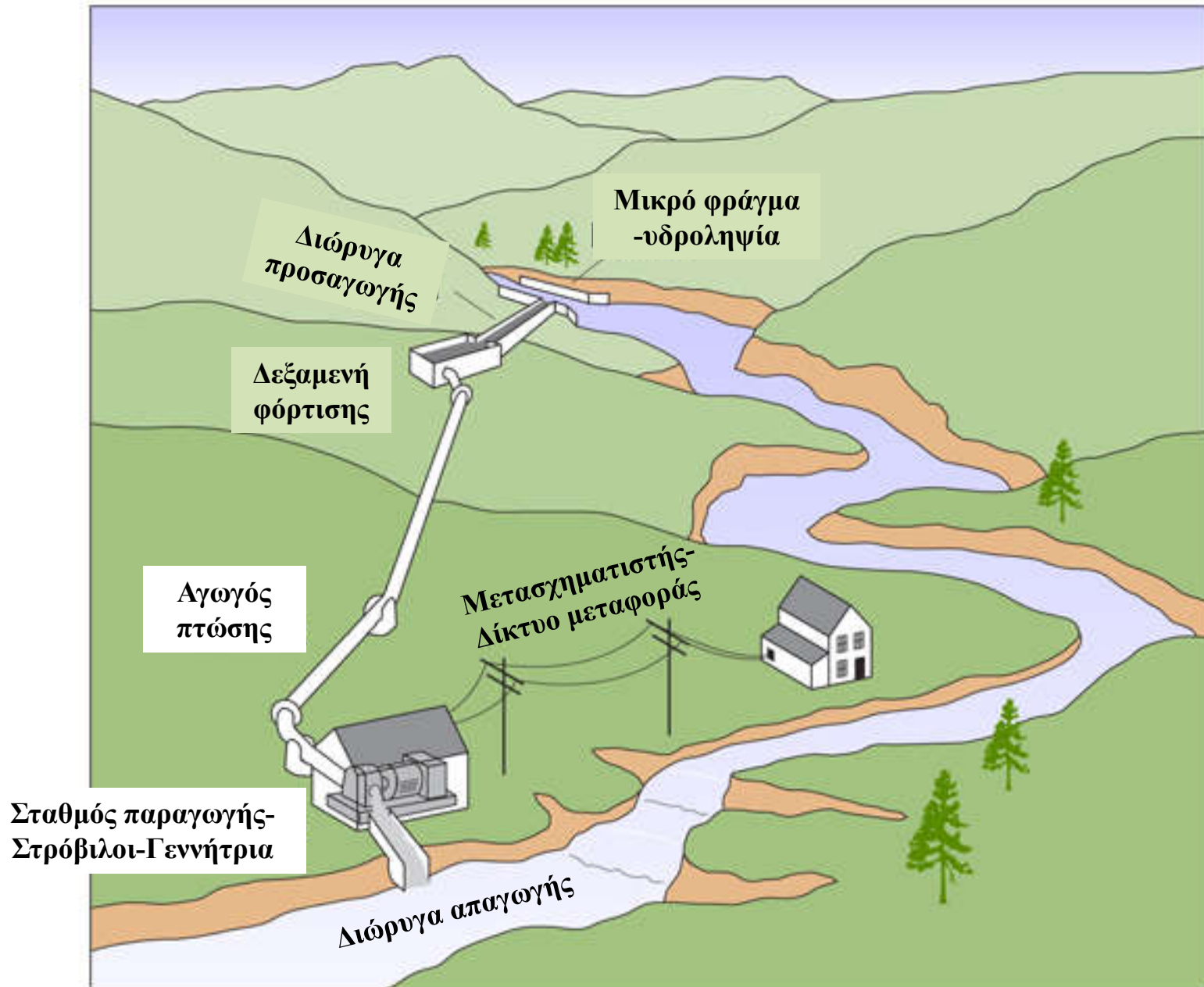
Ως προς το ύψος πτώσης

- μικρού ύψους (< 20 m)
- μέσου ύψους (20 - 150 m)
- μεγάλου ύψους (> 150 m)

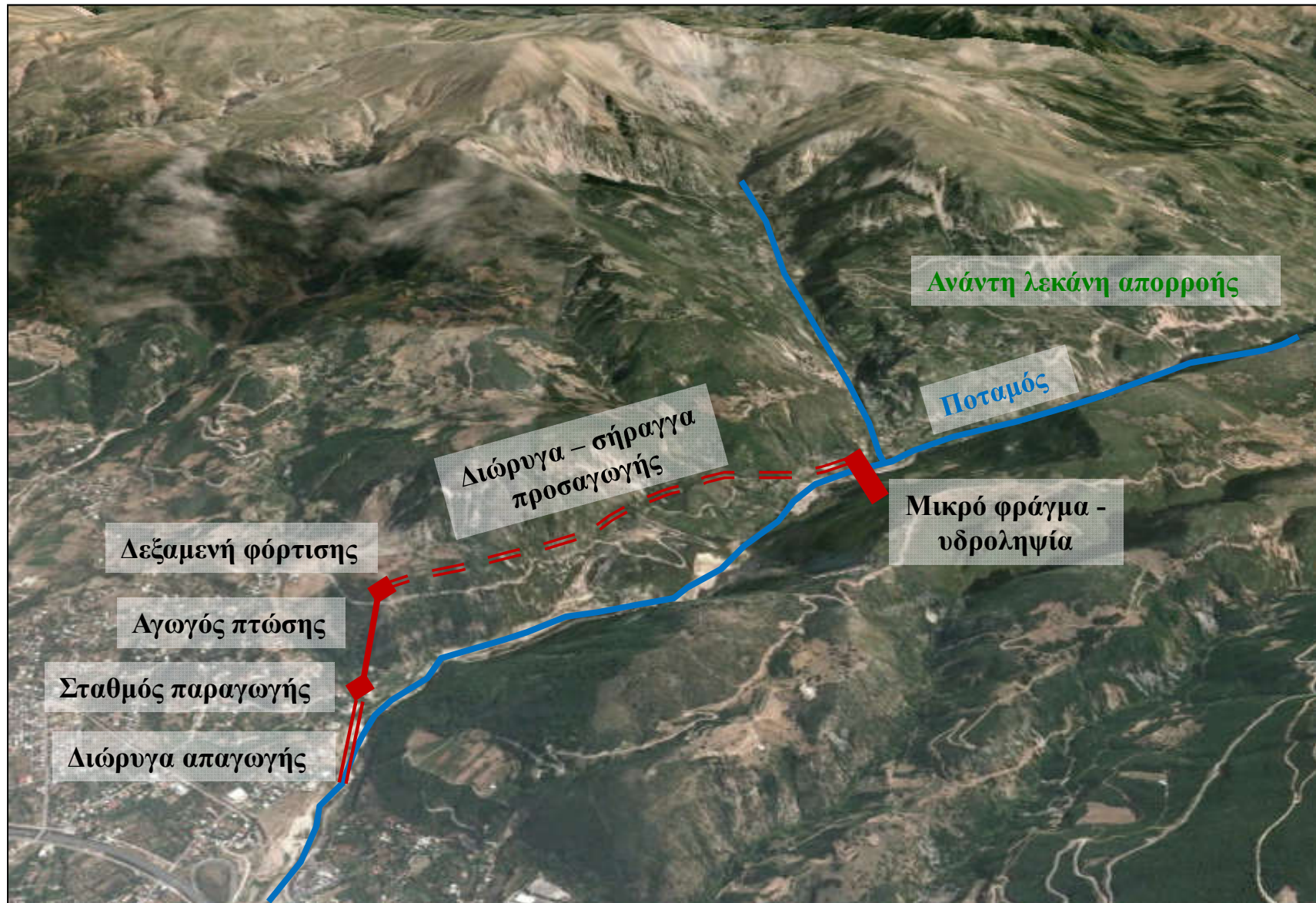
Ποιοι οι βασικοί νόμοι που διέπουν την ανάπτυξη των ΜΥΗΕ:

- ν. 1739/1987 περί διαχείρισης των υδατικών πόρων
- ν. 3199/2003 περί διαχείρισης των υδατικών πόρων
- ν. 3468/2006 περί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ
- ν. 3614/2007 Αναπτυξιακός-Ειδικό χωροταξικό πλαίσιο για τις ΑΠΕ

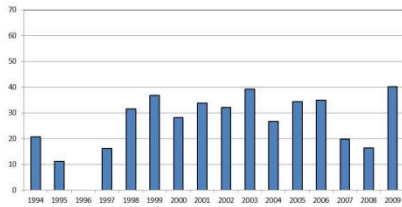
Συνιστώσες ενός τυπικού ΜΥΗΕ



ΜΥΗΕ Γλαύκου



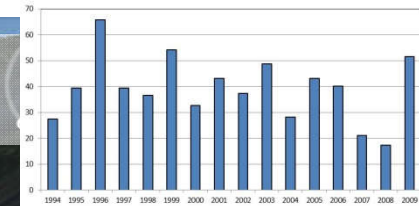
ΜΥΗΕ Γλαύκου



Μέση ετήσια εκτρεπόμενη παροχή (1998-2009)
31.1 hm³ (0.99 m³/s)

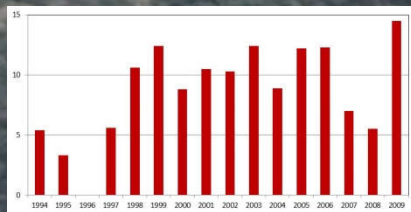
Υδροληψία

Μέση ετήσια παροχή (1994-2009)
39.1 hm³ (1.24 m³/s)



Αγωγός πτώσης
Ύψος πτώσης: 150 m

Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια (1998-2009)
10.4 GWh



Μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης του συστήματος (1998-2009)
0.82

Μέσος ετήσιος συντελεστής φορτίου (1998-2009)
0.31

ΥΗΣ: εγκατεστημένη ισχύς 3.8 MW
2.2 MW Francis, 1.6 MW Pelton

Υδρευση Πάτρας

Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα

ΜΥΗΕ Αγ. Βαρβάρας (0.9 MW)

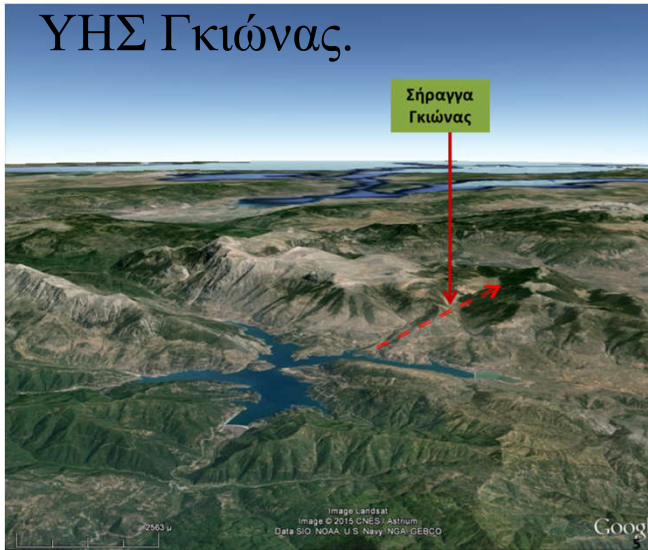


Έχει κατασκευαστεί στον πόδα του αναρρυθμιστικού φράγματος Αγίας Βαρβάρας της ΔΕΗ και αξιοποιεί την οικολογική παροχή του ποταμού Αλιάκμονα. Περιλαμβάνει μία μονάδα Kaplan S-type οριζοντίου άξονα. Είναι σε λειτουργία από το Μάρτιο του 2008 και έχει μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας 4 GWh.

Πηγή: ΔΕΗ ανανεώσιμες

ΜΥΗΕ ως προσθήκη ΜΥΗΕ στο υδραγωγείο Μόρνου (ΥΗΣ Γκιώνας)

Σε πολλές περιπτώσεις μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την υδραυλική ενέργεια που προέρχεται από άλλες χρήσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το υδραγωγείο που μεταφέρει το νερό από τον ταμιευτήρα Μόρνου για την ύδρευση της Αθήνας. Σε συγκεκριμένα σημεία υπάρχουν μικρά υδροηλεκτρικά έργα με σημαντικότερο τον ΥΗΣ Γκιώνας.



Ο ΥΗΣ Γκιώνας (ανήκει στη ΔΕΗ) βρίσκεται κοντά στην πόλη της Άμφισσας και αξιοποιεί μέρος της διερχόμενης παροχής νερού ύδρευσης της ΕΥΔΑΠ.

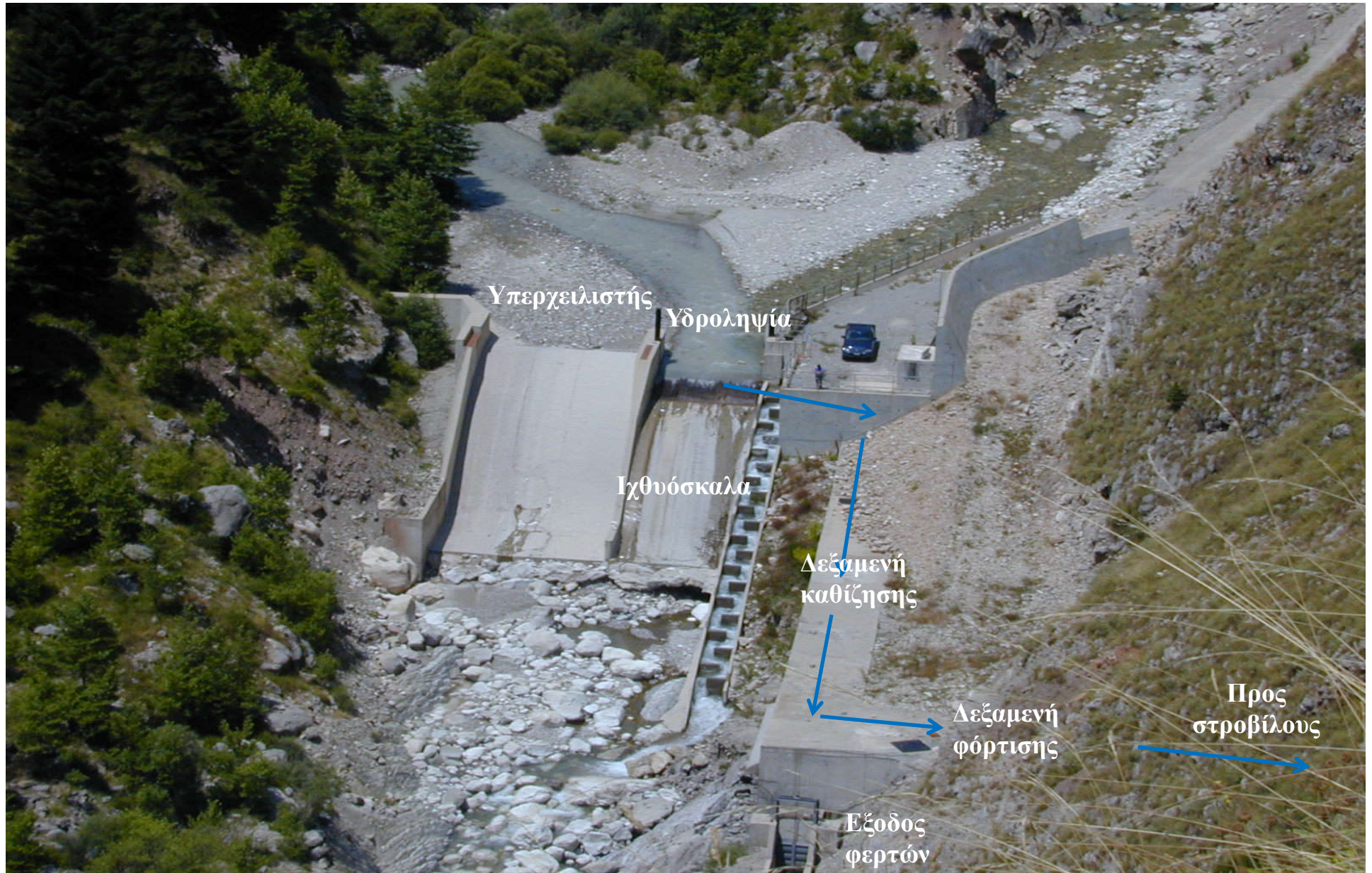
Η παροχή λειτουργίας του κυμαίνεται από 7.8 ως 14.5 m³/s, και το ύψος πτώσης του από 30.0 ως 66.1 m.

Το έργο έχει ονομαστική ισχύ 8.67 MW, είναι σε λειτουργία από το 1987 και έχει μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας 34 GWh



Συνιστώσες ΜΥΗΕ

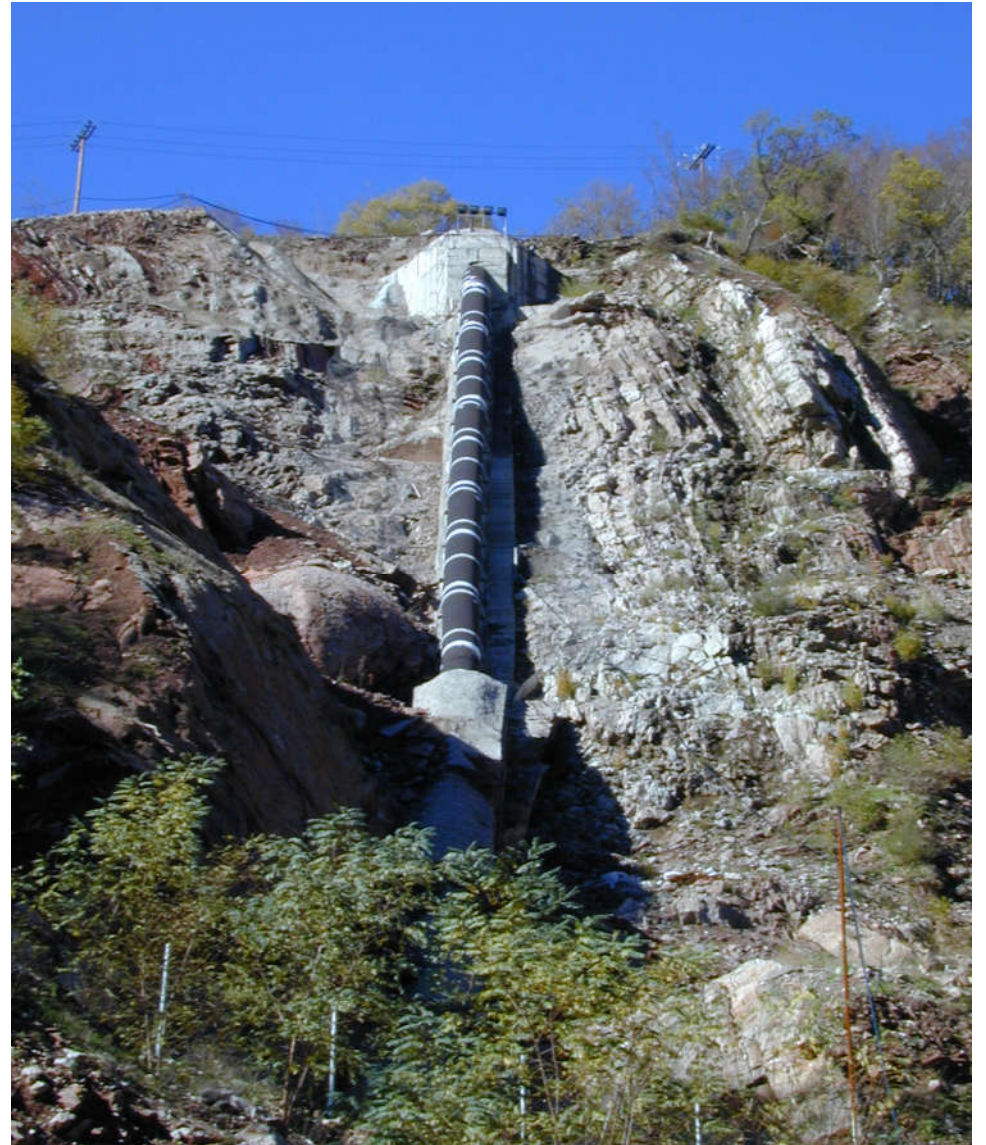
Θεοδώριανα



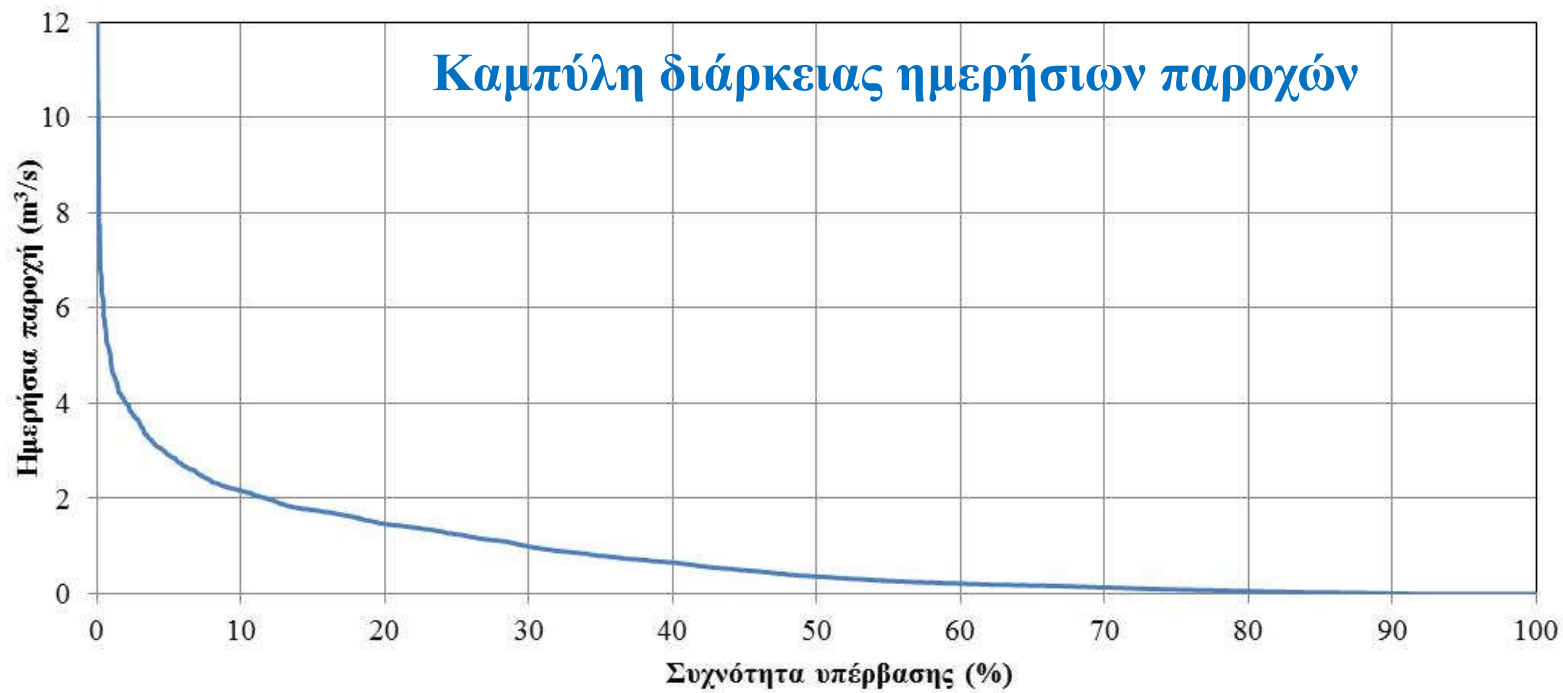
ΜΥΗΣ Θεοδώριανων



ΜΥΗΣ Θεοδώριανων



Υδατικό δυναμικό θέσης

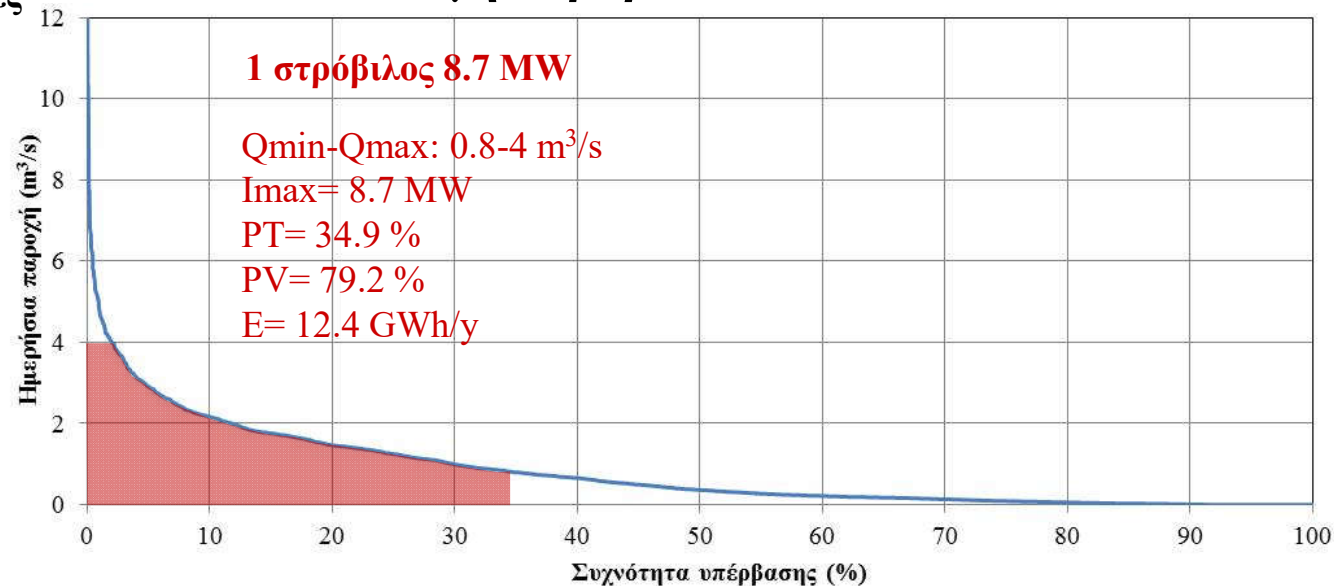


Σχεδιασμός ΜΥΗΕ

Επιλογή στροβίλων

ΔΕΔΟΜΕΝΑ Θεωρητική ισχύς για
διάφορες παροχές

H=260 m	Q (m ³ /s)	I (MW)
ρ=1000 kg/m ³	0.5	1.1
g=9.81 m/s ²	1	2.2
n=0.85	1.5	3.3
	2	4.3
	2.5	5.4
	3	6.5
	4	8.7
	5	10.8
	10	21.7



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Qmin, Qmax:

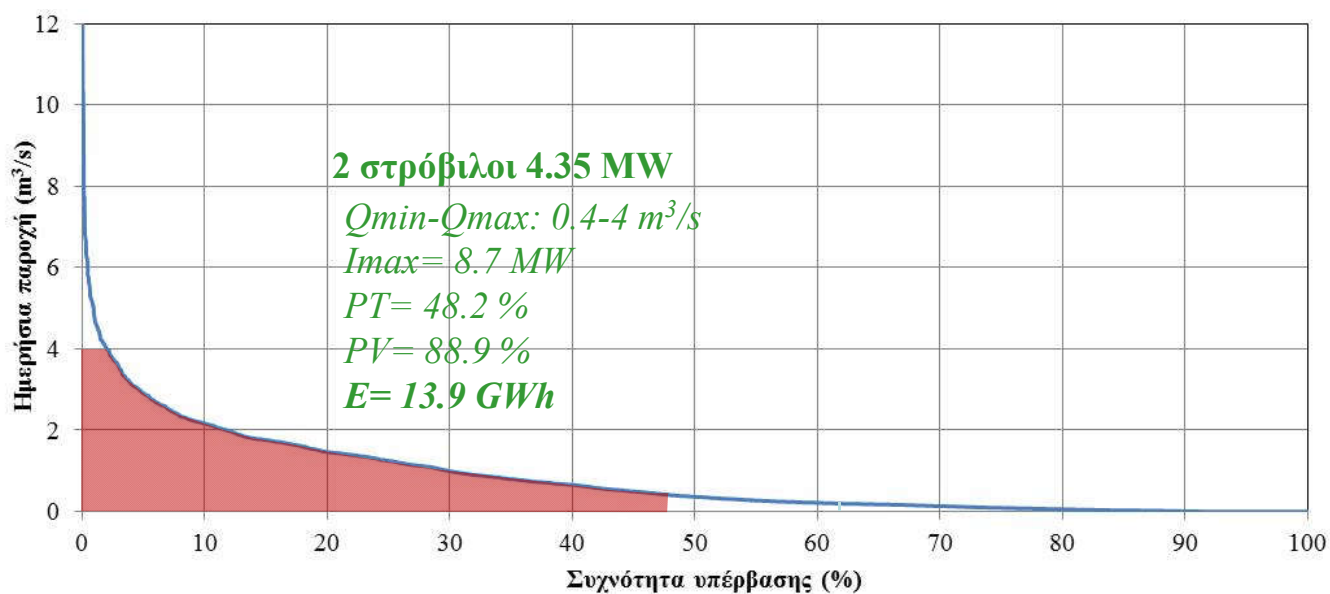
Ελάχιστη, μέγιστη παροχή
εκμετάλλευσης (m³/s)

Imax: Ισχύς στη μέγιστη
παροχή εκμετάλλευσης (MW)

PT: Ποσοστό χρόνου
λειτουργίας στο έτος (%)

PV: Ποσοστό όγκου νερού που
χρησιμοποιείται (%)

E: Συνολική ετήσια ενέργεια
(GWh/y)



Άντληση-ταμίευση

Περίπτωση 1. Έλλειψη ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

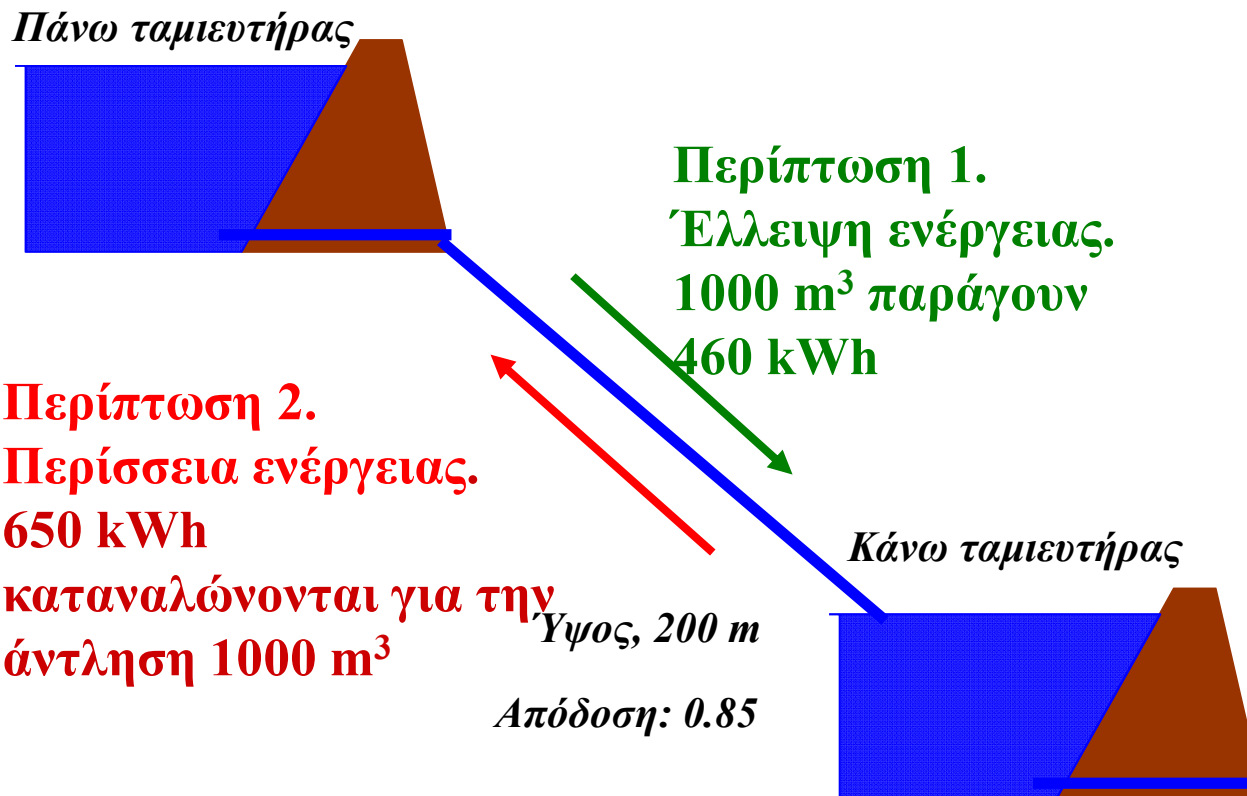
Ανάγκη ηλεκτροπαραγωγής.

1000 m³ μεταφέρονται από τον πάνω ταμιευτήρα στον κάτω και παράγουν περίπου 460 kWh

Περίπτωση 2. Περίσσεια ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας.

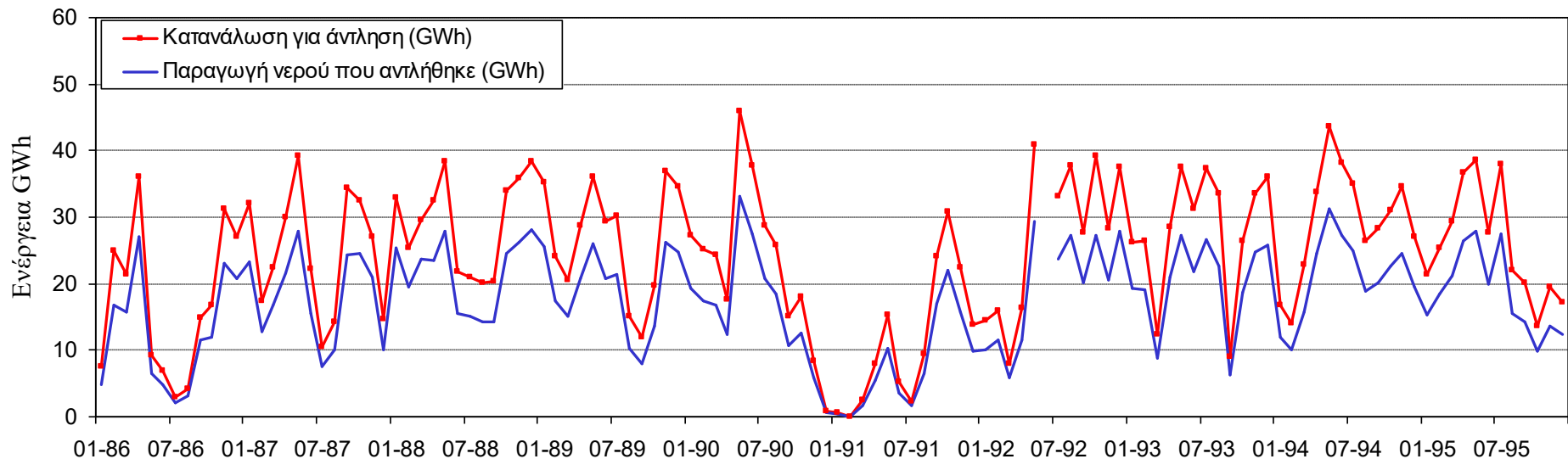
1000 m³ αντλούνται από τον κάτω ταμιευτήρα στον πάνω και καταναλώνονται περίπου 650 kWh



Τα συστήματα αντλησοταμίευσης αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας χάνοντας ένα 30%. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή της ενέργειας είναι μισή στις περιόδους περίσσεια, υπάρχει οικονομικό όφελος από την όλη διαδικασία ³⁷

Συστήματα άντλησης ταμίευσης στην Ελλάδα

Λειτουργία Σφηκιάς 315 MW (1986-1995)



Μέση κατανάλωση άντλησης: 0.193 kW/m^3

Μέση παραγωγή αντλούμενου νερού: 0.138 kW/m^3

Επανάκτηση του 71.5% της ενέργειας άντλησης

Μέση ετήσια παραγωγή: 358 GWh

Μέση ετήσια παραγωγή χωρίς άντληση: 151 GWh

Μέση ετήσια κατανάλωση για άντληση: 288 GWh

Θησαυρός-Πλατανόβρυση (384 MW)

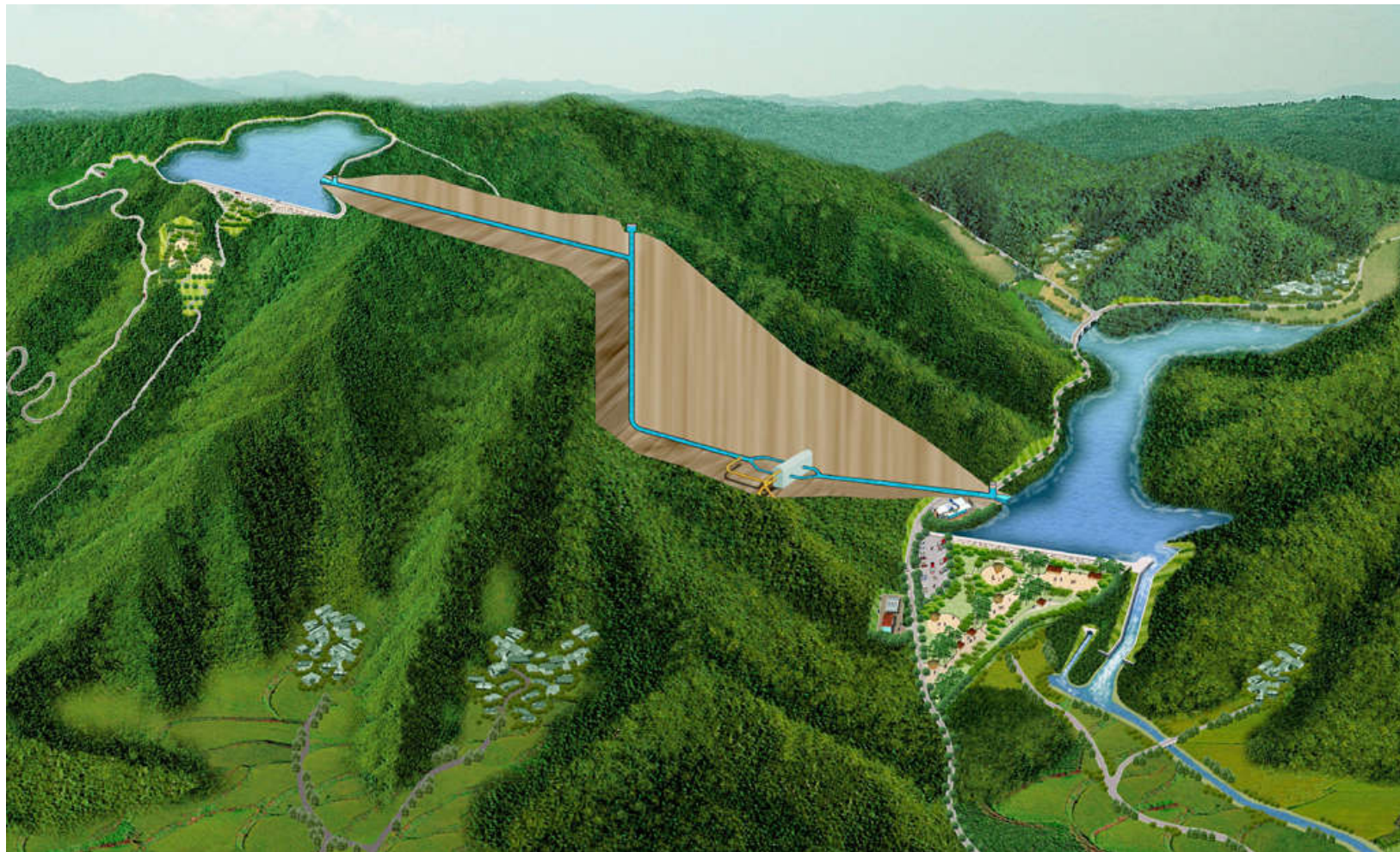
Συμβατική Παραγωγή (από τα νερά του ποταμού) 440 GWh

Παραγωγή από την αναστρέψιμη λειτουργία 615 GWh

Συστήματα άντλησης ταμίευσης

Kazunogawa

Ολοκληρώθηκε το 2001 στην περιοχή Yamnashi-Ken της Ιαπωνίας, ισχύος 1600 MW. Αποτελείται από 2 ταμιευτήρες χωρητικότητας 19.2 και 18.4 hm³ που έχουν υψομετρική διαφορά 685 m. Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας βρίσκεται 500 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και συνδέεται με τον άνω και κάτω ταμιευτήρα με σήραγγες μήκους 5 και 3 km.

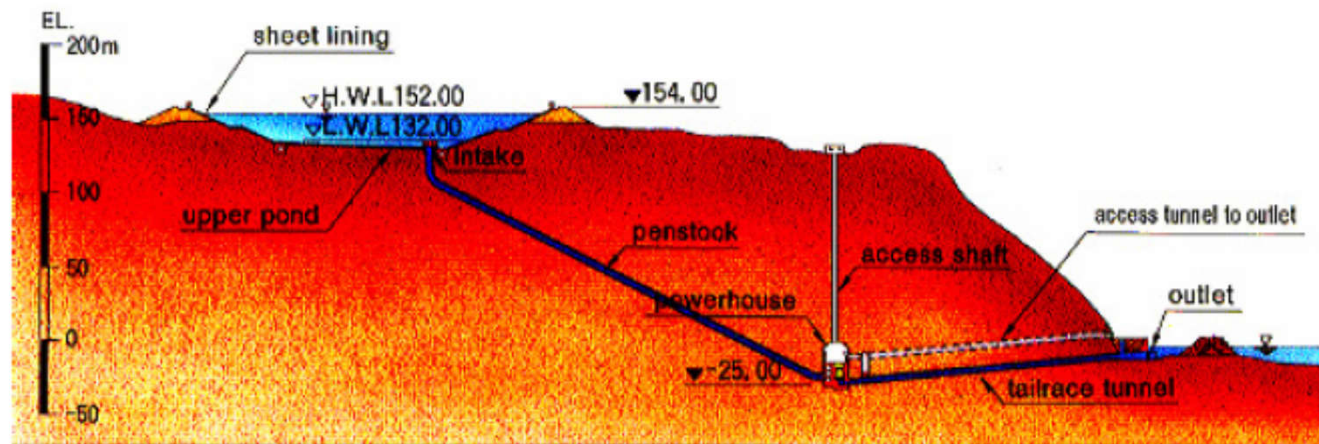


Συστήματα άντλησης ταμίευσης Okinawa

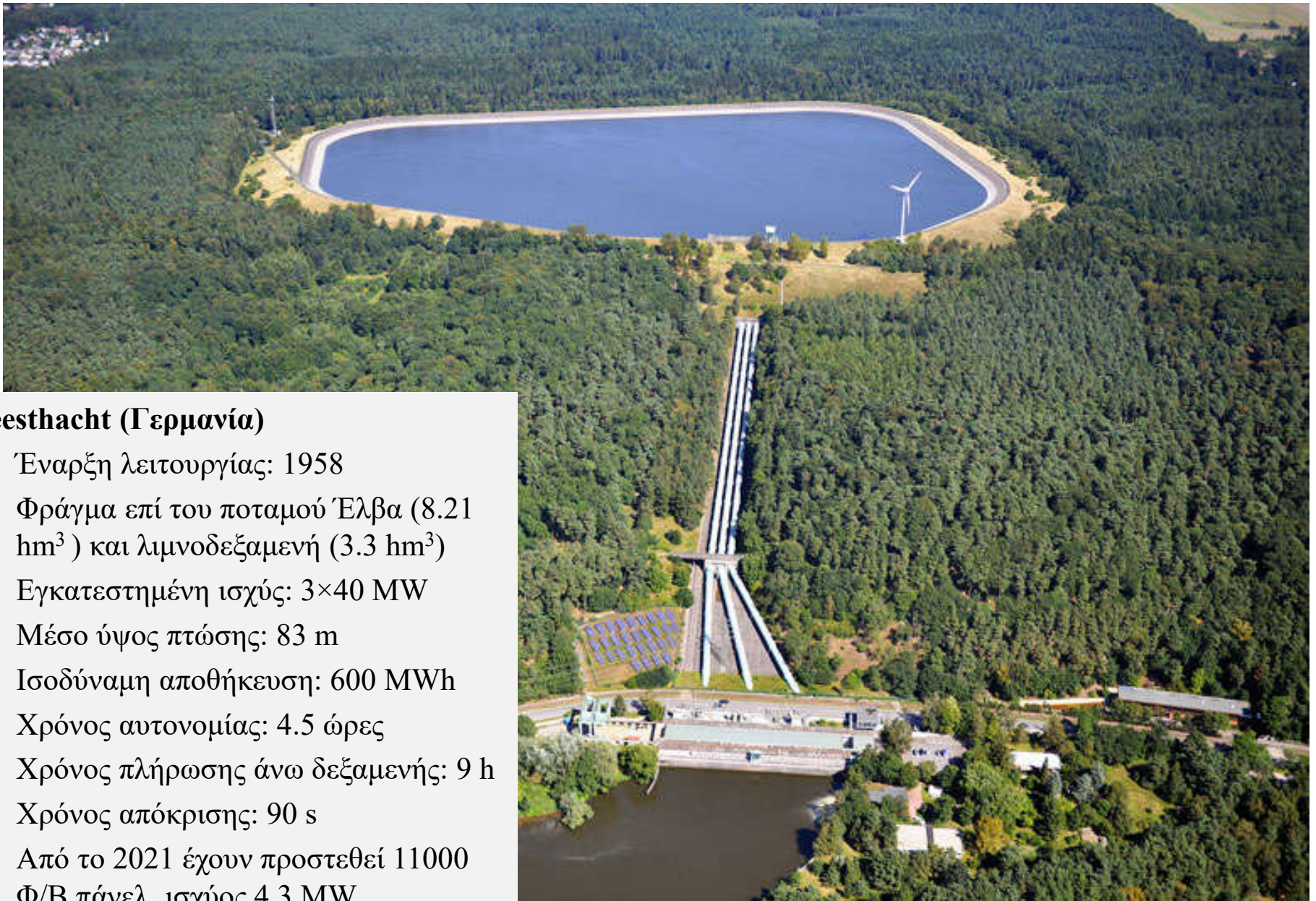
Λειτουργήσε το 1999 στο νησί Okinawa της Ιαπωνίας. Το πρώτο έργο άντλησης-ταμίευσης στον κόσμο που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό. Έχει ισχύ 30 MW μέγιστο ύψος πτώσης 140 m και μέγιστη παροχή 26 m³/s

Τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν κατά τη λειτουργία:

- Η διήθηση του θαλασσινού νερού από τη δεξαμενή στο έδαφος
- Η προσκόλληση των θαλάσσιων οργανισμών στο εσωτερικό των αγωγών
- Η διάβρωση των στροβίλων και των άλλων μεταλλικών στοιχείων



Συστήματα άντλησης ταμείευσης



Geesthacht (Γερμανία)

- ❑ Έναρξη λειτουργίας: 1958
- ❑ Φράγμα επί του ποταμού Έλβα (8.21 hm^3) και λιμνοδεξαμενή (3.3 hm^3)
- ❑ Εγκατεστημένη ισχύς: $3 \times 40 \text{ MW}$
- ❑ 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

Υβριδικά Συστήματα

Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας

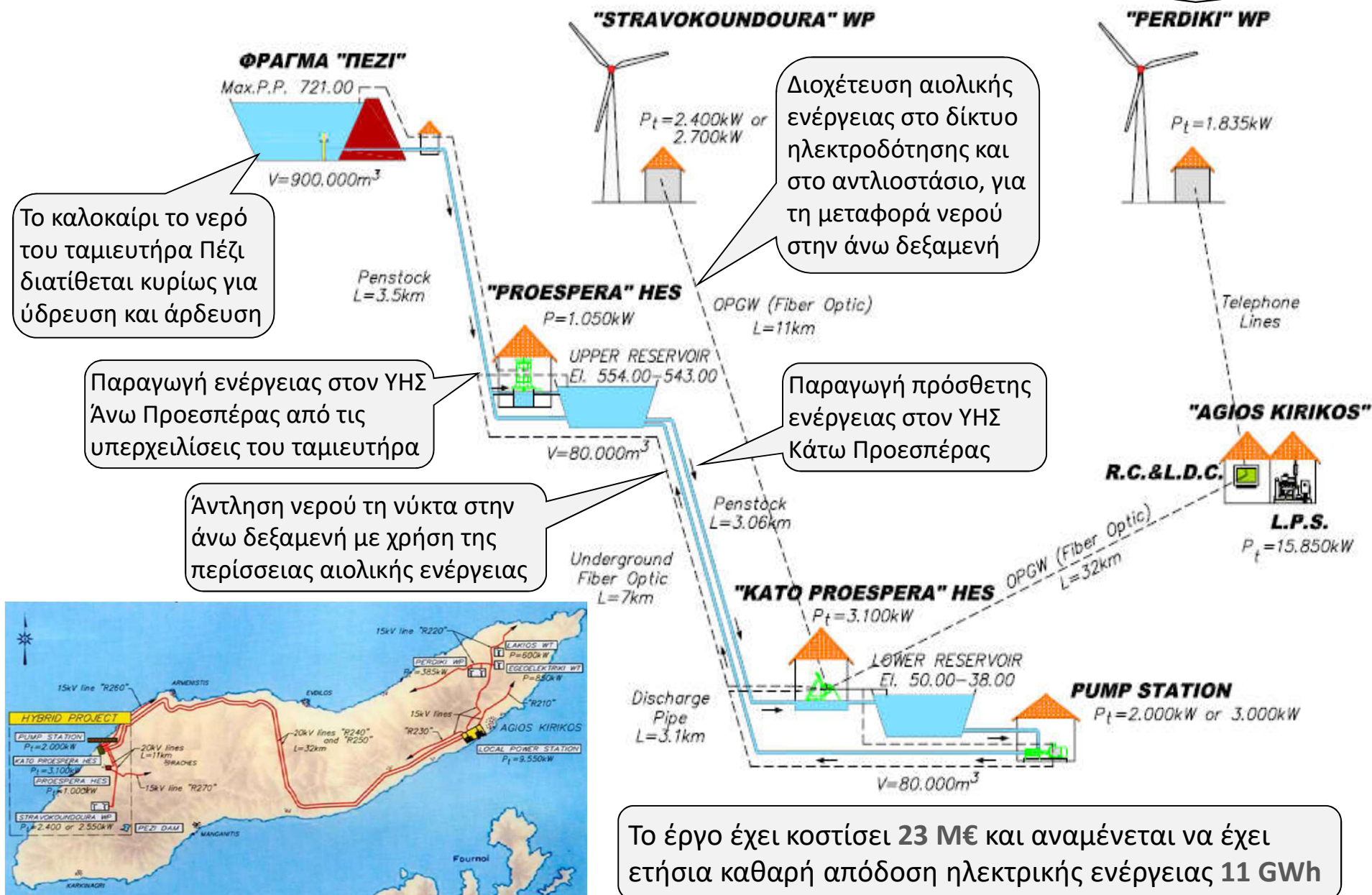
Στην περιοχή Πέζι του Δήμου Ραχών Ικαρία κατασκευάζεται από τη ΔΕΗ υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας. Το έργο αποτελείται από:

- το υπάρχον φράγμα στο Πέζι χωρητικότητας 1 hm³ νερού
- 2 δεξαμενές νερού (με μικρά φράγματα) στις θέσεις Άνω Προεσπέρα και Κάτω Προεσπέρα, χωρητικότητας (0.08 hm³)
- 2 μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς στις παραπάνω θέσεις, ισχύος 1050 και 3100 kW αντίστοιχα
- 4 ανεμογεννήτριες συνολική ισχύος 2400 kW στη θέση Στραβοκουντούρα με μελλοντική τοποθέτηση άλλων 4 στη θέση Περδίκι συνολικής ισχύος 1835 kW
- ένα αντλιοστάσιο στην Κάτω Προεσπέρα ισχύος 2000 kW
- τον υπάρχοντα θερμικό σταθμό παραγωγής Αγίου Κήρυκου
- το Κέντρο Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου Αγίου Κήρυκου

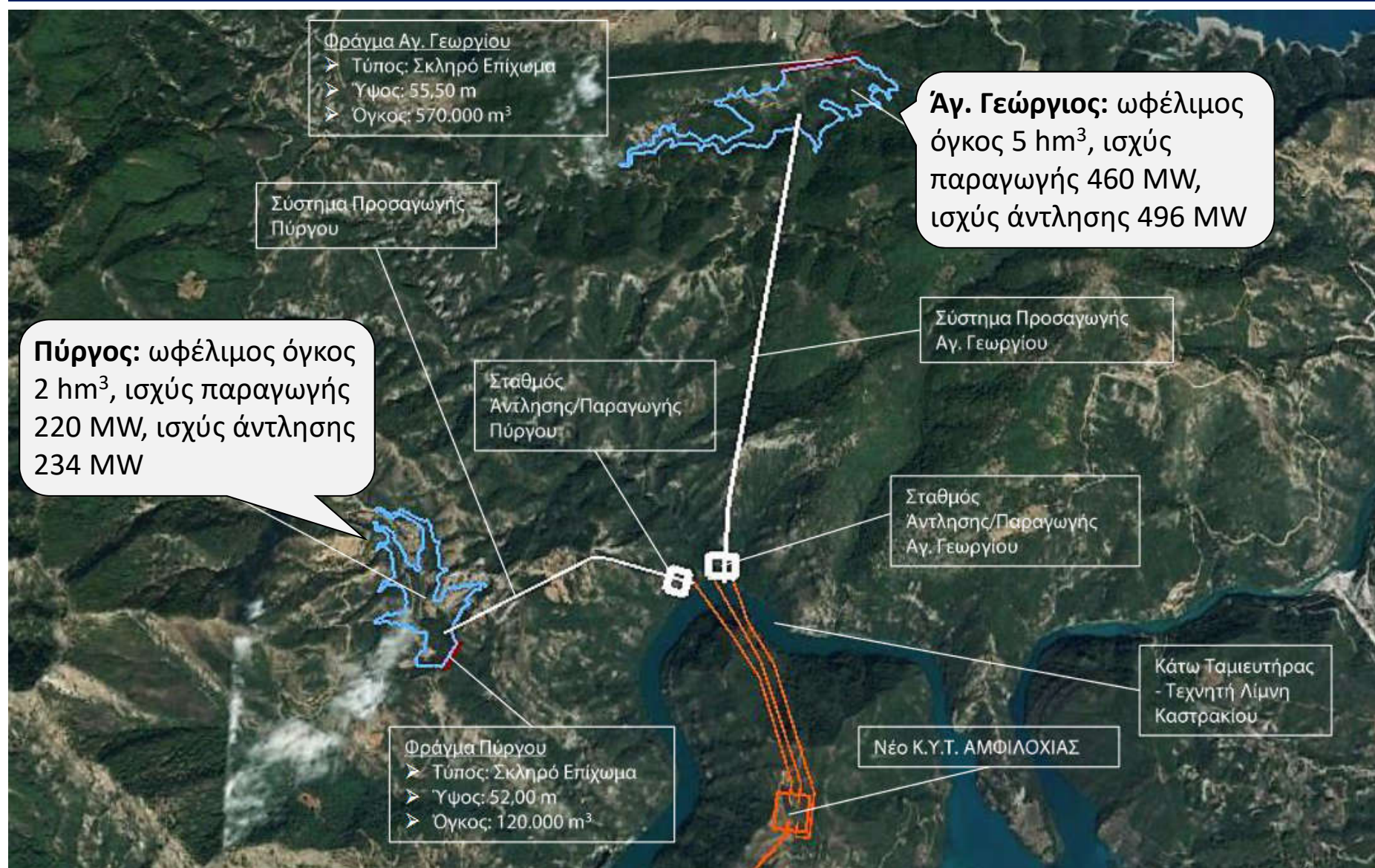


Υβριδικό ενεργειακό έργο Ικαρίας

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



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



Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

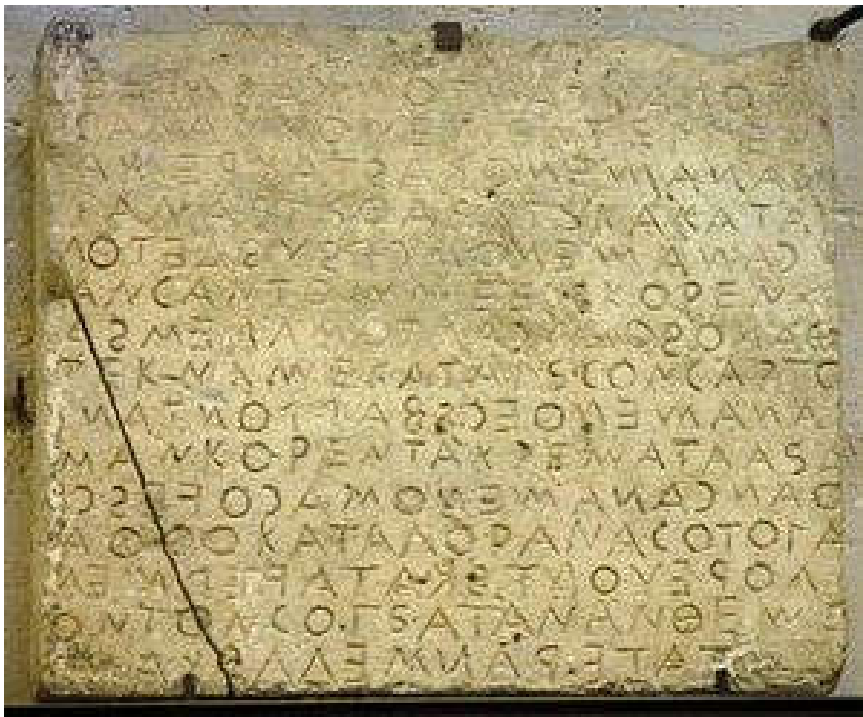
- Σημαντική διαφοροποίηση της φυσικής υδρολογικής δίαιτας του ποταμού (εξομάλυνση ροής, σημαντικά μειωμένη συχνότητα και μέγεθος πλημμυρικών αιχμών, διακοπή ροής στο τμήμα μεταξύ του φράγματος και του ΥΗΣ)
- Συγκράτηση φερτών (μη αναστρέψιμη επίπτωση)
- Παρεμπόδιση κυκλοφορίας ψαριών
- Αλλαγή οικοσυστήματος από ποτάμιο σε λιμναίο
- Αισθητική όχληση σε περίπτωση έντονων διακυμάνσεων της στάθμης
- Μετακινήσεις πληθυσμών-Κατάκλυση οικισμών



Οικολογική παροχή

Ο πρώτος γνωστός κανονισμός ελάχιστης διατηρητέας παροχής

Σώζεται σε επιγραφή του 5^{ου} αιώνα π.Χ που βρέθηκε στην αρχαία πόλη της Γόρτυνας (βρίσκεται στην πεδιάδα της Μεσσαράς στην Κρήτη). Την πόλη διέσχισε ο ποταμός Ληθαίος (σήμερα ονομάζεται Μητροπολιανός)



Απόσπασμα από την επιγραφή

*«Θιοί· τὸ ποταμὸ αἴ κα κατὰ τὸ μέττον τὰν
ροὰν θιθῆι ῥῆν κατὰ το Fὸν αὐτὸ, θιθεμένῳι
ἄπατον ἤμην. Τὰν δὲ ροὰν λείπεν ὅττον
κατέκει ἅ ἐπ' ἀγορᾷ δέπυρα ἢ πλίον, μεῖον
δὲ μῆ.»*

*Θεοί. Αν κάποιος κατευθύνει τη ροή του
ποταμού στην ιδιοκτησία του δεν
τιμωρείται. Πρέπει όμως, να αφήσει τόση
ροή ώστε να καλύπτει σε πλάτος τη γέφυρα
της αγοράς ή περισσότερη, όχι όμως
λιγότερη.*

Efstratiadis, A., A. Tegos, A. Varveris, and D. Koutsoyiannis, Assessment of environmental flows under limited data availability – Case study of Acheloos River, Greece, Hydrological Sciences Journal, 59 (3-4), 731–750, doi:10.1080/02626667.2013.804625, 2014.

Οικολογική παροχή

Οι βασικές μεθοδολογίες εκτίμησης της Οικολογικής Παροχής λαμβάνουν υπόψη:

- τις ιστορικές παροχές του ποταμού
- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατομών
- την διατήρηση του ποταμού ως ενδιαίτημα για συγκεκριμένα είδη, υγροβιότοπο και φυσικό τοπίο

Έτσι η οικολογική παροχή μπορεί να εκτιμηθεί με βάση

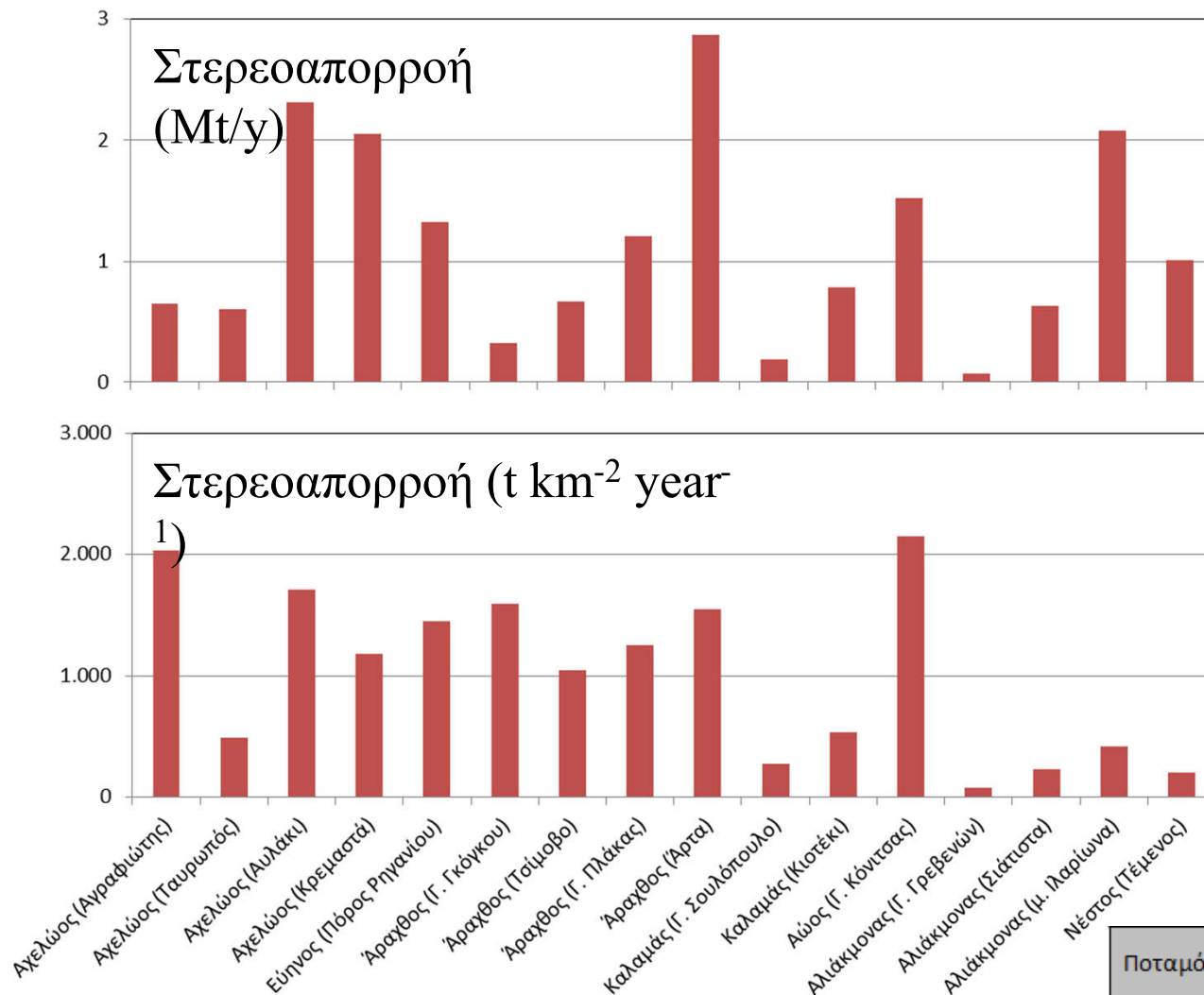
- τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς παροχών (ως ποσοστό της ετήσιας ή θερινής απορροής ή με βάση την καμπύλη διάρκειας)
- την υγρή περίμετρο σε συγκεκριμένες διατομές
- τους όγκους νερού που απαιτούνται για τη διατήρηση συγκεκριμένων ειδών και υγροβιοτόπων

....ως ελάχιστη απαιτούμενη οικολογική παροχή νερού που παραμένει στη φυσική κοίτη υδατορεύματος, αμέσως κατάντη του έργου υδροληψίας του υπό χωροθέτηση Μ.ΥΗ.Ε., πρέπει να εκλαμβάνεται το μεγαλύτερο από τα πιο κάτω μεγέθη, εκτός αν απαιτείται τεκμηριωμένα η αύξησή της, λόγω των απαιτήσεων του κατάντη οικοσυστήματος (ύπαρξη σημαντικού οικοσυστήματος):

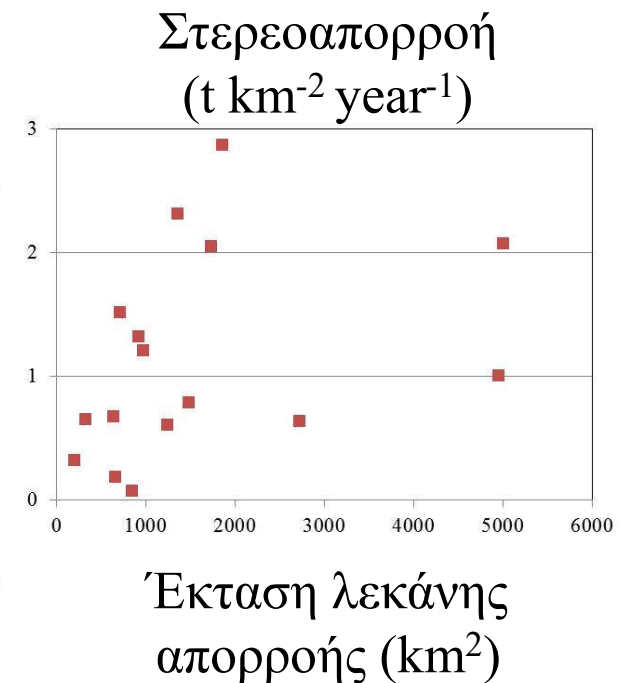
- 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου ή
- 50% της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου ή
- 30 lt/sec σε κάθε περίπτωση.

Ειδικό πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού και αιεφόρου ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού, ΥΠΕΧΩΔΕ 2008

Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς Ελλάδα



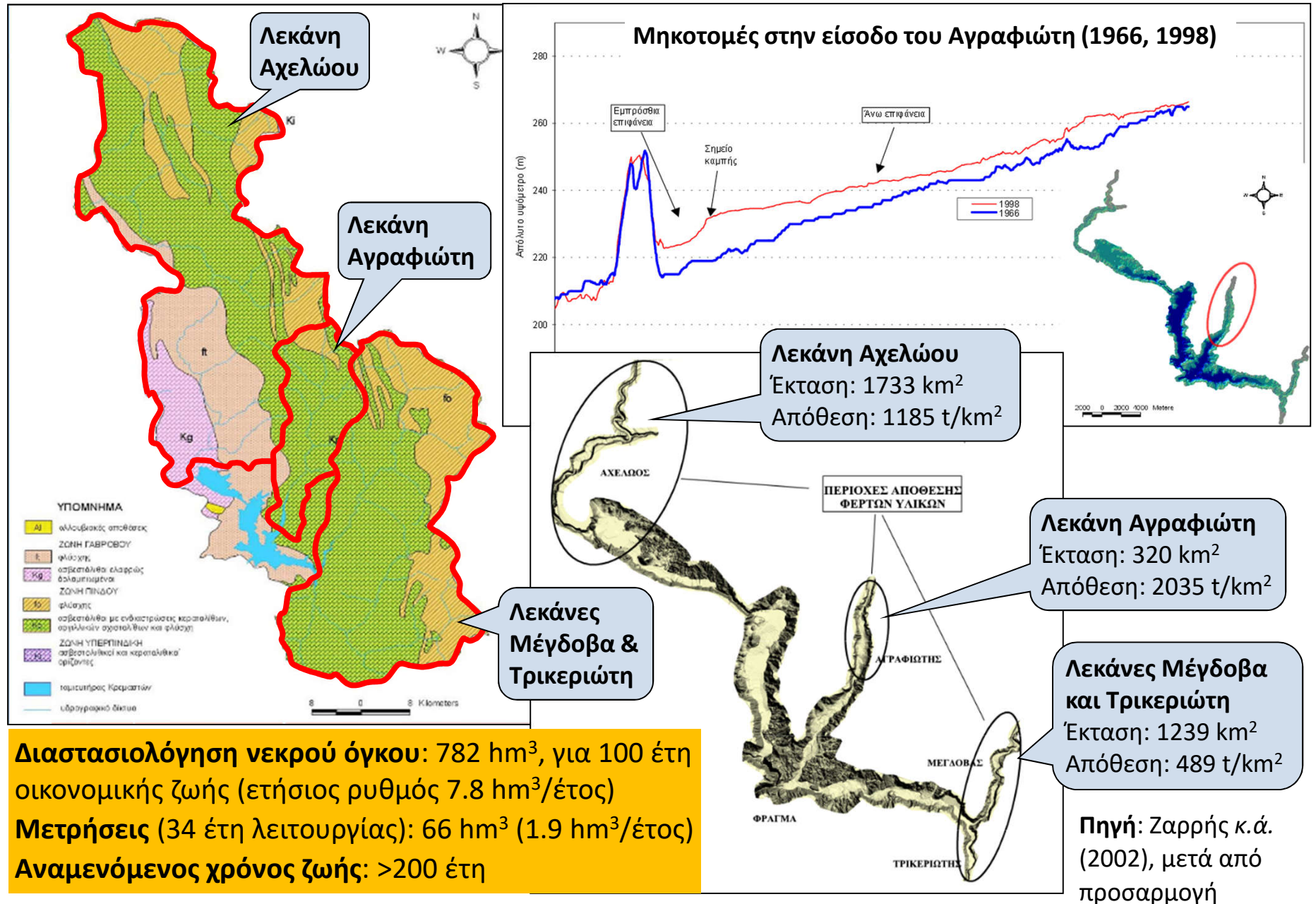
Πηγή: Κουτσογιάννης, Δ. και Κ. Τάρλα, 1987, Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα, Τεχνικά Χρονικά, 7 (3).



Πηγή: Ζαρρής, Δ., Ε. Λυκούδη, και Δ. Κουτσογιάννης, Τελική Έκθεση, Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, 2001

Ποταμός	Θέση	A(km ²)	Περίοδος μετρήσεων	Sy(t/km ²)
Άραχθος	γ.Τσίμοβου	640	1965-78	891
Άραχθος	γ.Γκόγκου	203	1966-72	1.176
Άραχθος	γ.Πλάκας	970	1965-76	1.570
Άραχθος	Άρτα	1.855	1965-76	1.546
Καλαμάς	γ.Σουλόπουλο	660	1969-78	203
Καλαμάς	Κιοτέκι	1.481	1966-78	386
Αλιάκμονας	Σιάτιστα	2.724	1965-79	84

Αποθέσεις φερτών στα Κρεμαστά



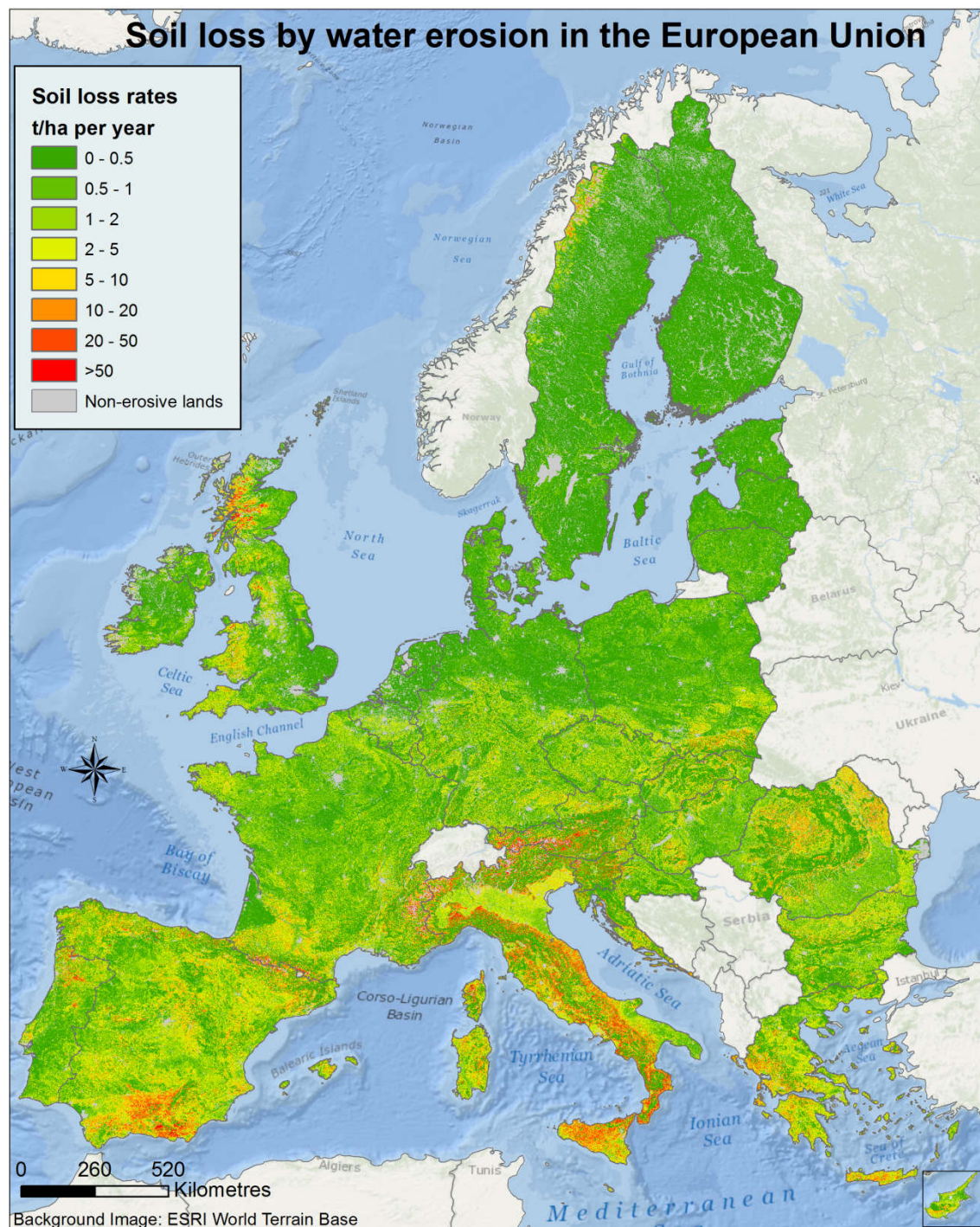
Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς

Μετρήσεις στερεοαπορροής σε ελληνικούς ταμιευτήρες

	Ταμιευτήρας Κρεμαστών ⁽¹⁾	Ταμιευτήρας Μαραθώνα ⁽²⁾
Έτη λειτουργίας	34	80
Αποθέσεις-hm ³	66.6	4.68
Μέση ετήσια απόθεση φερτών υλών-m ³	2 081 250	58 640
Επιφάνεια λεκάνης απορροής-km ²	3292	117.8
Μέση ετήσια στερεοαπορροή-t/km ²	1005	508

⁽¹⁾Ζαρρής, Δ., Ε. Λυκούδη και Δ. Κουτσογιάννης, 2002, Η εξέλιξη των αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες ως δυναμικό φαινόμενο - Εφαρμογή στον ταμιευτήρα Κρεμαστών, *Πρακτικά του Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας*, Θεσσαλονίκη, 2, 363–370, ΑΠΘ, Ελληνική Γεωγραφική Εταιρεία.

⁽²⁾Ξανθάκης, Μ., 2011, *Η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία*, Διδακτορική Διατριβή, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, σσ 288.



Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς

Panos Panagos, Pasquale Borrelli, Jean Poesen, Cristiano Ballabio, Emanuele Lugato, Katrin Meusburger, Luca Montanarella, Christine Alewell, The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, *Environmental Science & Policy*, Volume 54, 2015, Pages 438-447, ISSN 1462-9011, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.

Εκτιμήσεις στερεομεταφοράς

Παράδειγμα διαστασιολόγησης νεκρού όγκου ταμιευτήρα

Εμβαδόν λεκάνης απορροής: 82 km²

Διάρκεια ζωής ταμιευτήρα: 50 έτη

Εδαφική διάβρωση σε λεκάνη (εκτίμηση με RUSLE): 20 t ha⁻¹ year⁻¹

Συντελεστής στερεοαπορροής: 0.27

Στερεοαπορροή: 20x0.27 t ha⁻¹ year⁻¹ = 5.4 t ha⁻¹ year⁻¹

Συνολική στερεοαπορροή λεκάνης: 5.4x82x100=44270 t

Πυκνότητα φερτών υλών: 1.25 t/m³

Ετήσιος όγκος αποθέσεων σε ταμιευτήρα: 44270/1.25=35416 m³

Όγκος αποθέσεων σε ταμιευτήρα σε 50 έτη: 1.8 hm³

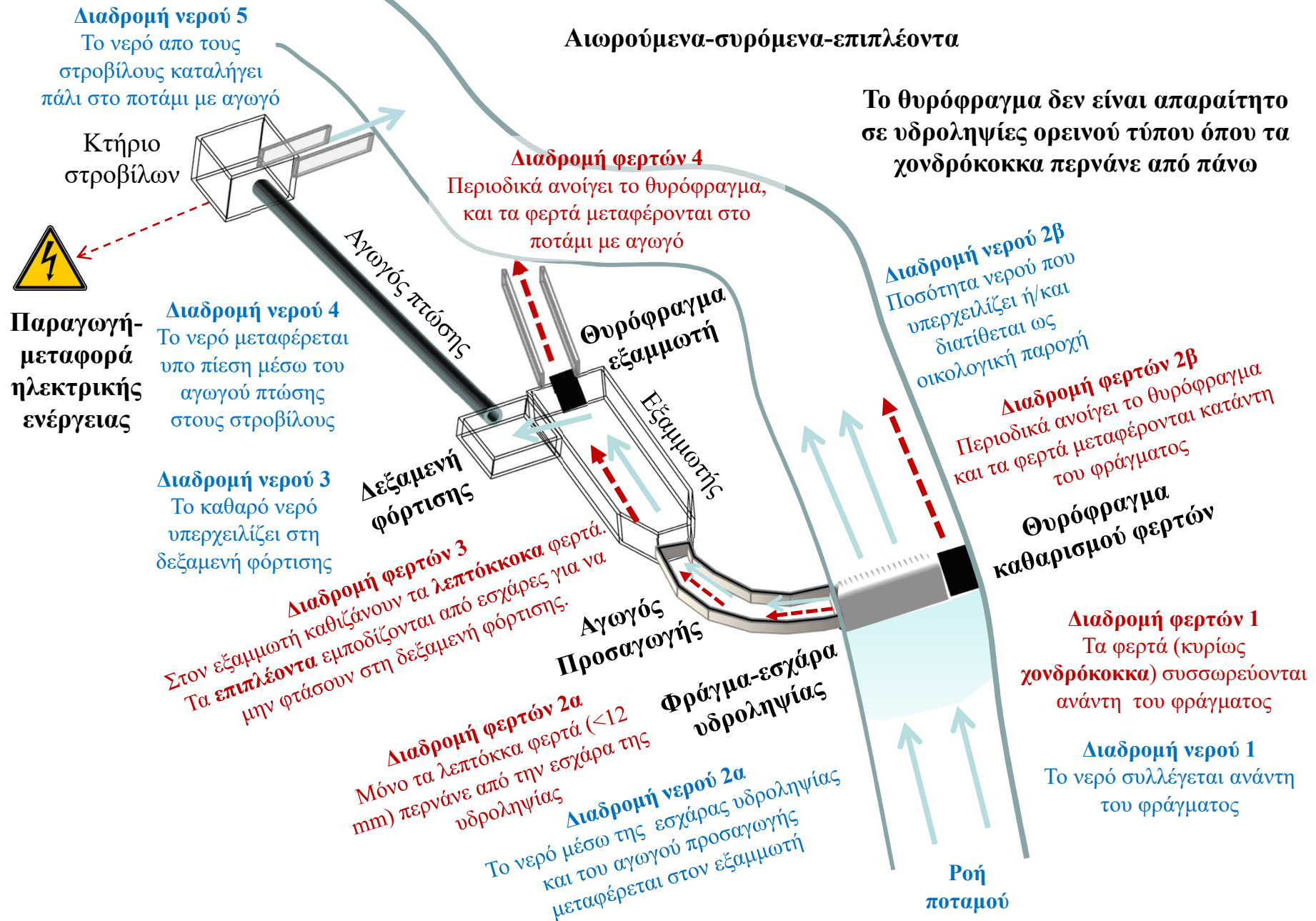
Διαχείριση φερτών σε φράγματα

- Η διαχείριση των φερτών επιτυγχάνεται με τους εξής τρόπους:
 - Μείωση της εισροής φερτών στους ταμιευτήρες (διαχείριση εισροών)
 - Επιλεκτική καθοδήγηση φερτών, ώστε να μην εισέρχονται στους ταμιευτήρες (διαχείριση αποθέσεων)
 - Απομάκρυνση φερτών από τους ταμιευτήρες (διαχείριση εκροών)
 - Παράκαμψη ταμιευτήρα και εκτροπή φερτών (διαχείριση εισροών)
- Οι δύο πρώτες προσεγγίσεις είναι ευνοϊκές αποκλειστικά για τη λειτουργία του ταμιευτήρα, καθώς επιβραδύνεται ο ρυθμός πλήρωσης του νεκρού όγκου και συνεπώς αυξάνει ο χρόνος ωφέλιμης ζωής του έργου, ενώ η άλλες δύο βοηθούν και στην (μερική) **περιβαλλοντική αποκατάσταση του κατάντη ποτάμιου συστήματος**.
- Τρόποι απομάκρυνσης φερτών:
 - Μηχανική απομάκρυνση
 - Εκσκαφή – βυθοκόρηση εν ξηρώ (dry dredging)
 - Βυθοκόρηση με πλωτά μέσα (wet dredging)
 - Βυθοκόρηση με αναρρόφηση (suction dredging)
 - Υδραυλική απομάκρυνση μέσω έκπλυσης (flushing)
 - Εκκένωση μέσω εξόδων σε χαμηλές στάθμες
 - Τεχνητές πλημμύρες μέσω της υδροληψίας

ΜΥΗΕ – Διαχείριση φερτών

Αιωρούμενα-συρόμενα-επιπλέοντα

Το θυρόφραγμα δεν είναι απαραίτητο σε υδροληψίες ορεινού τύπου όπου τα χονδρόκοκκα περνάνε από πάνω



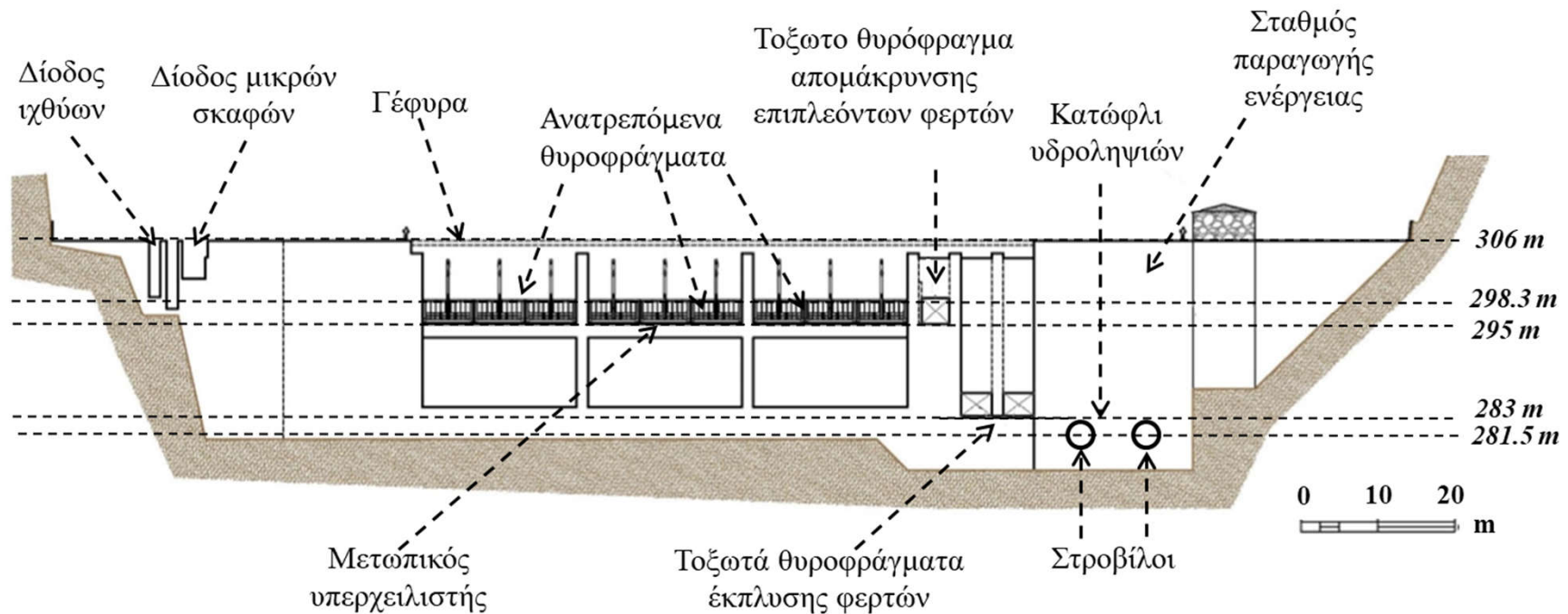
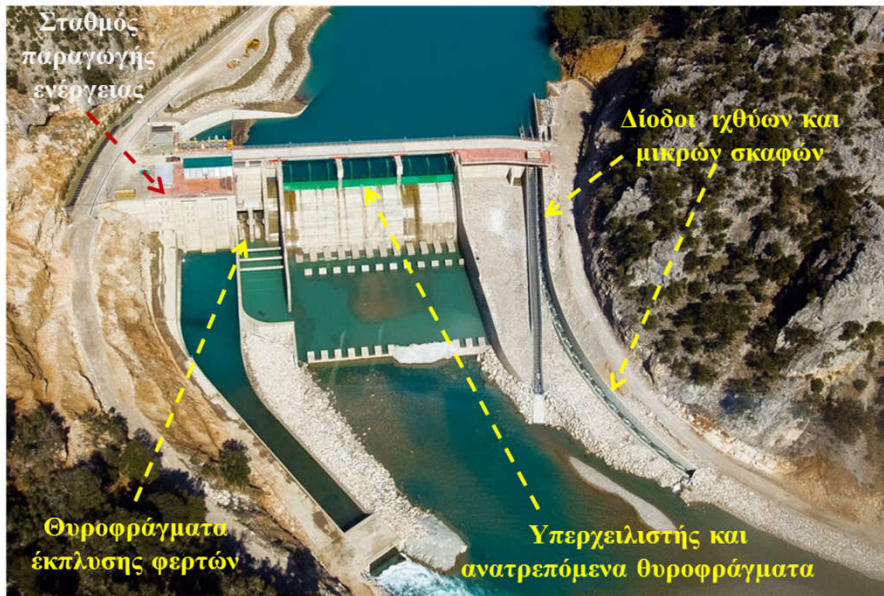
ΜΥΗΕ – Διαχείριση φερτών

Δαφνοζωνάρα

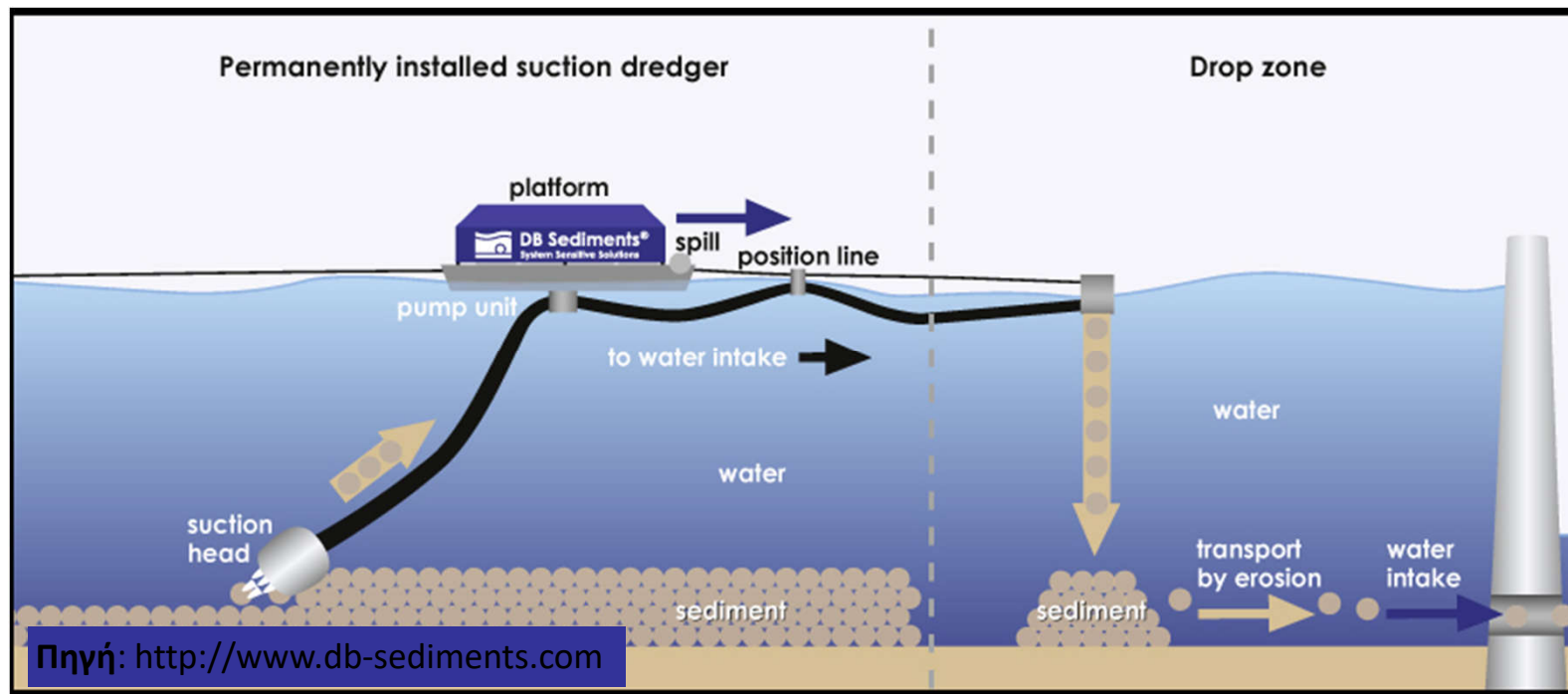
2 στροβίλοι Kaplan S-Type, ισχύος 5.93 MW (5-40 m³/sec). Μέση ετήσια παραγωγή 40 GWh.

Υπερχειλιστής και ανατρεπόμενα θυροφράγματα

Δίοδοι ιχθύων και μικρών σκαφών

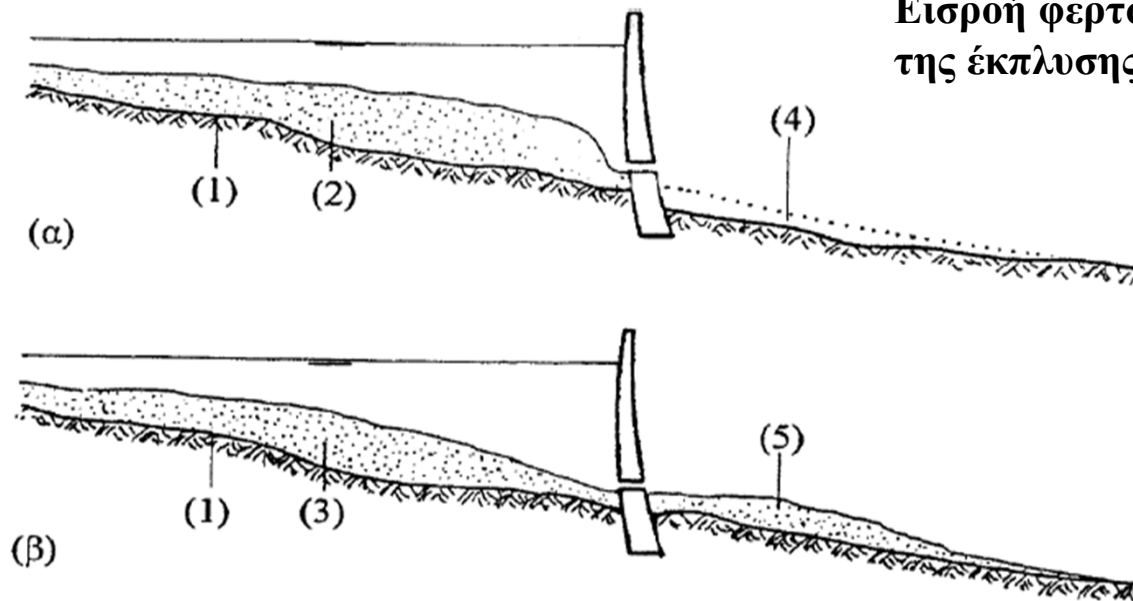


Μηχανική απομάκρυνση φερτών



Υδραυλική απομάκρυνση φερτών

Εισροή φερτών σε ταμιευτήρα και αποτελέσματα της έκπλυσης μετά την επαναπλήρωσή του



- (1) Αρχική κοίτη ποταμού
- (2) Ζώνη απόθεσης φερτών
- (3) Μειωμένη απόθεση εντός του ταμιευτήρα μετά την έκπλυση
- (4) Υποβάθμιση ποταμού κατάντη του φράγματος λόγω της έλλειψης φερτών υλών
- (5) Δημιουργία νέων αποθέσεων κατάντη του φράγματος



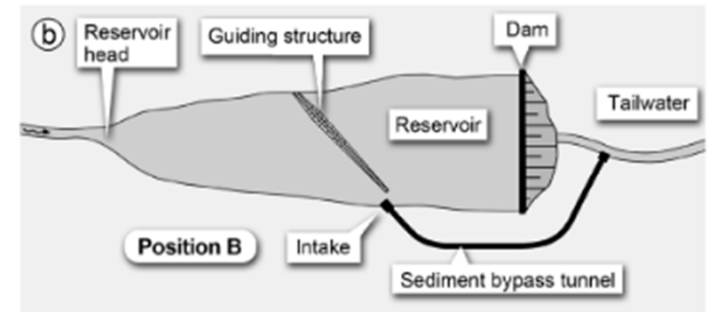
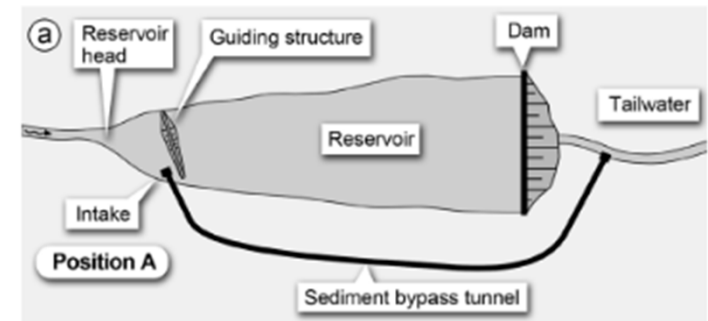
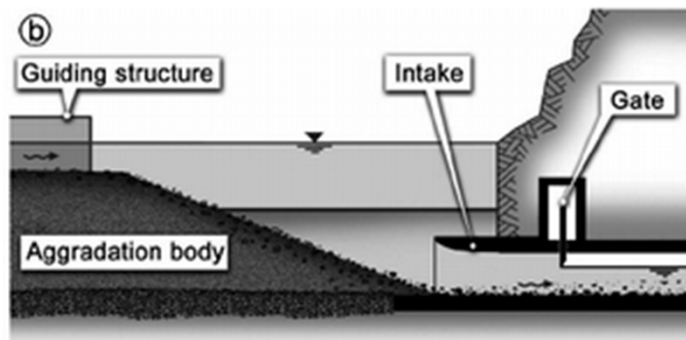
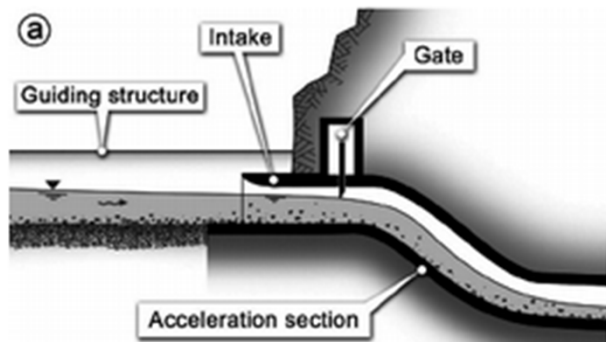
Φράγμα Gezhouba, Κίνα



Φράγμα Gebidem, Ελβετία

Εκτροπή φερτών με παράκαμψη του ταμιευτήρα (sediment bypass)

- ❑ Σύστημα έργων που επιδιώκει την παράκαμψη του ταμιευτήρα, με απαγωγή μέρους της απορροής και των φερτών (Auel and Boes, 2011).
- ❑ Το έργο καθοδήγησης της ροής (φράγμα, αναβαθμός) τοποθετείται είτε στην κεφαλή του ταμιευτήρα (ροή με ελεύθερη επιφάνεια) είτε σε ενδιάμεση θέση (ροή υπό πίεση).



- ❑ Η σήραγγα εκτροπής περιλαμβάνει δύο τμήματα:
 - Ανάντη τμήμα, στο οποίο δίνεται ισχυρή κλίση (τυπικό εύρος 15-35%) ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής μεταφορική ικανότητα των φερτών (έντονα υπερκρίσιμη ροή, έλεγχος διάβρωσης)
 - Κατάντη τμήμα σήραγγας εκτροπής, ηπιότερης κλίσης (τυπικό εύρος 1-4%)
- ❑ Στην έξοδο της σήραγγας προβλέπεται ειδική διαμόρφωση, ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση φερτών υλικών στην αμέσως κατάντη περιοχή

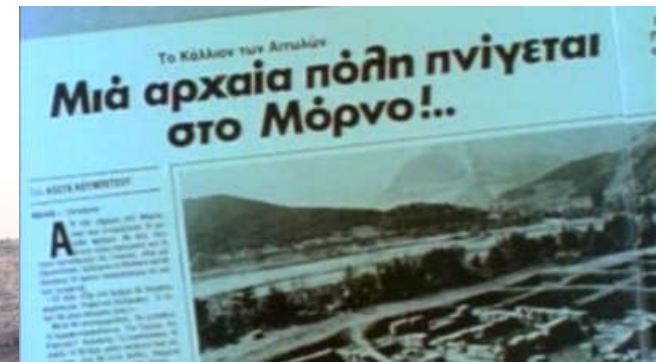
Παραδείγματα ιχθυοδρόμων



Κάτω από τη λίμνη του Μόρνου: Κάλλιο-Καλλίπολις

Στο βυθό της λίμνης του Μόρνου βρίσκεται θαμμένο το χωριό Κάλλιο, το οποίο κατακλύστηκε από τα νερά του ταμιευτήρα το 1980. Στην ίδια θέση βρισκόταν η αρχαία Καλλίπολις ή Κάλλιον, η ανατολικότερη Αιτωλική πόλη, πιθανό κέντρο ολόκληρου του αιτωλικού έθνους των Οφιονέων.

Το Κάλλιον κατοικήθηκε από τα γεωμετρικά χρόνια, αλλά μόλις τον 4^ο αιώνα π.Χ. ιδρύθηκε ως αστικό κέντρο, όπως συνέβη και με τις άλλες αιτωλικές πόλεις, που άρχισαν να οργανώνονται στην πολιτική ομοσπονδία της Αιτωλικής Συμπολιτείας. Η νέα πόλη προστατεύθηκε με τείχος και σε αυτή συγκεντρώθηκαν οι θρησκευτικές, οικονομικές και πολιτικές δραστηριότητες των αγροτικών οικισμών. Οι κάτοικοί της αναφέρονται από τον Θουκυδίδη (3.96.3) ως το ανατολικότερο μέρος της φυλής των Οφιονέων, ενώ ο Πausanίας (10.22.6) και ο Στέφανος Βυζάντιος (που ονομάζει την πόλη Σόλλιον και Φάκιον) αναφέρουν το Κάλλιον ως την πρωτεύουσά τους. Στην ελληνιστική περίοδο, σύμφωνα με επιγραφικές μαρτυρίες, η πόλη ονομαζόταν Καλλίπολις.



Η υδροηλεκτρική ενέργεια ως θύμα της παραπληροφόρησης

Η Οδύσσεια του φράγματος Μεσοχώρας

- Ο ΥΗΣ Μεσοχώρας έχει εγκατεστημένη ισχύ 161.6 MW (2 μονάδες των 80 MW και μία μονάδα των 1.6 MW) και η εκτιμώμενη μέση συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε 384 GWh.
- Το έργο άρχισε να κατασκευάζεται το 1986 και μετά από πολλές καθυστερήσεις, περατώθηκε το 2001.
- Έχουν επενδυθεί μέχρι σήμερα περίπου 410 Μ€ σε σημερινές τιμές, τα οποία παραμένουν πλήρως ανενεργά για ήδη 18 έτη.
- Η ετήσια απώλεια από την μη παραγωγή της ενέργειας των **384 GWh** φτάνει τα **27 Μ€** (70 k€ /GWh) ενώ άλλα τουλάχιστον **22 Μ€** είναι το ετήσιο κόστος για την εξυπηρέτηση των ανενεργών κεφαλαίων που έχουν επενδυθεί στο έργο.
- Η μη λειτουργία του έργου εγκυμονεί κινδύνους ειδικά σε περίπτωση πλημμύρας, ενώ χρειάζονται εργασίες συντήρησης



Μεσοχώρα (Αχελώος)

- ❑ Υδροληψία +731.0 m, υπερχειλίση +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 $2 \times 80 = 160$ MW (Francis)
- ❑ Έργο πρακτικά ολοκληρωμένο από το 2001, εκτός λειτουργίας



Η υδροηλεκτρική ενέργεια ως θύμα της παραπληροφόρησης

Αυτή είναι η υπάρχουσα εκτροπή του Αχελώου

Με την κατασκευή του φράγματος Πλαστήρα το 1960 εκτρέπονται σε ετήσια βάση περίπου 150 hm^3 νερού από την λεκάνη του Αχελώου στη Θεσσαλία.

Ο αρχικός σκοπός της εκτροπής ήταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά στη συνέχεια προστέθηκαν και άλλες χρήσεις όπως:

(α) η άρδευση του θεσσαλικού κάμπου,

(β) η ύδρευση της Καρδίτσας και

(γ) η τουριστική αξιοποίηση της λίμνης Πλαστήρα



Πλαστήρας (Αχελώος)

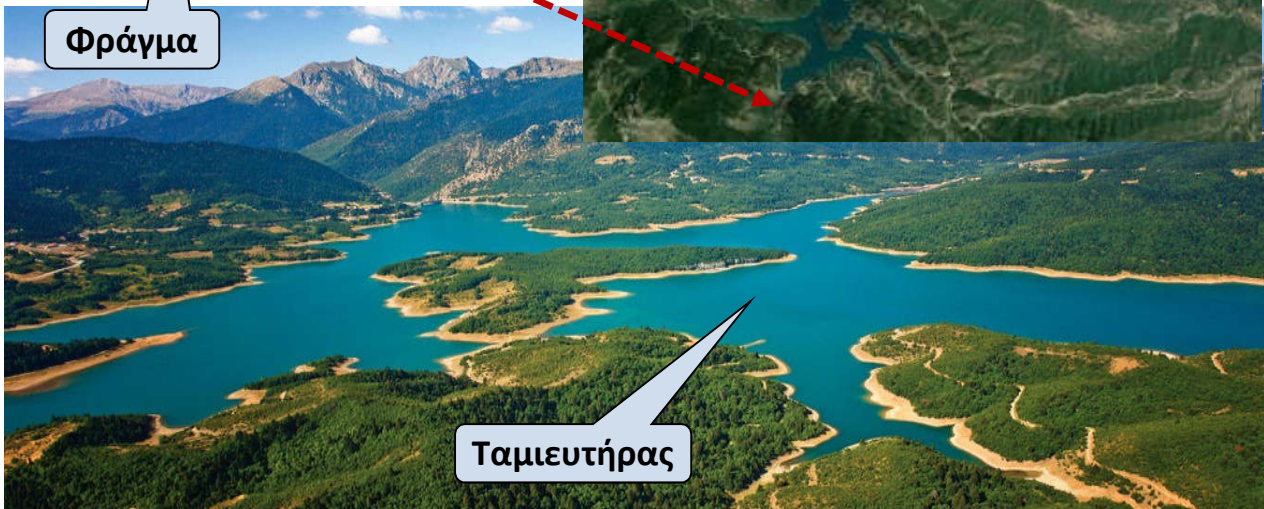
- ❑ Ταμιευτήρας χωρητικότητας 362 hm³
- ❑ Υδροληψία +776.0 m, υπερχειλίση +792.0 m → ωφέλιμος όγκος 286 hm³
- ❑ Μέγιστο ύψος πτώσης 586 m (έξοδος ΥΗΣ +206.0 m)
- ❑ Ισχύς 130 MW (3 Pelton)



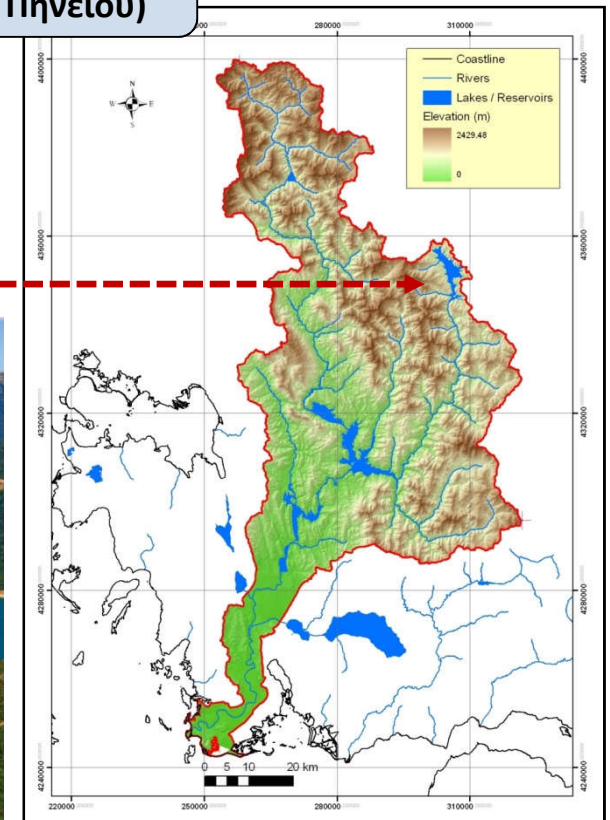
Φράγμα



Σταθμός παραγωγής
(λεκάνη Πηνειού)



Ταμιευτήρας



Κοινωνικές αντιδράσεις



Αξιοποίηση υδραυλικής ενέργειας



Πηγή εικόνας: <http://www.lifo.gr/guests/viral/56837>