

**Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία  
1ο και 5ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών**

# **Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας – Υβριδικά συστήματα**

**Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκ. Καθηγητής**  
**Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Ακαδημαϊκό έτος 2024-25**

# **Μέρος Α: Εισαγωγή στην έννοια της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας & σχετικές τεχνολογίες**

# Αντί εισαγωγής: Η σύγκριση δύο κόσμων

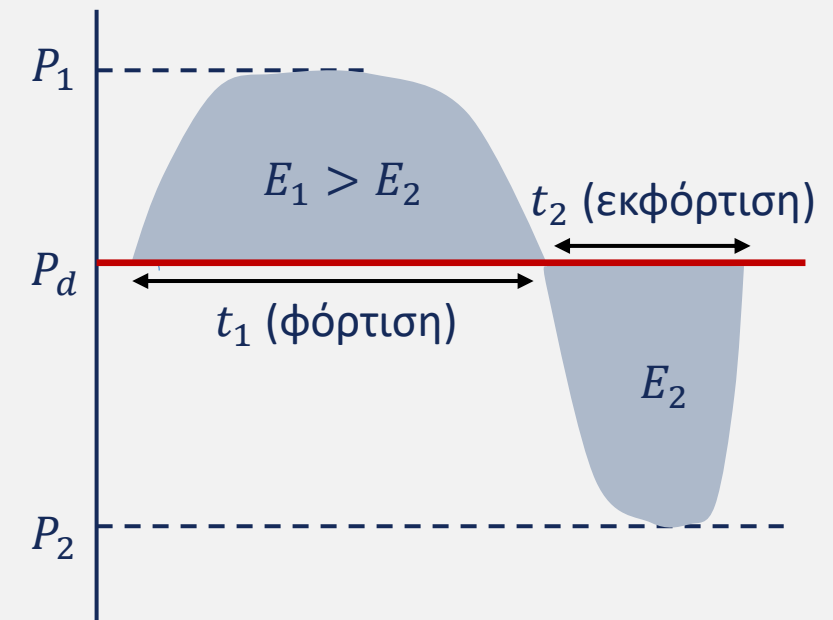
- **Παραδοσιακό μοντέλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας:**
  - Συγκεντρωτικό σύστημα καθετοποιημένης παραγωγής-μεταφοράς-διανομής
  - Λίγες μονάδες, μεγάλης ισχύος, ελεγχόμενης παραγωγής, με κεντρική διαχείριση
    - μονάδες βάσης, αργής απόκρισης (π.χ. θερμοηλεκτρικοί σταθμοί),
    - μονάδες αιχμής, γρήγορης απόκρισης (π.χ. μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα)
  - Παρακολούθηση φορτίου με προσθήκη ή αφαίρεση μονάδων παραγωγής
  - Οικονομικά κίνητρα στους καταναλωτές για χρονική εξομάλυνση των ενεργειακών χρήσεων (νυχτερινά και βιομηχανικά τιμολόγια)
- **Σύγχρονο μοντέλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας:**
  - Αποκεντρωτικό σύστημα (πολλές μονάδες κάθε ισχύος, χωρικά διασπαρμένες)
  - Σταδιακή απόσυρση θερμικών μονάδων προς όφελος των ΑΠΕ (μη ελεγχόμενη παραγωγή)
  - Έντονα ανταγωνιστικό οικονομικό περιβάλλον
  - Διασυνδέσεις μεγάλης κλίμακας (δικτύων και αγορών)

# Γενικές αρχές ηλεκτρικής ενέργειας

- Χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής ενέργειας:
  - **Ευκολία μεταφοράς** της από τις πηγές στην κατανάλωση
  - **Ευκολία μετατροπής** της σε άλλες μορφές ενέργειας (θερμότητα, ακτινοβολία, μηχανική ενέργεια, χημική ενέργεια)
  - **Αμελητέα αποθηκευτικότητα** ηλεκτρικού δικτύου (με πολύ μικρή ανοχή, της τάξης του 1-2%)
- Γενικές (τεχνικές) απαιτήσεις συστημάτων παραγωγής και διανομής:
  - Άμεση απορρόφηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την κατανάλωση → απαίτηση **συγχρονισμού της παραγωγής και ζήτησης** σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο
  - Διατήρηση **ποιότητας παρεχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος** → ελαχιστοποίηση διακυμάνσεων τάσης στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής
  - Απαιτήσεις σε **ασφάλεια** → μονάδες ταχείας εφεδρείας για άμεση εξυπηρέτηση της κατανάλωσης στην περίπτωση διακοπής λειτουργίας βασικών μονάδων
- Παράλληλη απαίτηση: ικανοποιητικά οφέλη για **επενδυτές**, ικανοποιητικές τιμές για **καταναλωτές**

# Η έννοια της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

- Η βασική ιδέα της αποθήκευσης βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας, που δύνανται να αποθηκευτούν και αργότερα να μετατραπούν εκ νέου σε ηλεκτρική ενέργεια, ακολουθώντας την αντίστοιχη ζήτηση.
- Στα συστήματα αποθήκευσης προκύπτουν δύο μορφές **απωλειών ενέργειας**:
  - κατά τις διεργασίες μετατροπής της ενέργειας (αφορά σε όλες τις τεχνολογίες)
  - λόγω αυτοεκφόρτισης (κατά περίπτωση)
- **Κύκλος ενέργειας**: ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο → μετατροπή σε άλλη μορφή και αποθήκευση → απώλειες λόγω αυτοεκφόρτισης → μετατροπή σε Η/Ε στο δίκτυο
- Εφαρμογή **μίγματος τεχνολογιών** με διαφορετικά χαρακτηριστικά (χρόνος απόκρισης, βαθμός απόδοσης κύκλου, μέγιστο βάθος εκφόρτισης, χρόνοι φόρτισης-εκφόρτισης)
- Ουσιώδους παράγοντας η **χρονική κλίμακα** της ενεργειακής αποθήκευσης (βραχυπρόθεσμη/μακροπρόθεσμη).



# Βραχυπρόθεσμη vs. μακροπρόθεσμη αποθήκευση

## □ Βραχυπρόθεσμη αποθήκευση:

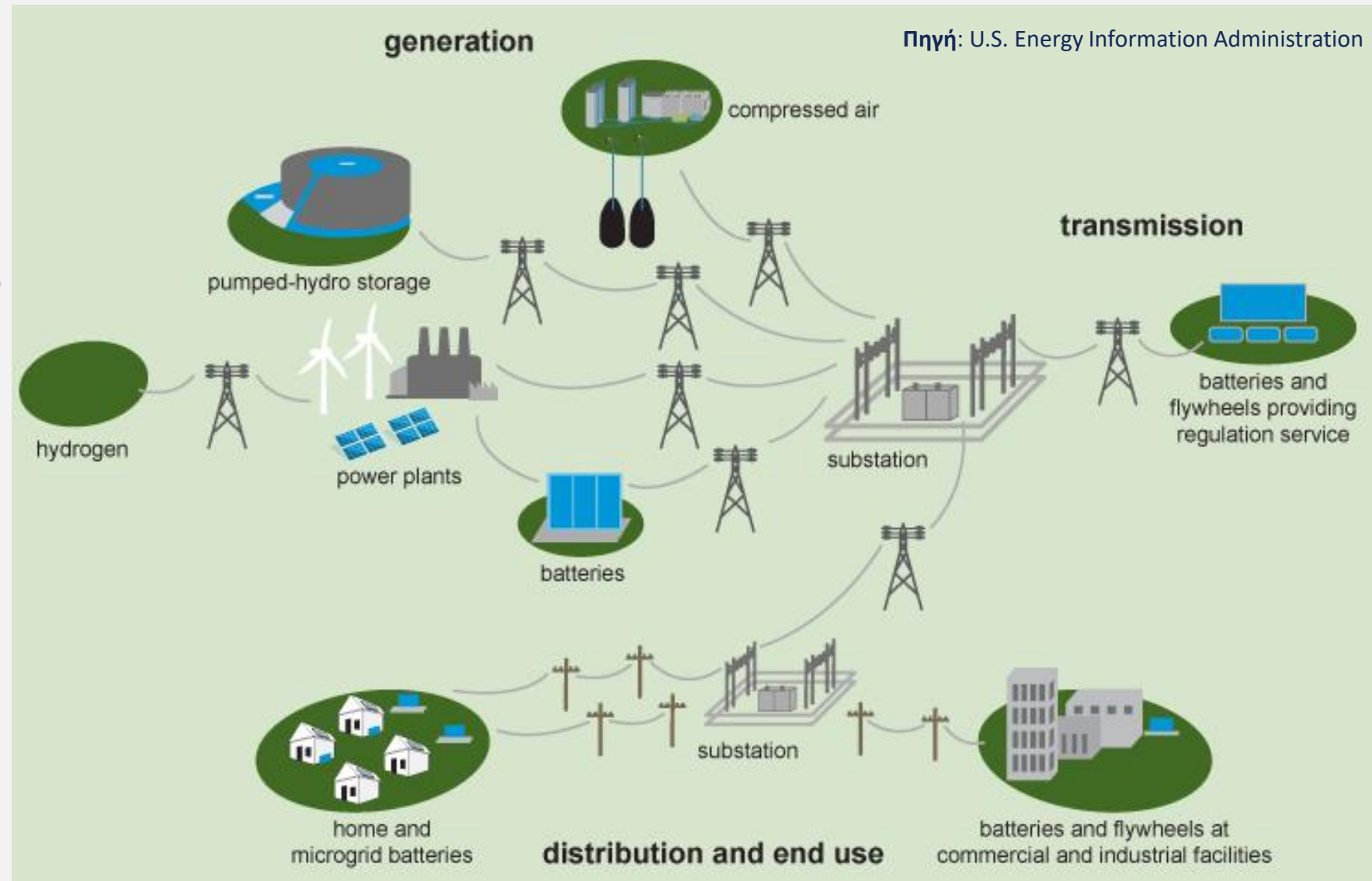
- Κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, όπου η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά στη θέση της ζήτησης, και μπορούν να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα.
- Εφαρμόζονται για βελτίωση της ποιότητας ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα, διατηρώντας σταθερή τάση σε περιπτώσεις βυθίσεων ή κυματισμών, διάρκειας λίγων δευτερολέπτων έως λεπτών.
- Τυπικές διατάξεις: σφόνδυλοι, υπερπυκνωτές, SMES

## □ Μακροπρόθεσμη αποθήκευση:

- Μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις που έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους.
- Μπορούν να αποθηκεύουν και να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε χρονικούς ορίζοντες ωρών ή και ημερών, συμβάλλοντας στη διαχείριση της πλεονάζουσας ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο.
- Τυπικές διατάξεις: αντλησιοταμίευση, μπαταρίες, αποθήκευση συμπιεσμένου ή υγροποιημένου αέρα, αποθήκευση υδρογόνου, αποθήκευση θερμότητας σε τήγμα άλατος

# Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

- **Ηλεκτρική:** υπερπυκνωτές, υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας
- **Μηχανική:** σφόνδυλοι, αποθήκευση συμπιεσμένου ή υγροποιημένου αέρα, αντλησιοταμίευση
- **Ηλεκτροχημική:** συσσωρευτές (μπαταρίες)
- **Χημική:** υδρογόνο
- **Θερμική:** θέρμανση, ψύξη
- **Έμμεση:** αξιοποίηση πλεονασμάτων Η/Ε (π.χ. φόρτιση οχημάτων)





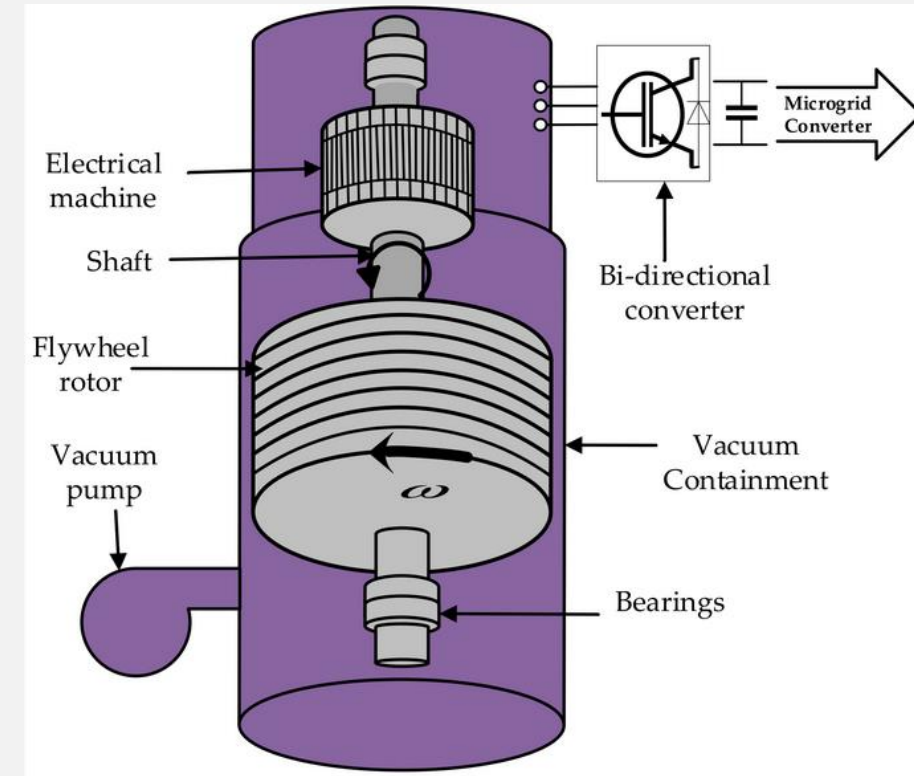
# Ηλεκτρικά μέσα αποθήκευσης

- **Υπερπυκνωτές (supercapacitors):**
  - Κλασσικοί πυκνωτές, με προσθήκη διπλού στρώματος για αύξηση της χωρητικότητας
  - Αποθήκευση σε μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού φορτίου στους οπλισμούς
  - Πλεονεκτήματα: υπερταχεία απόκριση, μεγάλο πλήθος κύκλων ζωής (~10 000)
  - Μειονεκτήματα: υψηλό επίπεδο αυτοεκφόρτισης, χαμηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας
- **Υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα (superconducting magnetic energy storage, SMES):**
  - Αξιοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε υπεραγώγιμα πηνία με τη μορφή μαγνητικού πεδίου σχεδόν μηδενικών απωλειών.
  - Πλεονεκτήματα: εξαιρετικά υψηλή συνολική απόδοση, ταχεία απόκριση, μεγάλο πλήθος κύκλων ζωής (~100 000)
  - Μειονεκτήματα: υψηλό κόστος παραγωγής λόγω πολυπλοκότητας της κατασκευής τους, και του εξοπλισμού που απαιτείται για τη διατήρηση της υπεραγωγιμότητας των υλικών του πηνίου
  - Χρήσεις: ρύθμιση συχνότητας, ποιότητα ισχύος, παροχή εφεδρειών



# Μηχανικά μέσα αποθήκευσης: Σφόνδυλοι

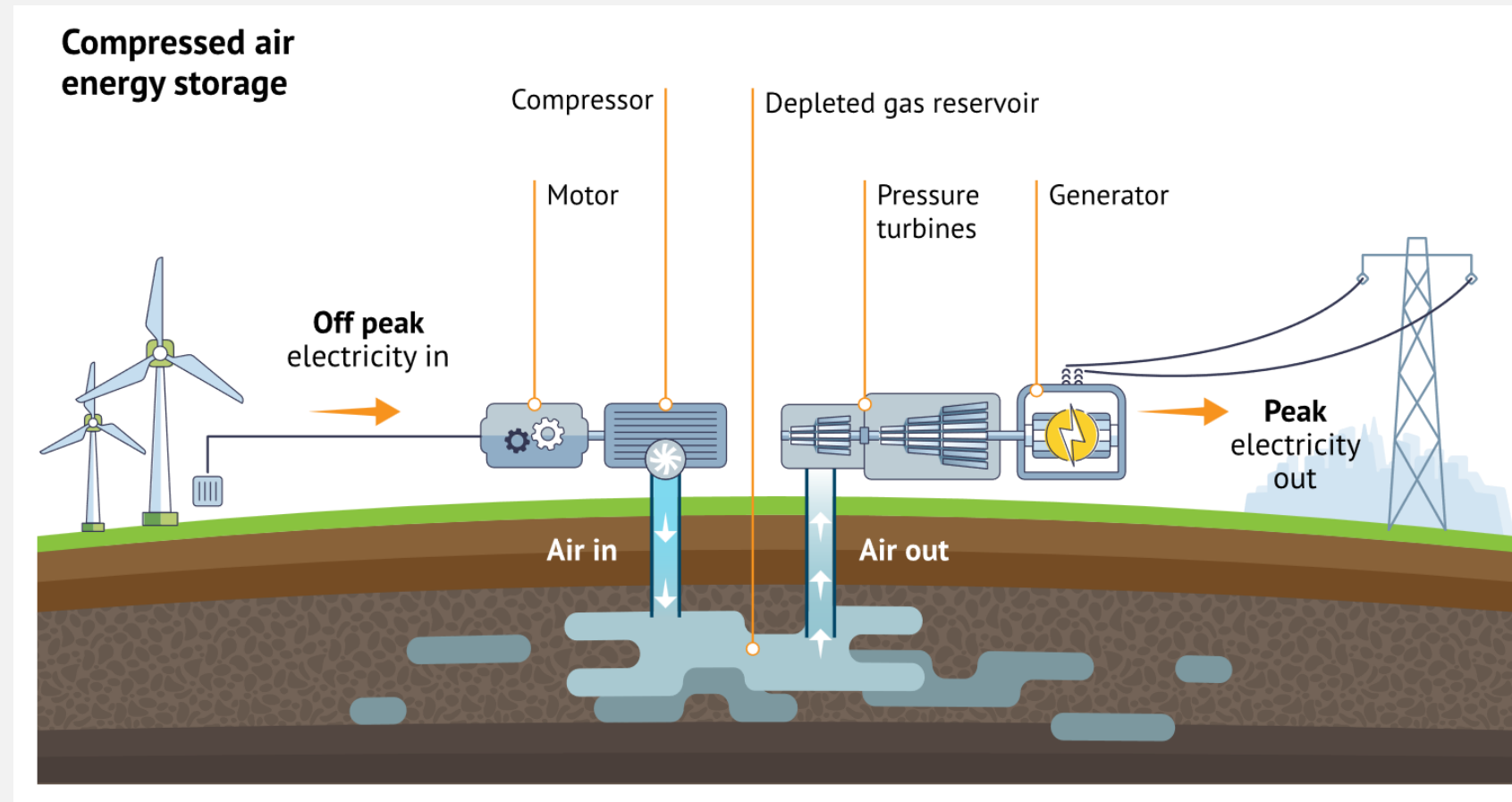
- ❑ Περιστρεφόμενος συμπαγής δίσκος, προσαρμοσμένος σε άξονα περιστροφής, που τοποθετείται σε θάλαμο κενού, το οποίο δημιουργείται μέσω μιας αντλίας αέρα, για της ελαχιστοποίηση των τριβών
- ❑ Περίσσεια ενέργειας → περιστροφή δρομέα, με ταχύτητα 20 000 έως 50 000 rpm
- ❑ Απόδοση ενέργειας → με χρήση της ροπής του περιστρεφόμενου σφονδύλου
- ❑ Αποθήκευση ενέργειας εξαρτώμενη από την περιστροφική ταχύτητα και τη ροπή αδράνειας του σφονδύλου (υψηλές απαιτήσεις σε αντοχή υλικού)
- ❑ Συνολικός βαθμός απόδοσης: έως 90%
- ❑ Απώλειες αυτοεκφόρτισης: 10 έως και 25% την ώρα
- ❑ Πλεονεκτήματα: ταχύτατη απόκριση, υψηλή ενεργειακή απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής ( $10^5$  έως  $10^7$  κύκλοι), μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον



Πηγή: Soomro, A., K.R. Pullen, & M.E. Amiryar, Hybrid PV system with high speed flywheel energy storage for remote residential loads, *Clean Technologies*, 3(2), 351-376, doi:10.3390/cleantechnol3020020, 2021.

# Μηχανικά μέσα αποθήκευσης: Συστήματα πεπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage, CAES)

- Χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για συμπίεση αέρα, που αποθηκεύεται, υπό υψηλή πίεση, σε υπόγεια δεξαμενή, και μετά θερμαίνεται και απελευθερώνεται, κινώντας συμβατικούς αεριοστρόβιλους ή ατμοστρόβιλους.
- **Φυσικά μέσα αποθήκευσης:** σπήλαια ή ορυχεία (αλατιού) → περιορισμένος αριθμός κατάλληλων χώρων, σε παγκόσμια κλίμακα
- **Τεχνητά μέσα:** χαλύβδινες δεξαμενές, πολύ μεγάλης αντοχής → υψηλό κόστος

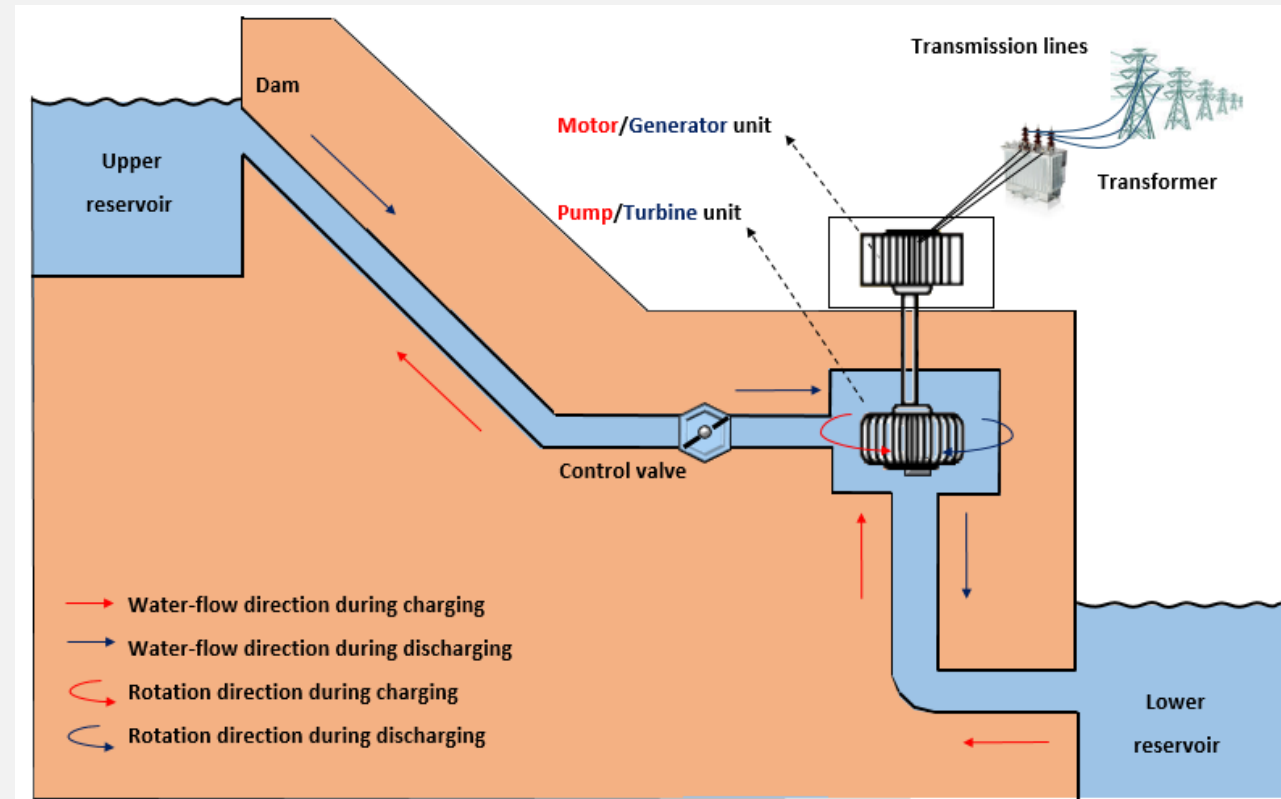


# Μηχανικά μέσα αποθήκευσης: Αντλησιοταμίευση

- Δύο διασυνδεδεμένες μονάδες αποθήκευσης (ταμιευτήρες, δεξαμενές) σε **μεγάλη υψομετρική διαφορά** αλλά σε **μικρή απόσταση**
- Ένας **αντιστρέψιμος υδροστρόβιλος** που χρησιμοποιείται ως αντλία για να ανυψώσει το νερό από την κάτω προς την άνω δεξαμενή, και ως στρόβιλος για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της αντίστροφης διαδρομής.

## Σε παγκόσμια κλίμακα:

- Αποτελεί το 94% της εγκατεστημένης ισχύος σε μέσα αποθήκευσης ενέργειας
- Συνολική ισχύς: ~200 GW
- Προβλέπεται η ανάπτυξη επιπλέον 214 GW
- Πρόσθετη ενέργεια: 9.0 TWh
- Θεωρητικό δυναμικό: 22 000 TWh
- Πρώτη εγκατάσταση: 1907 (Engeweiher, Ελβετία)
- Μεγαλύτερη μονάδα: 3.6 GW (Fengning, Κίνα)



# Ηλεκτροχημικά μέσα αποθήκευσης: Ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες)

- **Γενική αρχή:** Δύο ηλεκτρόδια (ανόδου & καθόδου), που παρεμβάλλονται από ηλεκτρολυτικό υλικό, και μεταφέρουν μεταξύ τους ιόντα, παράγοντας ή απορροφώντας ενέργεια, ανάλογα με τη φορά ροής των ιόντων.
- Μπαταρίες Μολύβδου – Οξέως (Lead-acid):
  - Παλαιά και φθηνή τεχνολογία
  - Μικρός κύκλος ζωής, ταχεία αυτοεκφόρτιση, μικρή πυκνότητα ενέργειας
  - Υποστηρικτικές διατάξεις σε αιολικά και Φ/Β πάρκα
- Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-Ion)
  - Τρέχουσα τεχνολογία για ηλεκτρικά δίκτυα
  - Πολύ υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας, υψηλή απόδοση, διάρκεια ζωής  $>10^3$  κύκλοι
  - Αλλοιώσεις όταν υπερφορτίζονται ή υπερεκφορτίζονται (+ κίνδυνος ανάφλεξης) → ειδικά συστήματα προστασίας → αύξηση κόστους
- Λοιπά: Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd), Νικελίου – Μετάλλου Υδριδίου (NiMH), Θείου – Νατρίου (NaS)



# Χημικά μέσα αποθήκευσης: «Πράσινο» υδρογόνο

- ❑ Υδρογόνο: φυσικό καύσιμο σε αφθονία, απαιτεί ενέργεια για τη διάσπασή του
- ❑ «Πράσινο» υδρογόνο: παραγωγή μέσω ηλεκτρόλυσης, με ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτείται από ΑΠΕ (σε αντίθεση με λοιπές μορφές, ήτοι «μπλε», «γκρι», «καφέ»)
- ❑ Δύο τρόποι αξιοποίησης:
  - παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (βαθμός απόδοσης 50%, σε συμβατικές μονάδες καύσης, ή 60%, σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου)
  - απευθείας χρήση ως καύσιμο
- ❑ Χωρικές κλίμακες αποθήκευσης:
  - Μικρές ποσότητες (<10 MWh), σε πολύ υψηλή πυκνότητα: βαρέλια υπό πίεση, υδρίδια στερεών μετάλλων, νανοσωλήνες
  - Μεσαίες ποσότητες: δεξαμενές
  - Μεγάλες ποσότητες (της τάξης των 100 GWh): υπόγειες στοές (500 000 m<sup>3</sup>, 2900 psi)



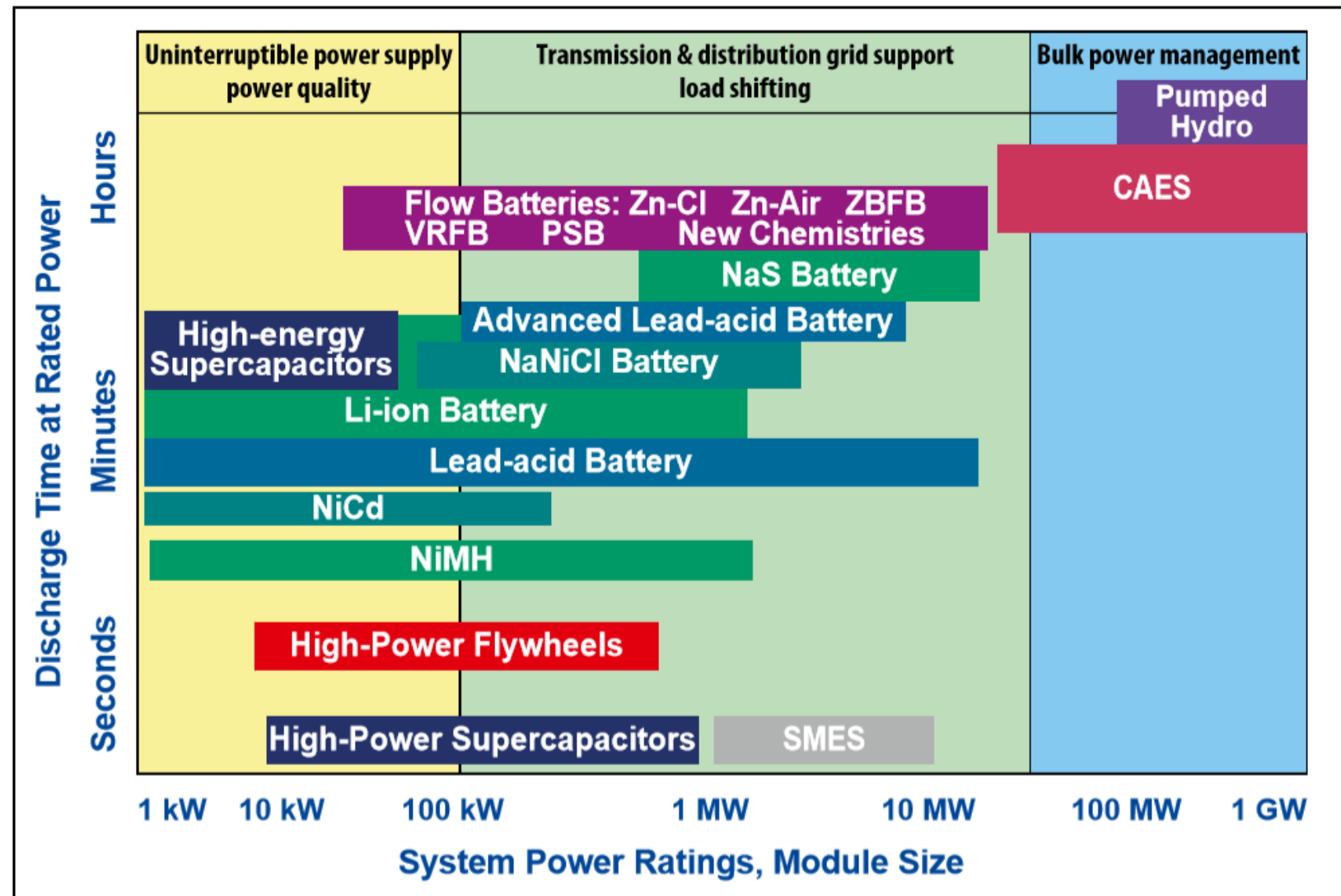
# Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών

System	Max. Power Rating (MW)	Efficiency (%)	Discharge Time	Cost/KW (USD)	Cost/KWh (USD)	Energy Density (Wh/L)	System	Life Time/ Cycles	Environmental Impact
PHS	3000	70–85	4 h–16 h	600–2000	5–100	0.2–2	PHS	30–60 years	-ve
CAES	1000	40–70	2 h–30 h	400–800	2–50	2–6	CAES	20–40 years	-ve
FES	20	70–95	sec–mins	250–350	1000–5000	20–80	FES	20,000–100,000	Negligible
Lead-acid	100	80–90	1 min–8 h	300–600	200–400	50–80	Lead-acid	6–40 years	-ve
NiCd/NiMH	40		sec–hours	500–1500	800–1500	60–150	NiCd/NiMH	10–20 years	-ve
Li-ion	100	85–95	1 min–8 h	1200–4000	600–2500	200–400	Li-ion	1000–10,000	-ve
Metal-air	0.01	50	secs–day	100–250	10–60	500–10,000	Metal-air	100–300	Very small
Sodium-sulfur	0.05–8	75–90	sec–hours	1000–3000	300–500	150–250	Sodium-sulphur	10–15 years	-ve
RFB/HFB	100	60–85	hours	700–2500	150–1000	20–70	RFB/HFB	12,000–14,000	-ve
H2	100	25–45	min–week		10	600	H2	5–30 years	Yes
Fuel Cell	50	60–80	secs–day	10,000		500–3000	Fuel Cell	5–15 years	-ve
SMES	10 MW	95	millisec–secs	200–300	1000–10,000	0.2–2.5	SMES	20 years	-ve
Thermal	150	80–90	hours	200–300	30–60	70–210	Thermal	30 years	Small

Πηγή: Chakraborty, M.R., *et al.*, A comparative review on energy storage systems and their application in deregulated systems, *Batteries*, 8, 124, doi:10.3390/batteries8090124, 2022.

# Η έννοια της κλίμακας στα συστήματα αποθήκευσης

- Η έννοια της κλίμακας ενός συστήματος αναφέρεται:
  - στο μέγεθός του, σε όρους **ονομαστικής ισχύος**
  - στο **χρόνο φόρτισης**.
- Τα παραπάνω μεγέθη καθορίζουν την **ενεργειακή αυτονομία** του συστήματος.
- Η **αντλησιοταμίευση** (pumped hydropower storage, PHS) είναι η μόνη καταξιωμένη τεχνολογία μεγάλης κλίμακας και ως προς τα δύο χαρακτηριστικά.





# Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στη μεγάλη κλίμακα

- Πώς «συγχρονίζεται» η παραγωγή με τη ζήτηση αν δεν υπάρχει αποθήκευση;
  - Απόρριψη φορτίου ή εξαγωγή του σε πολύ χαμηλή τιμή, όταν υπάρχει **περίσσεια** παραγωγής
  - Υπερδιαστασιολόγηση συστήματος παραγωγής (διατήρηση εφεδρειών), σε συνδυασμό με εισαγωγές ενέργειας (σε ποια τιμή;), για την κάλυψη των **ελλειμμάτων** (υψηλά κόστη επένδυσης και λειτουργίας)
- Γενικές αρχές συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στη μεγάλη κλίμακα:
  - **Φόρτιση** σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (γενικότερα: όταν η προσφορά υπερβαίνει τη ζήτηση)
  - **Εκφόρτιση** για παραγωγή ενέργειας, με σκοπό την κάλυψη ελλειμμάτων της ζήτησης (συνήθως αναφέρονται στις ώρες αιχμής)
- Η περίσσεια και ελλείμματα ενέργειας συνδέονται πλέον και με τις αντίστοιχες τιμές στο χρηματιστήριο ενέργειας, οι οποίες υπόκεινται σε **έντονες ενδοημερήσιες μεταβολές** λόγω της έντονης διείσδυσης των ΑΠΕ (διακοπή λειτουργίας Φ/Β → φαινόμενο «πάπιας»).
- Η αποθήκευση ενέργειας στη μεγάλη κλίμακα, πέραν του ότι αποτελεί **επείγουσα τεχνική ανάγκη** για τη χώρα, αποτελεί και **επενδυτική ευκαιρία**.

# Σχηματικά διαγράμματα φόρτισης-εκφόρτισης ημερήσιου κύκλου

EES in peak shaving

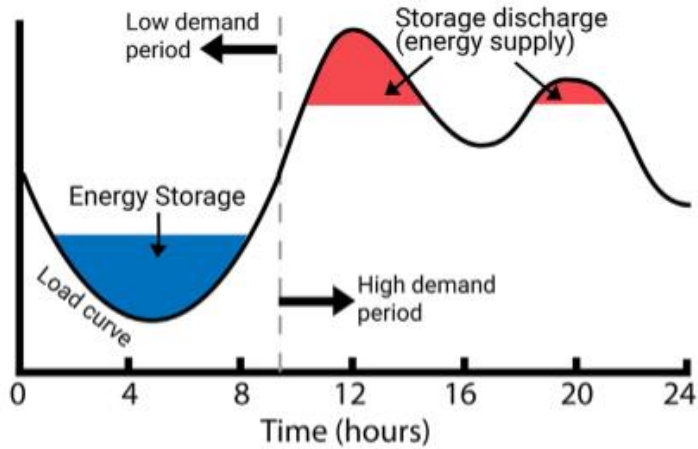
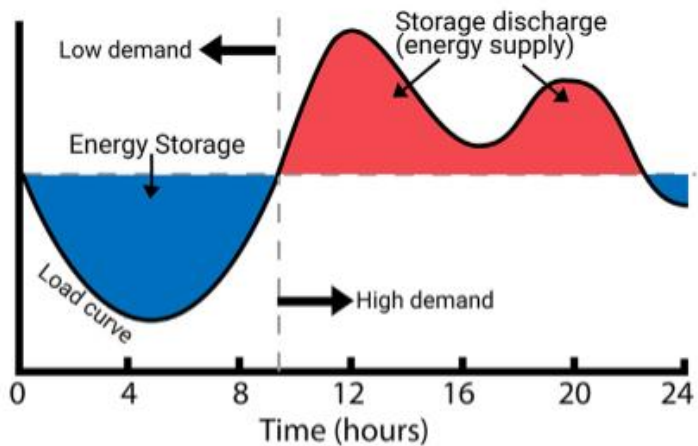
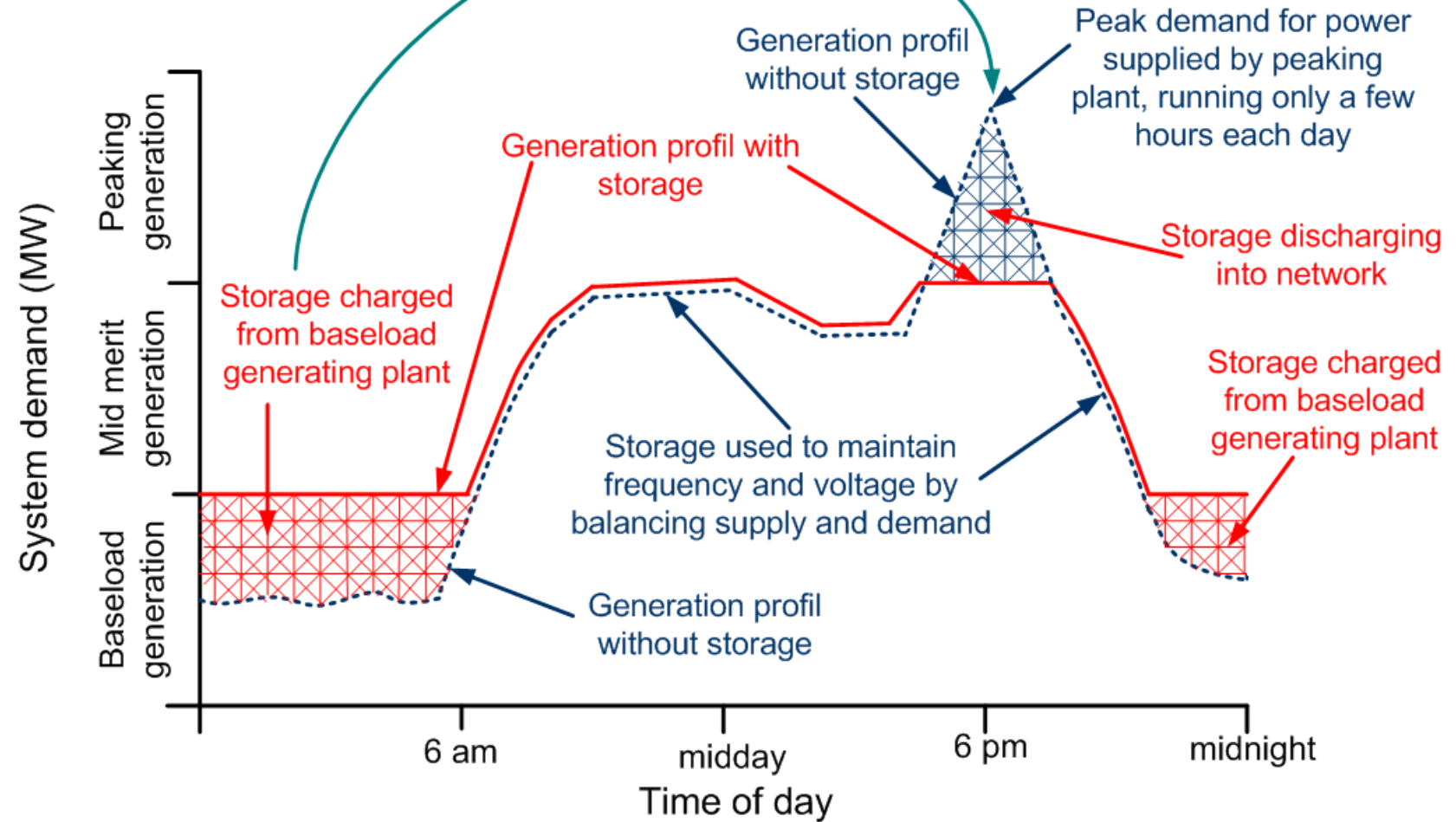


Fig. 20. Energy storage load profile in peak shaving.

EES in load leveling



Transfer of the available energy during off-peak periods to the high demand periods



# **Μέρος Β: Σχεδιασμός και λειτουργία συστημάτων αντλησιοταμίευσης**

# Γενικές αρχές σχεδιασμού έργων αντλησιοταμίευσης

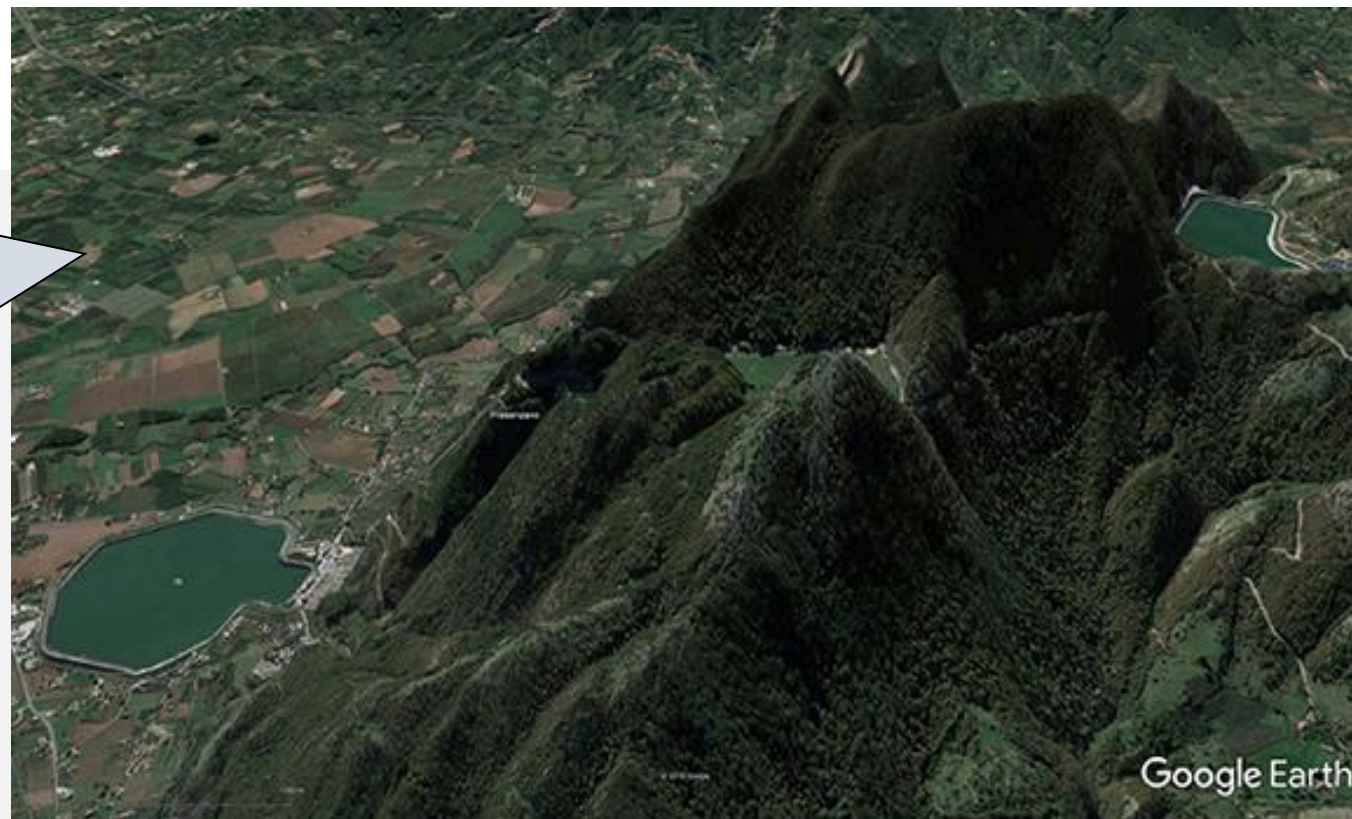
- Γενική απαίτηση χωροθέτησης έργων ταμίευσης: Ελαχιστοποίηση οριζόντιας απόστασης και μεγιστοποίηση υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των δύο ταμιευτήρων, ώστε να εξασφαλίζεται **μεγάλο ακαθάριστο ύψος πτώσης με μικρές υδραυλικές απώλειες κατά τη μεταφορά του νερού**.
- Τυπικές διατάξεις:
  - Σύνδεση δύο ταμιευτήρων σε σειρά (σύστημα πλήρως ανοιχτού κύκλου)
  - Αξιοποίηση υφιστάμενου ταμιευτήρα ως κάτω δεξαμενή, και διαμόρφωση άνω δεξαμενής, πολύ μικρότερης χωρητικότητας
  - Διαμόρφωση κλειστού συστήματος, αποτελούμενου από δύο δεξαμενές ίσης χωρητικότητας.
- **Θεμελιώδη μεγέθη σχεδιασμού**:
  - Όγκος νερού που ανακυκλώνεται,  $V \rightarrow$  προσδιορισμός ωφέλιμης χωρητικότητας μικρής δεξαμενής
  - Ενέργεια παραγωγής,  $E_{gen}$ , και καταναλισκόμενη ενέργεια άντλησης,  $E_{pump}$
  - Χρόνος παραγωγής,  $T_{gen}$ , και άντλησης,  $T_{pump} \rightarrow$  προσδιορισμός ισχύος στροβίλων και αντλιών:

$$P_{gen} = E_{gen}/T_{gen} \text{ και } P_{pump} = E_{pump}/T_{pump}$$



# Παραδείγματα

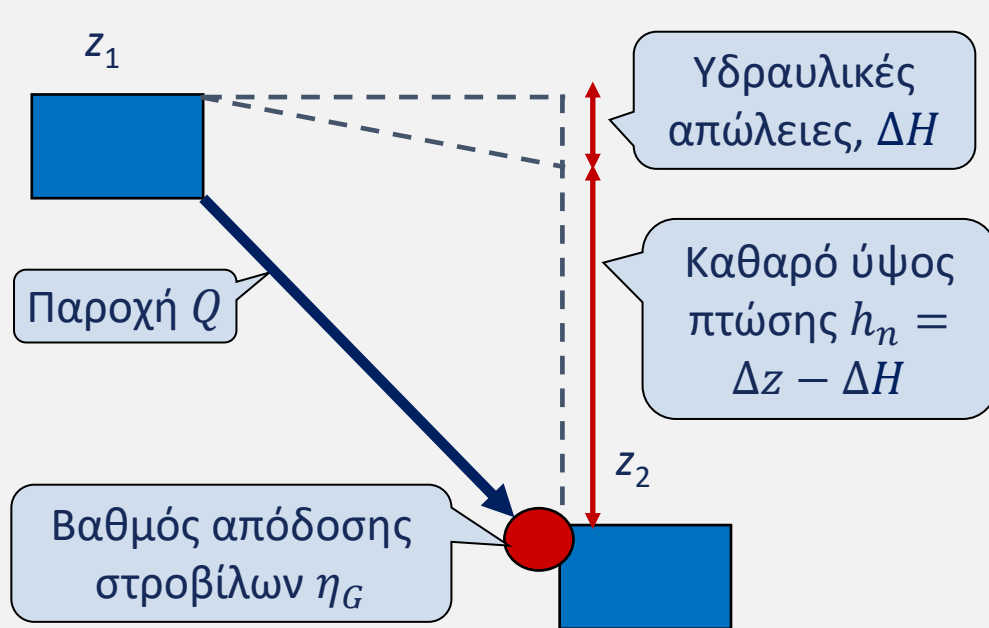
**Presenzano, Ιταλία:** δύο λιμνοδεξαμενές ίσης χωρητικότητας ( $6.0 \text{ hm}^3$ ) σε υψομετρική διαφορά 495 m, συνολικής ισχύος 1000 MW (τέσσερις αναστρέψιμοι στρόβιλοι τύπου Francis). Η κατασκευή του έργου ξεκίνησε το 1979, και τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το 1991



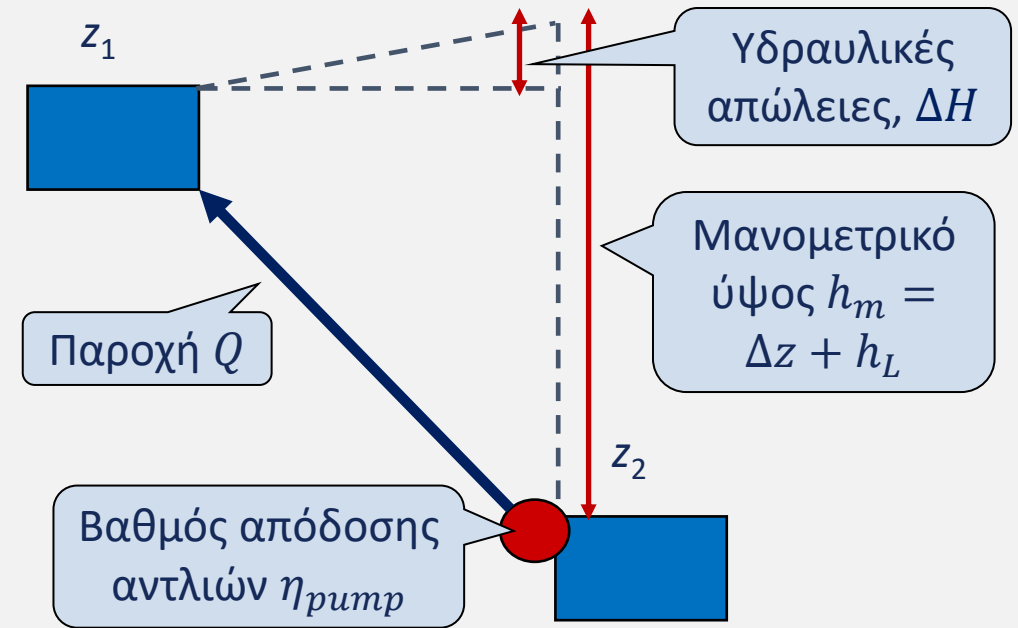
**Tumut 3, Αυστραλία:** Πρώτο έργο στη χώρα (έναρξη κατασκευής: 1968, έναρξη λειτουργίας: 1972, αναβάθμιση: 2012); έξι στρόβιλοι ισχύος 1800 MW, εκ των οποίων οι τρεις λειτουργούν και ανάστροφα; ύψος πτώσης 150.9 m; έξι αγωγοί πτώσης μήκους 488 m και διαμέτρου 5.6 m; κάτω ταμιευτήρας Talbingo ( $920 \text{ hm}^3$ ), άνω ταμιευτήρας Jounama ( $43.5 \text{ hm}^3$ )

# Βασικοί υδροενεργειακοί υπολογισμοί

- Ακαθάριστο ύψος πτώσης:  $H = z_1 - z_2 = \Delta z$
- Παραγόμενη ενέργεια:  $E_{gen} = \gamma \eta_{gen} V h_n$ , όπου  $h_n = \Delta z - \Delta H$  (καθαρό ύψος πτώσης)
- Καταναλισκόμενη ενέργεια:  $E_{pump} = \gamma V h_m / \eta_{pump}$ , όπου  $h_m = \Delta z + \Delta H$  (μανομετρικό ύψος)
- Συνολική απόδοση κύκλου:  $\eta_{PHS} = E_{gen} / E_{pump} = \eta_{gen} \eta_{pump} (\Delta z - \Delta H) / (\Delta z + \Delta H)$



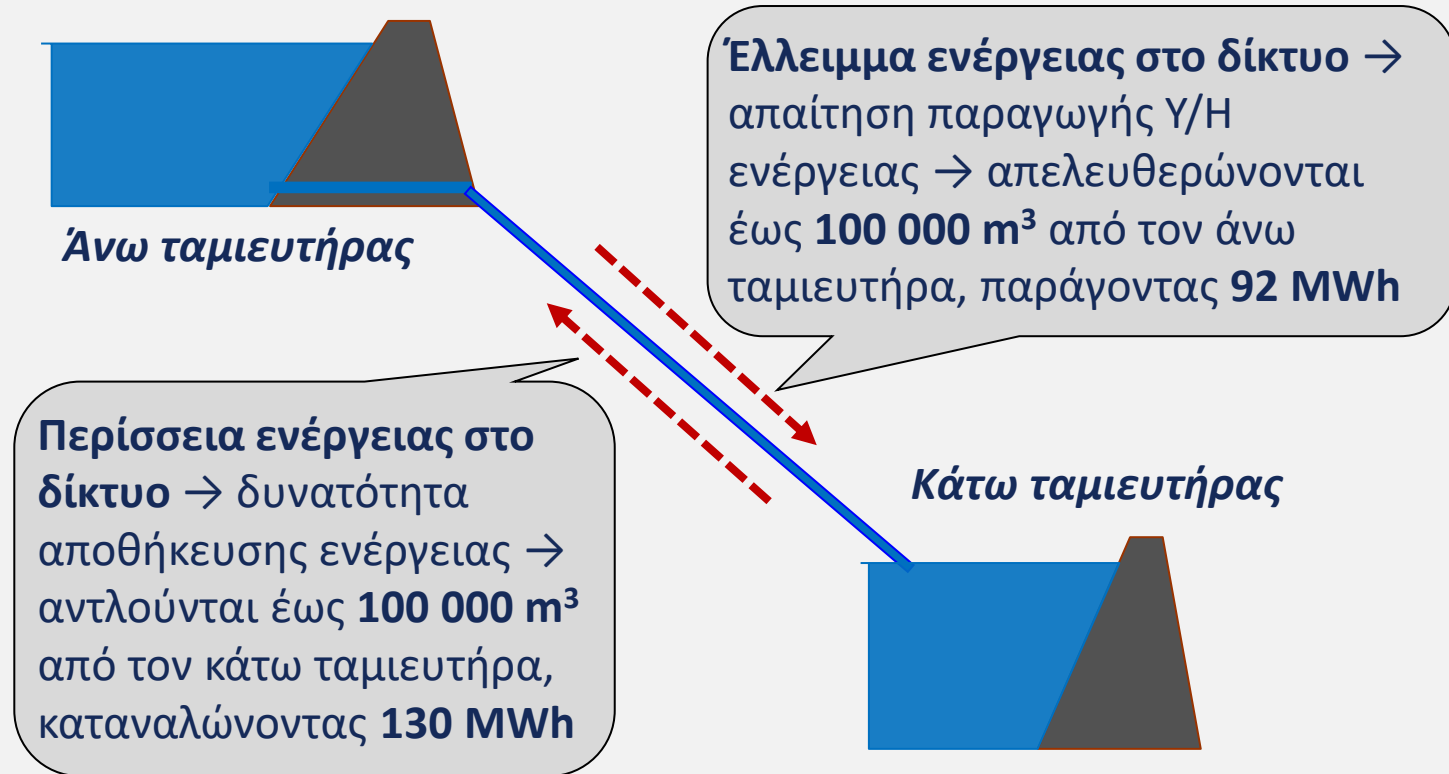
**Φάση παραγωγής (εκφόρτιση)**



**Φάση άντλησης (φόρτιση)**

# Αριθμητική εφαρμογή

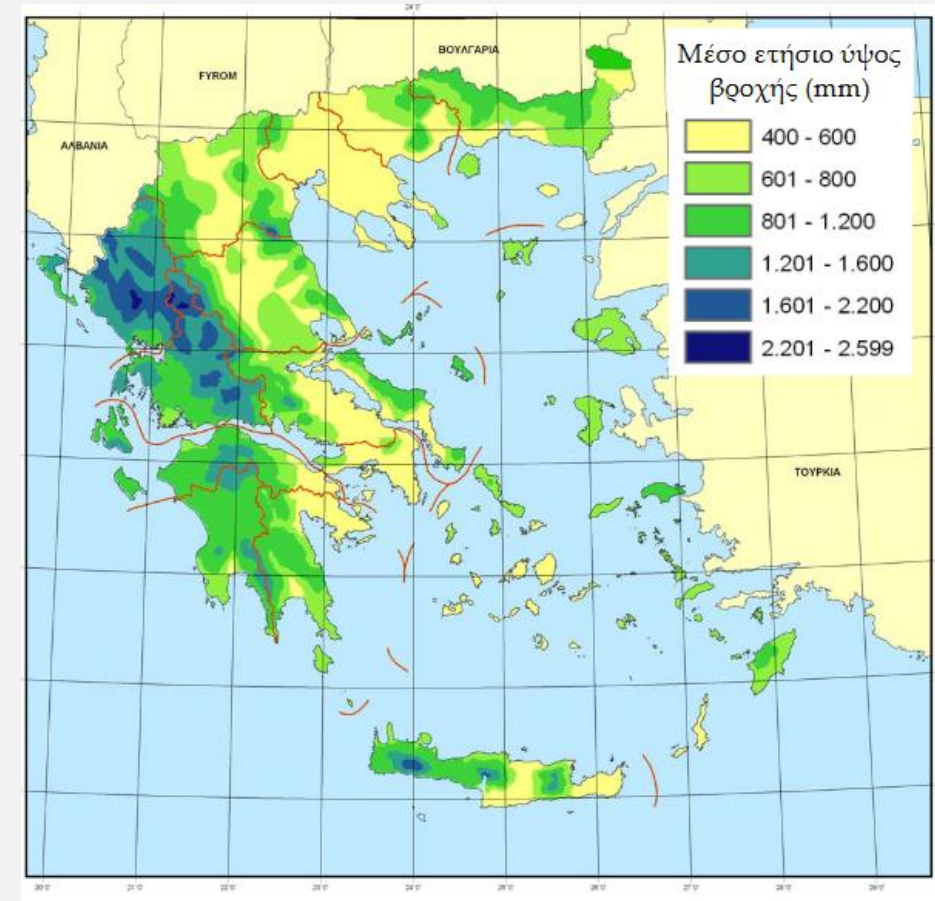
- Δεξαμενές ίσης χωρητικότητας  $100\ 000\ \text{m}^3$ , σε υψομετρική διαφορά  $400\ \text{m}$ , με πρακτικά σταθερή στάθμη
- Ανακύκλωση όγκου  $100\ 000\ \text{m}^3$  σε συνολικό διάστημα μια ημέρας
- Υδραυλικές απώλειες στον αγωγό:  $5\ \text{m}$  (εκτίμηση, 2% του ακαθάριστου ύψους πτώσης)
- Καθαρό ύψος πτώσης:  $400 - 5 = 395\ \text{m}$ , μανομετρικό ύψος:  $400 + 5 = 405\ \text{m}$
- Βαθμός απόδοσης  $0.85$  (κοινός, κατά προσέγγιση, για άντληση και παραγωγή)
- Θεωρώντας ισχύ  $10\ \text{MW}$  προκύπτουν  $13$  ώρες άντλησης και  $9.2$  ώρες παραγωγής
- Απόδοση κύκλου:  $92/130 = 70.5\%$
- Για να συμφέρουσα η λειτουργία του έργου, ο λόγος της τιμής πώλησης προς την τιμή αγοράς του ρεύματος θα πρέπει να υπερβαίνει το  $1/\eta_{PHS} \approx 1.42$





# Απώλειες «αυτοεκφόρτισης» σε συστήματα κλειστού κύκλου

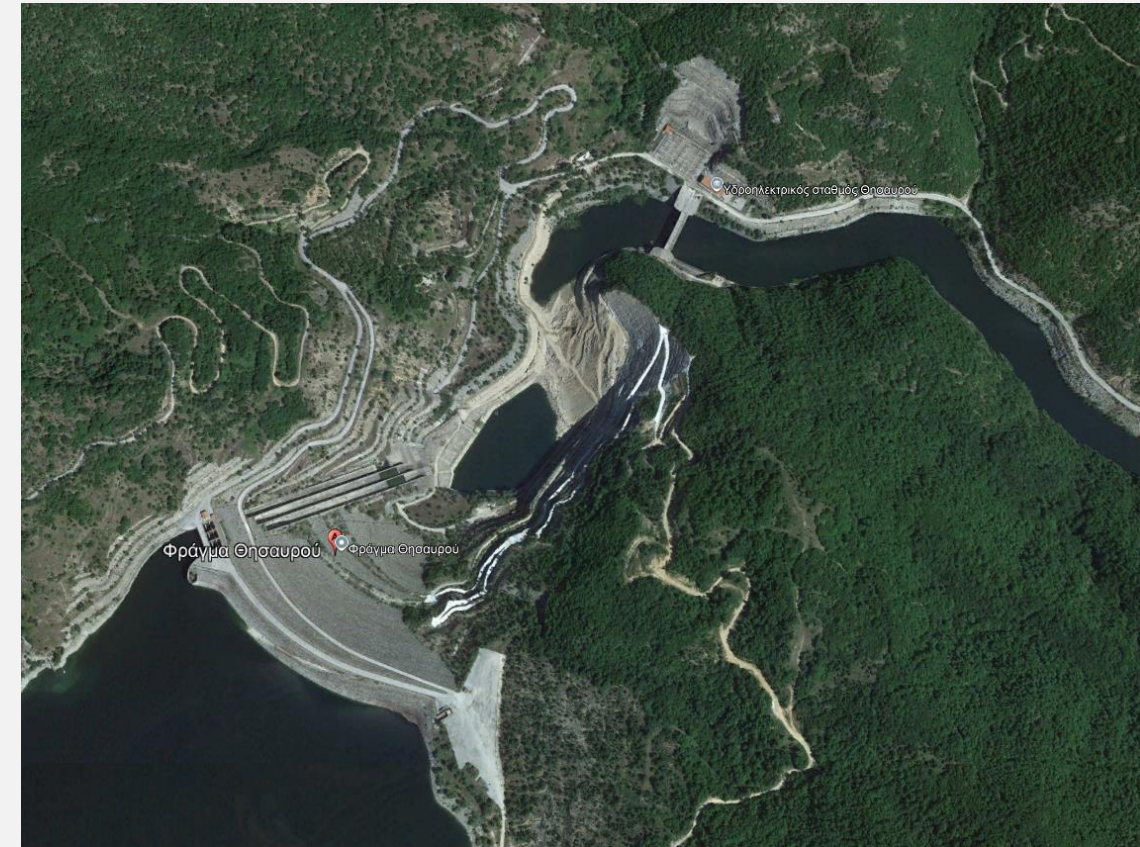
- ❑ Οι απώλειες νερού κατά την μεταφορά του και αποθήκευσή του στις δεξαμενές οδηγούν σε απώλειες ενέργειας, που είναι αντίστοιχες της αυτοεκφόρτισης άλλων μέσων αποθήκευσης (π.χ. μπαταρίες).
- ❑ Γενικά οι απώλειες μεταφοράς είναι αμελητέες (αγωγοί πολύ υψηλής αντοχής, χωρίς διαρροές)
- ❑ Οι απώλειες κατά την αποθήκευση του νερού εξαρτώνται:
  - από τη στεγνότητα των δεξαμενών/ταμιευτήρων
  - από το ισοζύγιο βροχής-εξάτμισης
- ❑ Στα δυτικά ορεινά τμήματα της χώρας, το ισοζύγιο βροχής-εξάτμισης είναι ελαφρά θετικό (μέση ετήσια βροχόπτωση > 1500 mm, μέση εξάτμιση < 1500 mm)
- ❑ Στα ανατολικά τμήματα και τις Κυκλάδες, το ισοζύγιο βροχής-εξάτμισης είναι έντονα αρνητικό (μέση ετήσια βροχόπτωση < 500 mm, μέση εξάτμιση > 1800 mm) → ανέφικτη η ανάπτυξη συστημάτων πλήρως κλειστού κύκλου, αν δεν έχει προβλεφθεί συστηματική αναπλήρωση των απωλειών





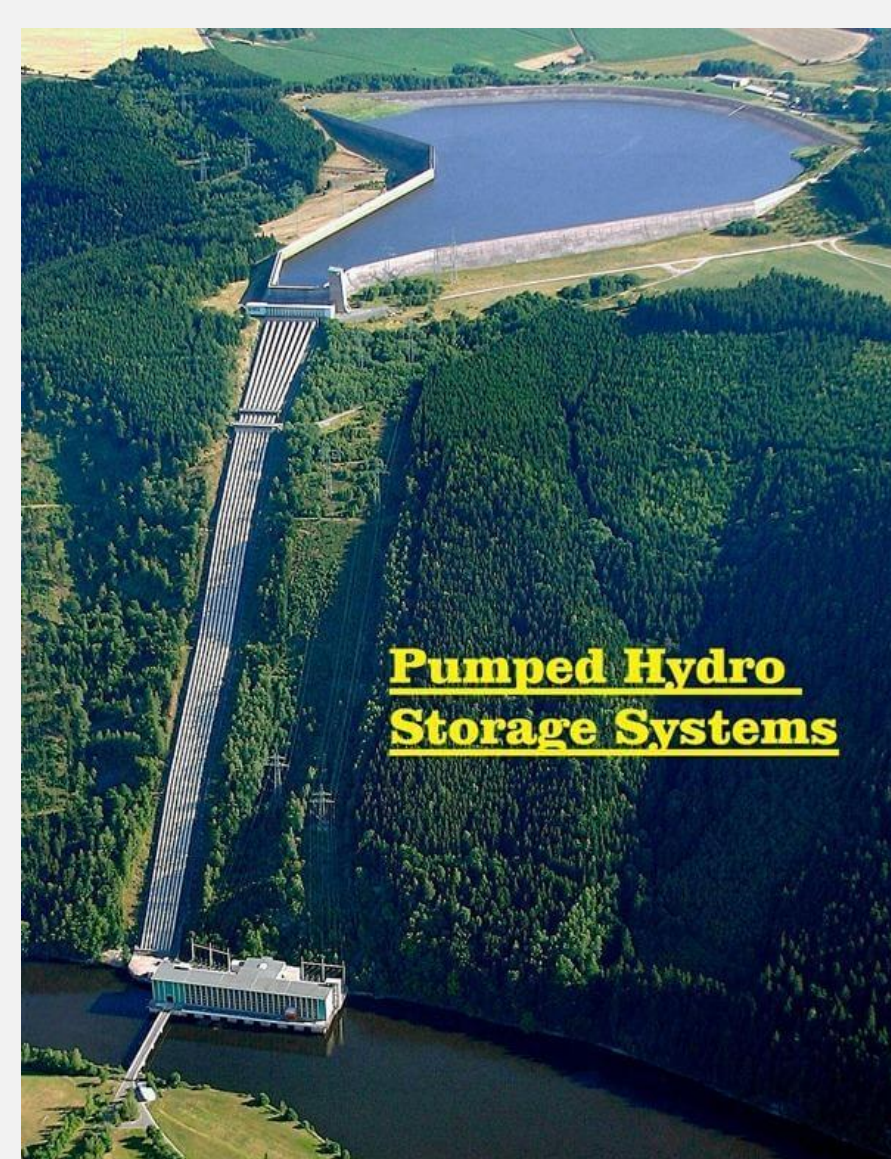
# Αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ

- Δύο έργα ανοιχτού κύκλου, σε διασυνδεδεμένους ταμιευτήρες σε σειρά:
  - Αλιάκμονας: Σφηκιά-Ασώματα (1986), 315 MW, παραγωγή 380 GWh (από άντληση 200 GWh)
  - Νέστος: Θησαυρός-Πλατανόβρυση (1999), 384 MW, συνολική παραγωγή 440 GWh





# Προσθήκη άνω δεξαμενής σε υφιστάμενο ταμιευτήρα





# Προσθήκη πολλαπλών δεξαμενών σε υφιστάμενο ταμιευτήρα



# Προκλήσεις και περιορισμοί κατά τον σχεδιασμό

- ❑ Η **διακύμανση της στάθμης** του νερού στον υφιστάμενο ταμιευτήρα, από τον οποίο το νερό αντλείται, θα πρέπει να είναι μικρή, της τάξης των λίγων μέτρων, για λειτουργικούς και οικονομικούς λόγους.
- ❑ Η **οριζόντια απόσταση** ανάμεσα στον άνω και στον υφιστάμενο κάτω ταμιευτήρα να είναι όσο δυνατόν μικρότερη, για ελαχιστοποίηση του μήκους των έργων προσαγωγής (υδραυλικές απώλειες & κόστος)
- ❑ Αντίθετα, η **κατακόρυφη απόσταση** μεταξύ του άνω και κάτω ταμιευτήρα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη (μεγιστοποίηση υδροδυναμικού).
- ❑ Κατάλληλες θέσεις για τη **διαμόρφωση του άνω ταμιευτήρα** είναι είτε φυσικά κοιλώματα του εδάφους, είτε κοιλάδες που μπορούν να δημιουργήσουν μια λεκάνη κατάκλυσης με την κατασκευή φράγματος, ή επίπεδες περιοχές όπου μια τεχνητή λεκάνη (λιμνοδεξαμενή) θα μπορούσε να σχηματιστεί εν μέρει ή εξ ολοκλήρου με εκσκαφή
- ❑ Φυσικά κοιλώματα του εδάφους απαιτούν πάντα την εφαρμογή **υδατοστεγανών στοιχείων** (π.χ. γεωμεμβράνες), ώστε να εξασφαλιστεί πολύ χαμηλή διαπερατότητα του πυθμένα και των πρανών.
- ❑ Λειτουργικοί περιορισμοί για την άντληση απαιτούν ο άξονας της μονάδας να είναι τοποθετημένος αρκετά **κάτω από την ελάχιστη στάθμη λειτουργίας** του κάτω ταμιευτήρα (συνήθως 15 έως 20 m).



# Έργο αντλησιοταμίευσης στη θέση ταμιευτήρας ΥΗΣ Σφηκιάς (Μπράβα)

- ❑ Αξιοποίηση ταμιευτήρα Σφηκιάς ως κάτω δεξαμενή, και σύνδεσή του με ταμιευτήρα που θα διαμορφωθεί σε κοντινό οροπέδιο (θέση Μπράβα)
- ❑ Σφηκιά: ενδιάμεσο ΥΗΕ συγκροτήματος Αλιάκμονα, με ωφέλιμο όγκο  $18 \text{ hm}^3$  και εύρος στάθμης  $4.2 \text{ m}$  (ΚΣΛ  $+141.8 \text{ m}$ , ΑΣΛ  $+146.0 \text{ m}$ )
- ❑ Ταμιευτήρας (λιμνοδεξαμενή) Μπράβας:
  - Ανώτατη στάθμη λειτουργίας  $+560.0 \text{ m}$
  - Κατώτατη στάθμη λειτουργίας  $+552.3 \text{ m}$  για 8 ώρες παραγωγή ( $+530.0 \text{ m}$  για 21 ώρες)
  - Μέγιστη επιφάνεια  $544$  στρέμματα (στην ΑΣΛ)
  - Ωφέλιμη χωρητικότητα  $3.8 \text{ hm}^3$  για 8 h παραγωγή & 11 h άντληση ( $10.0 \text{ hm}^3$  για 21/29 h)
  - Ισχύς  $441 \text{ MW}$  (παραγωγή) και  $467 \text{ MW}$  (άντληση).





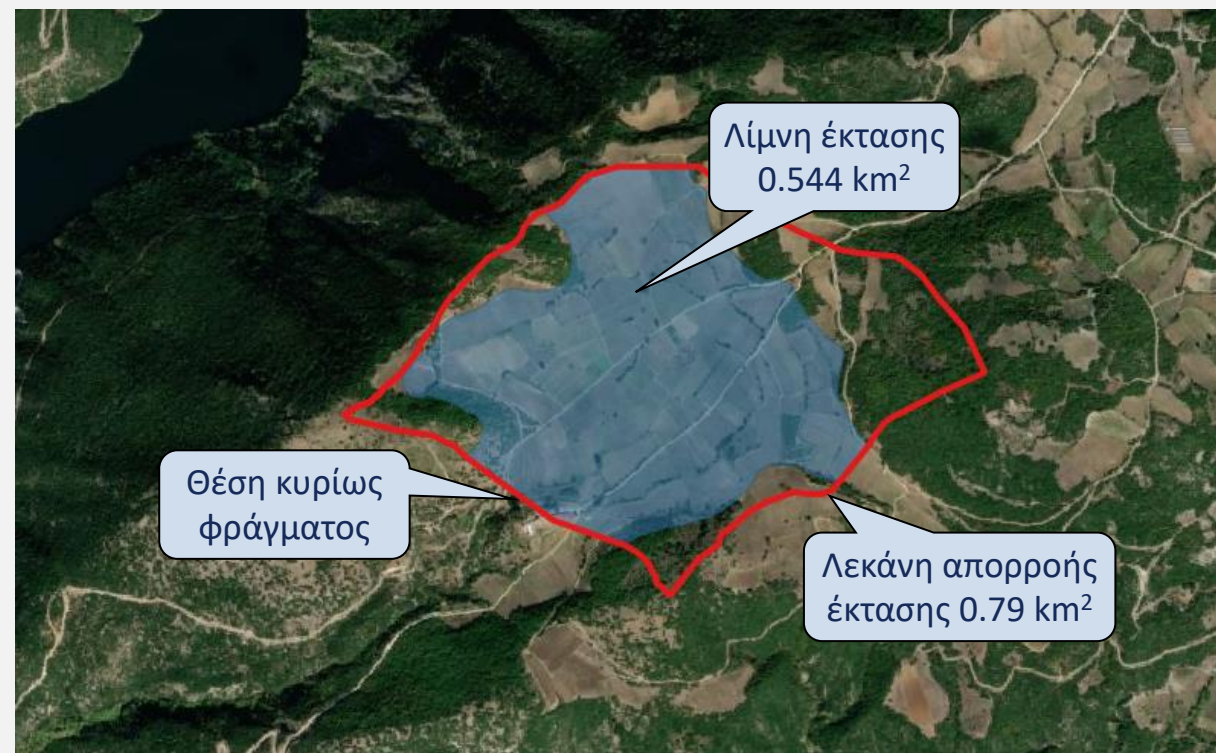
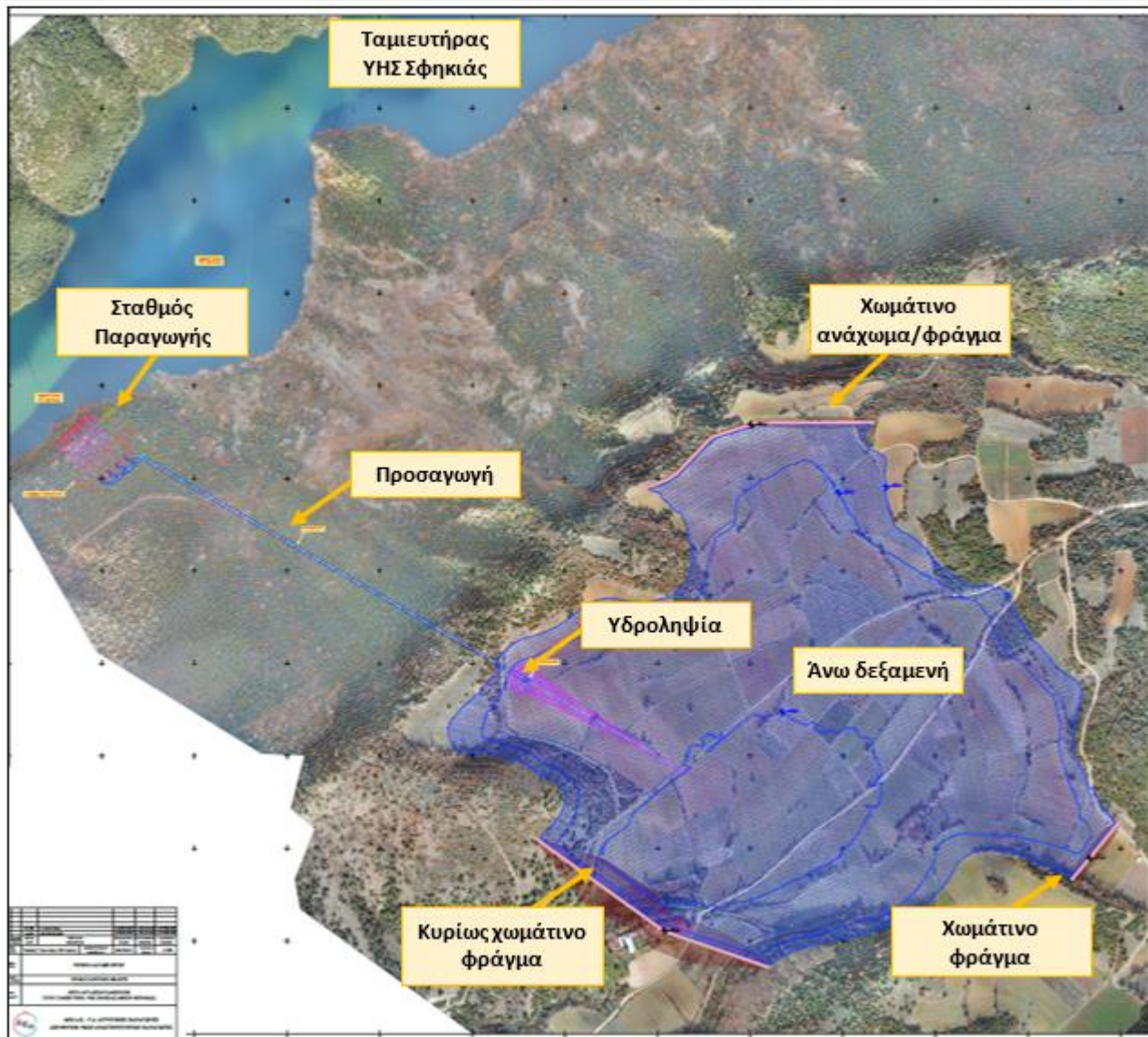
# Έργο αντλησιοταμίευσης Μπράβας: Χωροθέτηση άνω ταμιευτήρα



Image © 2024 Airbus

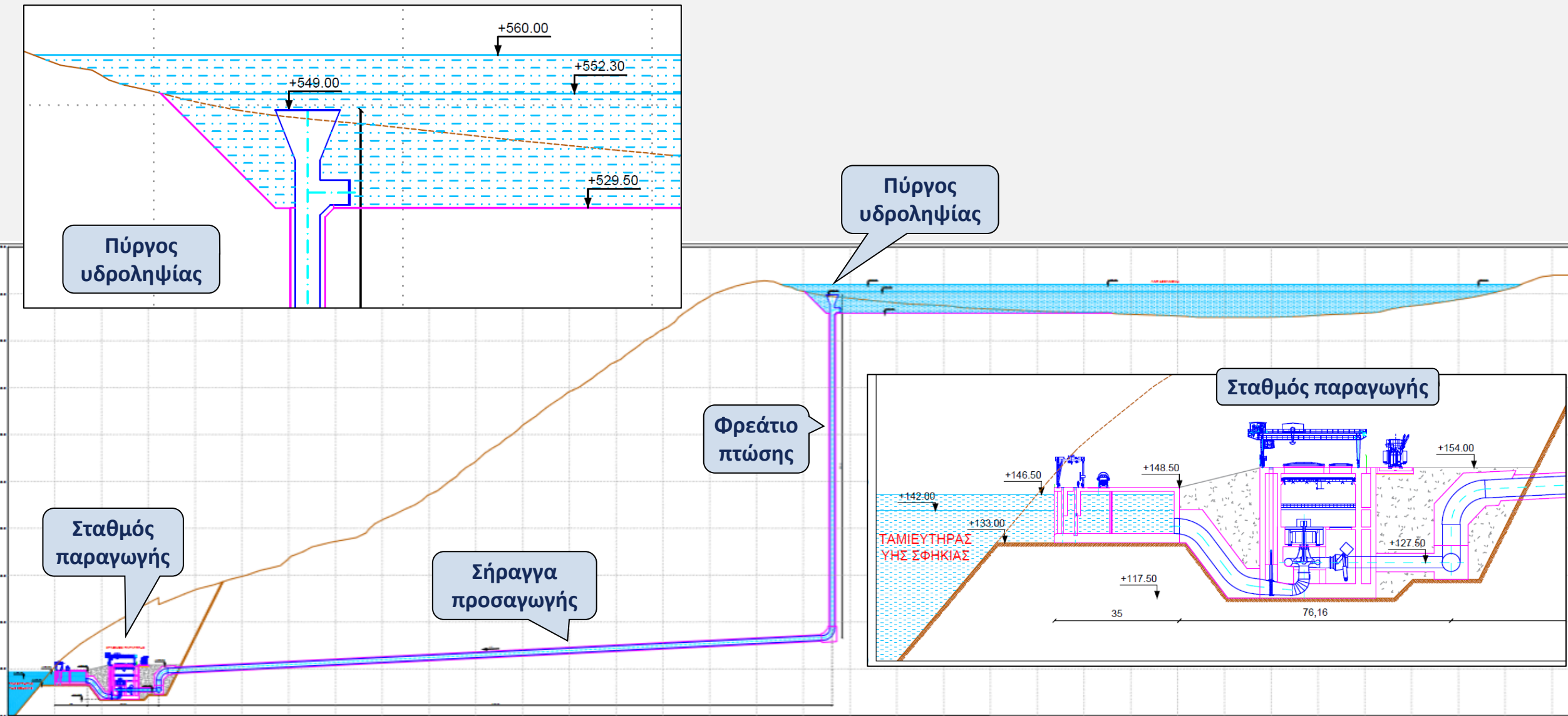


# Έργο αντλησιοταμίευσης Μπράβας: Γενική διάταξη έργων



Για τη διαμόρφωση της λιμνοδεξαμενής, θα κατασκευαστεί χωμάτινο φράγμα στο ΝΔ άκρο της λεκάνης, μήκους 435 m και μέγιστου ύψους 45 m (το μεγαλύτερο τμήμα του θα έχει ύψος έως 27 m). Ακόμη, θα απαιτηθεί η κατασκευή ενός μικρού χωμάτινου φράγματος στο ΝΑ άκρο της λεκάνης, μήκους 120 m και μέγιστου ύψους 9 m, και ενός χωμάτινου αναχώματος στο βόρειο άκρο, μήκους 415 m και μέγιστου ύψους 6.5 m.

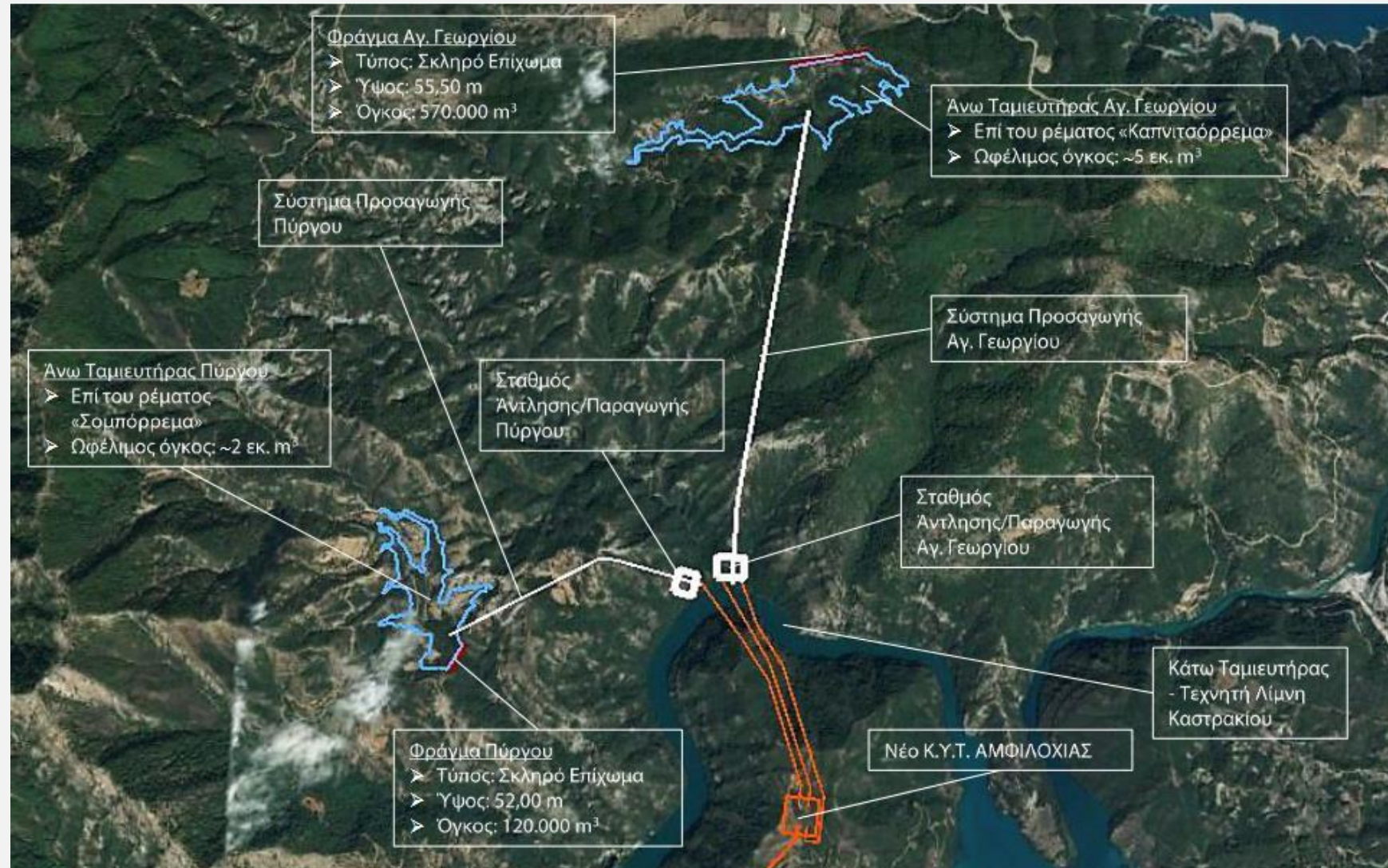
# Έργο αντλησιοταμίευσης Μπράβας: Τεχνικά έργα





# Σύστημα αντλησιοταμίευσης Αμφιλοχίας: Γενική διάταξη έργων

- Αξιοποίηση ταμιευτήρα Καστρακίου ως κάτω δεξαμενή, και σύνδεσή του με δύο νέους ταμιευτήρες
- Καστράκι: ενδιάμεσο ΥΗΕ συγκροτήματος Αχελώου
- Ωφέλιμος όγκος 97 hm<sup>3</sup> και εύρος στάθμης 4.0 m (με την προσθήκη ανατρεπομένων θυροφραγμάτων στον υπερχειλιστή, το 2010)
- Μηδενική επίπτωση στη λειτουργία του συστήματος Αχελώου

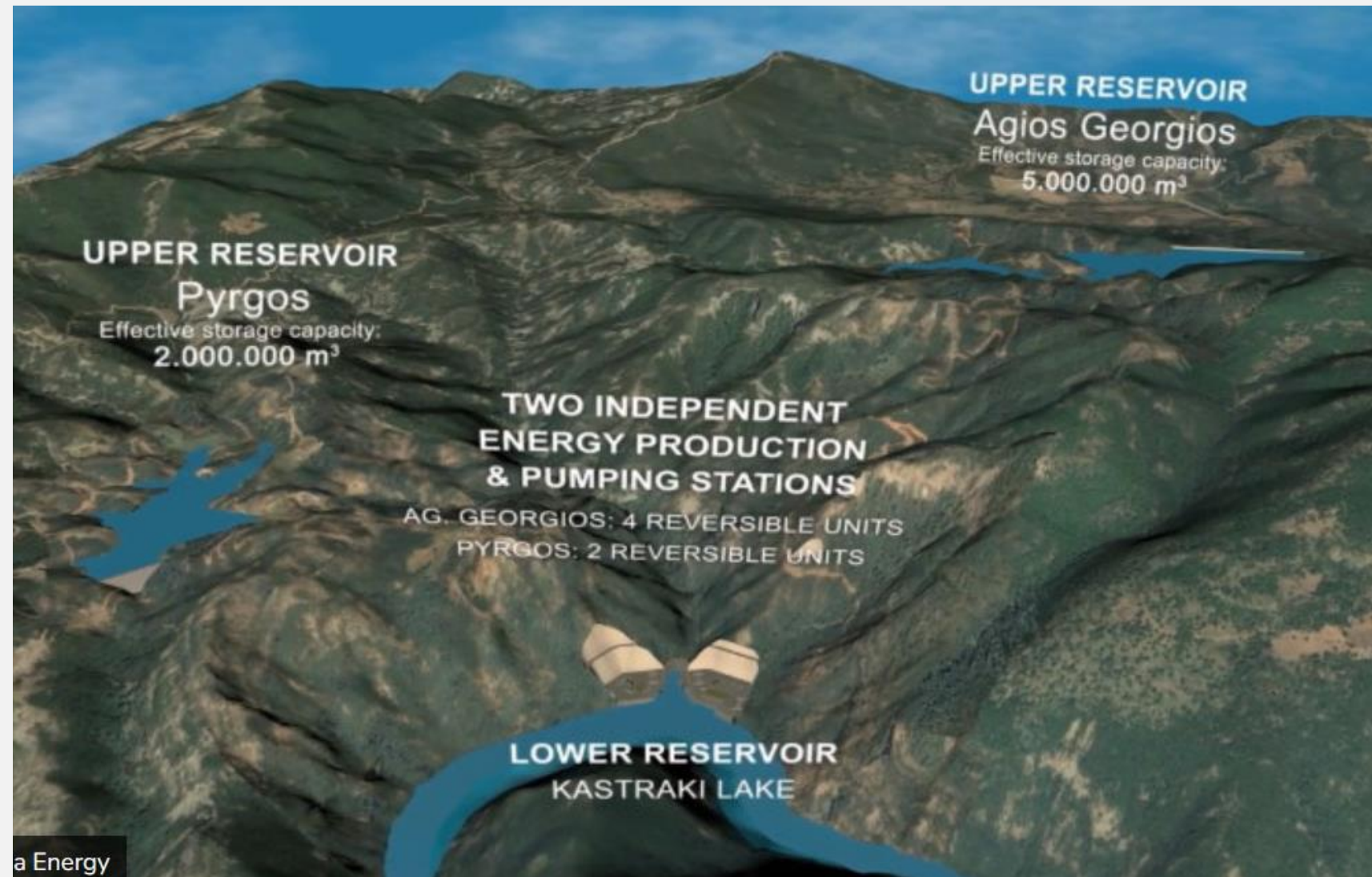


Πηγή: [http://hps-amfilochia.gr/wp-content/uploads/2016/11/HPS\\_Amfilochia\\_Project-Synopsis\\_Revised\\_Sep2016.pdf](http://hps-amfilochia.gr/wp-content/uploads/2016/11/HPS_Amfilochia_Project-Synopsis_Revised_Sep2016.pdf)



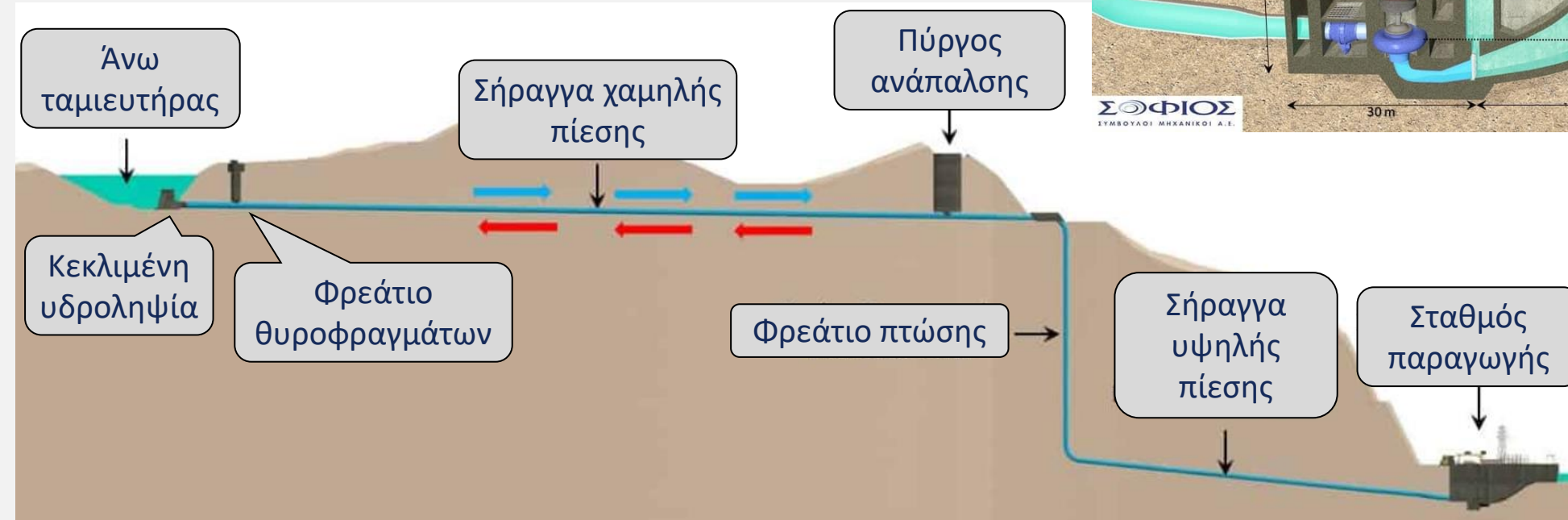
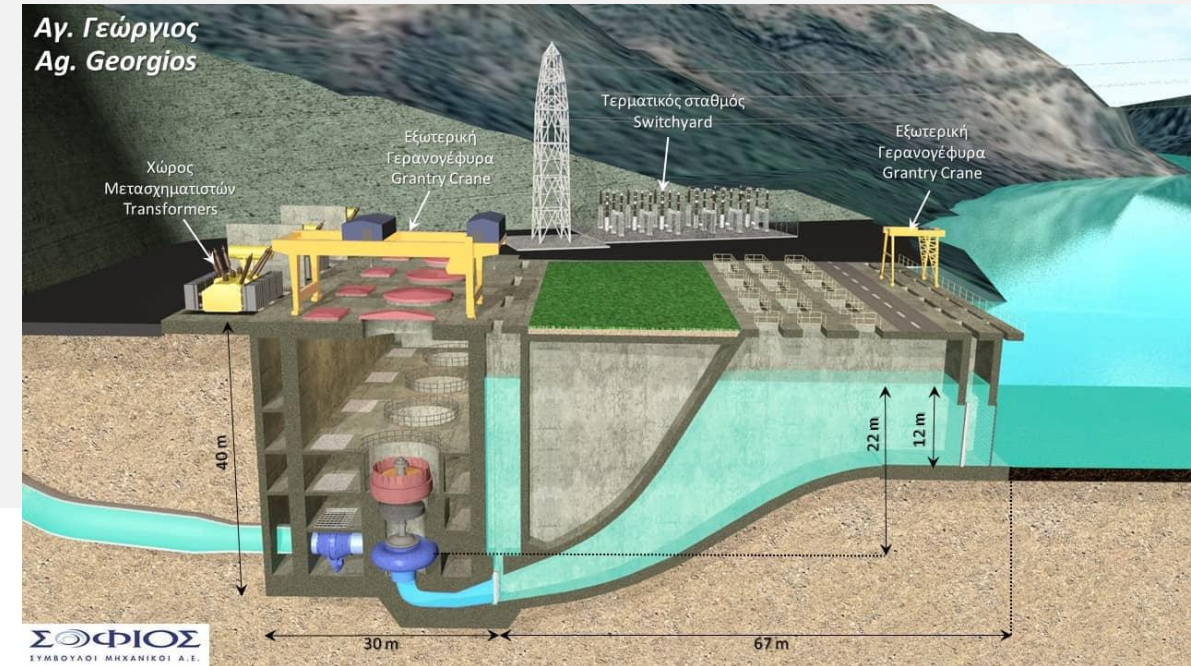
# Σύστημα αντλησιοταμίευσης Αμφιλοχίας: Βασικά τεχνικά μεγέθη

- Ταμιευτήρας Αγ. Γεωργίου:
  - Υψομ. διαφορά 238 m
  - Χωρητικότητα 5.0 hm<sup>3</sup>,
  - 460 MW για παραγωγή
  - 496 MW για άντληση
- Ταμιευτήρας Πύργου:
  - Υψομ. διαφορά 285 m
  - Χωρητικότητα 2.0 hm<sup>3</sup>,
  - 220 MW για παραγωγή
  - 234 MW για άντληση
- Ετήσια παραγωγή: 816 GWh (άντληση 8 ώρες, παραγωγή 6 ώρες, εκτιμώμενη ετήσια λειτουργία 200 ημέρες)



# Σύστημα αντλησιοταμίευσης Αμφιλοχίας: Έργα προσαγωγής

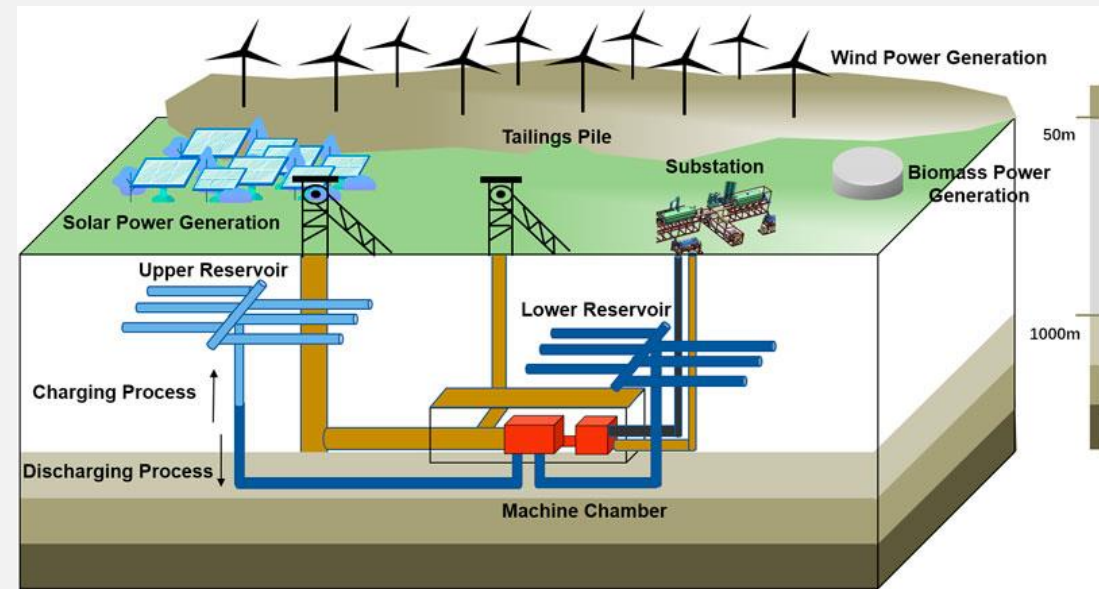
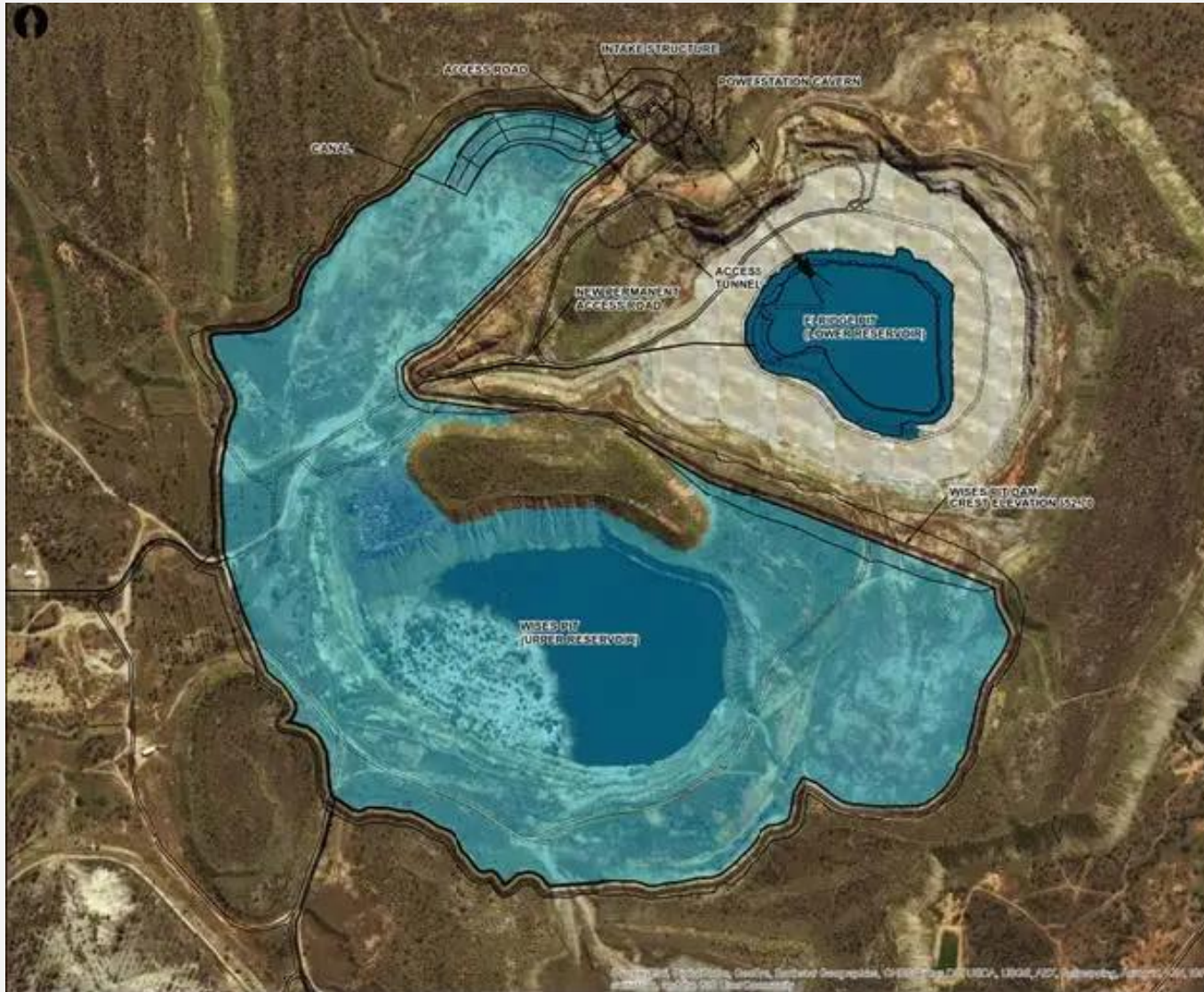
- Γενική διάταξη: σήραγγα χαμηλής πίεσης, φρεάτιο πτώσης και σήραγγα υψηλής πίεσης.
- Τοποθέτηση πύργου ανάπασης για προστασία από υδραυλικό πλήγμα
- Τοποθέτηση σταθμού σε βάθος ~10 m κάτω από την κατώτατη στάθμη λειτουργίας του Καστρακίου



**Σημείωση:** Άντληση 5 hm<sup>3</sup> προς τον Αγ. Γεώργιο μεταβάλλει τη στάθμη του Καστρακίου κατά 20 cm, ενώ άντληση 2 hm<sup>3</sup> προς τον Πύργο μεταβάλλει την στάθμη κατά μόλις 8 cm



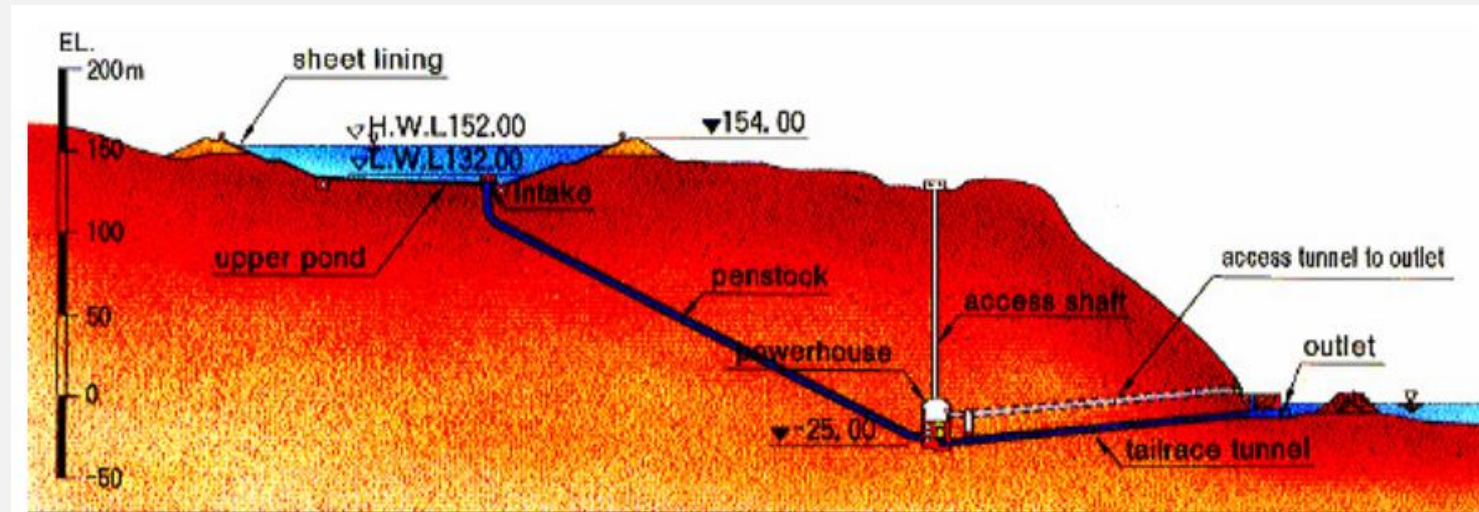
# Αξιοποίηση ορυχείων





# Η θάλασσα ως κάτω δεξαμενή

- Γενική διάταξη: Χρήση της θάλασσας ως κάτω δεξαμενής και διαμόρφωση λιμνοδεξαμενής σε κοντινή απόσταση και μεγάλη υψομετρική διαφορά (πρόσφορη λύση για νησιά)
- Τεχνικές δυσχέρειες λόγω διήθησης θαλασσινού νερού από την άνω δεξαμενή στο έδαφος, προσκόλλησης θαλάσσιων οργανισμών στους αγωγούς και διάβρωσης στροβίλων και λοιπών μεταλλικών στοιχείων

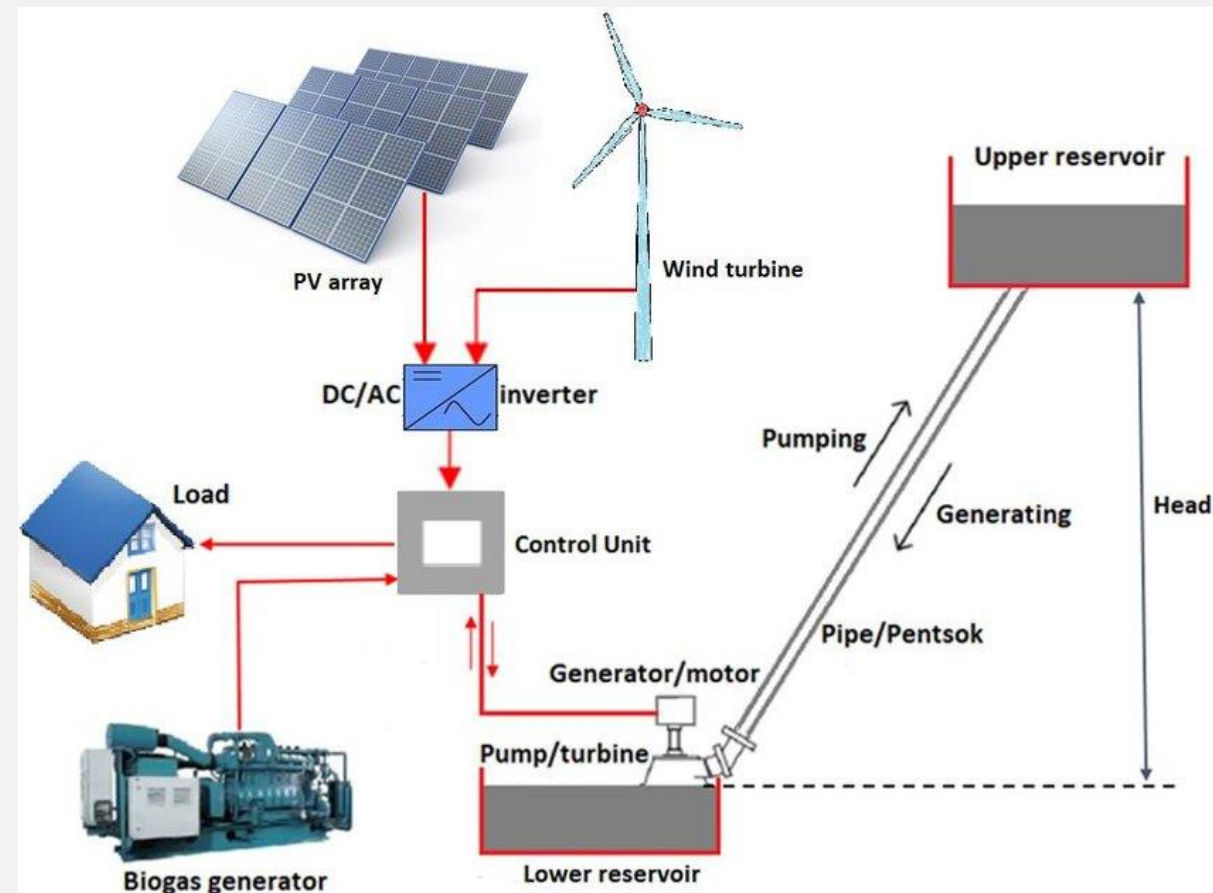


**Okinawa (Ιαπωνία):** Το πρώτο τέτοιο έργο στον κόσμο (έναρξη λειτουργίας 1999, ισχύς 30 MW, ύψος πτώσης 140 m, παροχή 26 m<sup>3</sup>/s), εγκαταλείφθηκε λόγω λειτουργικών προβλημάτων



# Ένταξη έργων αντλησιοταμίευσης σε υβριδικά συστήματα ΑΠΕ

- Μίξη διαφορετικών ΑΠΕ (μη εγγυημένη παραγωγή) με συμβατικές θερμικές μονάδες (ελεγχόμενη παραγωγή) και σύστημα αντλησιοταμίευσης, με στόχο την **ενεργειακή αυτονομία**.
- Διαστασιολόγηση χωρητικότητας δεξαμενών με κριτήρια **αξιοπιστίας** (ελαχιστοποίηση συχνότητας ελλειμμάτων) και **κόστους**.
- Χρήση συμβατικών μονάδων μόνο επικουρικά.
- Συνδυασμός και με άλλα συστήματα απορρόφησης πλεονάζουσας ενέργειας (χωρίς δυνατότητα παραγωγής):
  - Άντληση νερού, αποθήκευση σε δεξαμενές, και διανομή του για ύδρευση και άρδευση
  - Παραγωγή νερού μέσω αφαλάτωσης
  - Θέρμανση νερού για οικιακή χρήση
  - Ηλεκτρικά οχήματα
  - Παραγωγή πράσινου υδρογόνου



# Υβριδικό έργο Ικαρίας

Ταμιευτήρας Πεζίου  
Υψόμετρο : +721m

Δεξαμενή Προεσπέρας  
Υψόμετρο : +554m

Υδροηλεκτρικό Κάτω Προεσπέρα  
Υψόμετρο : +49m

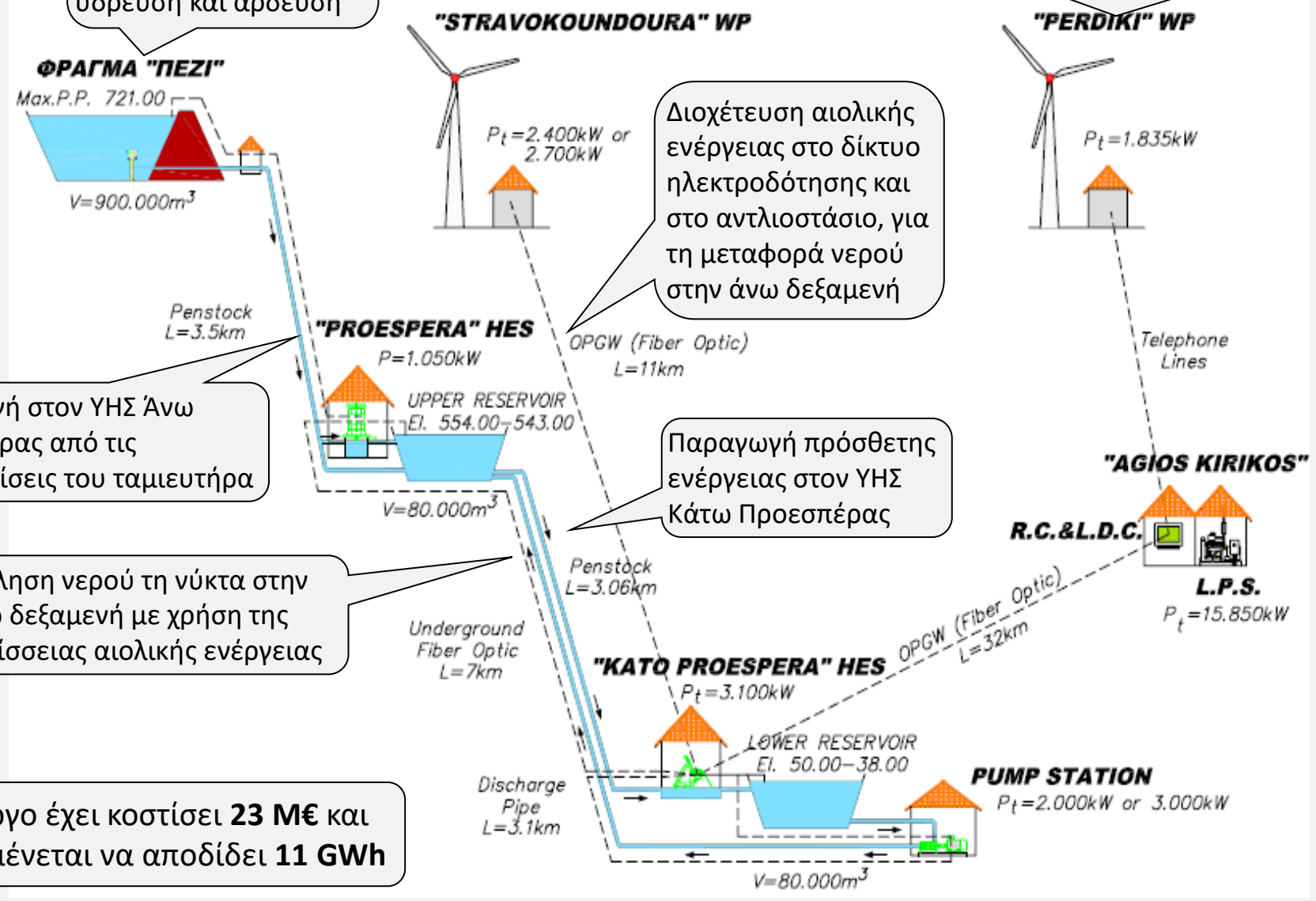
Το καλοκαίρι το νερό του ταμιευτήρα Πέζι διατίθεται κυρίως για ύδρευση και άρδευση

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

Παραγωγή στον ΥΗΣ Άνω Προεσπέρας από τις υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα

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

Το έργο έχει κοστίσει **23 Μ€** και αναμένεται να αποδώσει **11 GWh**



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

Παραγωγή πρόσθετης ενέργειας στον ΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας



# Μια ματιά στο μέλλον: “Green energy project” Tent Mountain





# Γιατί αντλησιοταμίευση;

- Η πλέον ώριμη τεχνολογία, σημαντική τεχνογνωσία σε θέματα κατασκευής-διαχείρισης-συντήρησης
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (έργα Π/Μ >50 έτη)
- Αποθήκευση πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας
- Μεγάλη ισχύς, με σχετικά μικρά έργα ταμίευσης
- Μεγάλη χρονική κλίμακα (πολλές ώρες έως ημέρες)
- Θεωρητικά άπειρος αριθμός κύκλων λειτουργίας
- Μεγάλη ευελιξία και άμεση απόκριση στις μεταβολές του φορτίου → ιδεατός ο συνδυασμός με αιολικά
- Βελτίωση σταθερότητας και αξιοπιστίας δικτύου
- Αμελητέα επίδραση στο υδατικό ισοζύγιο
- Αμελητέες απώλειες λόγω αυτοεκφόρτισης
- Οικονομίες κλίμακας, σε όλα τα επίπεδα

