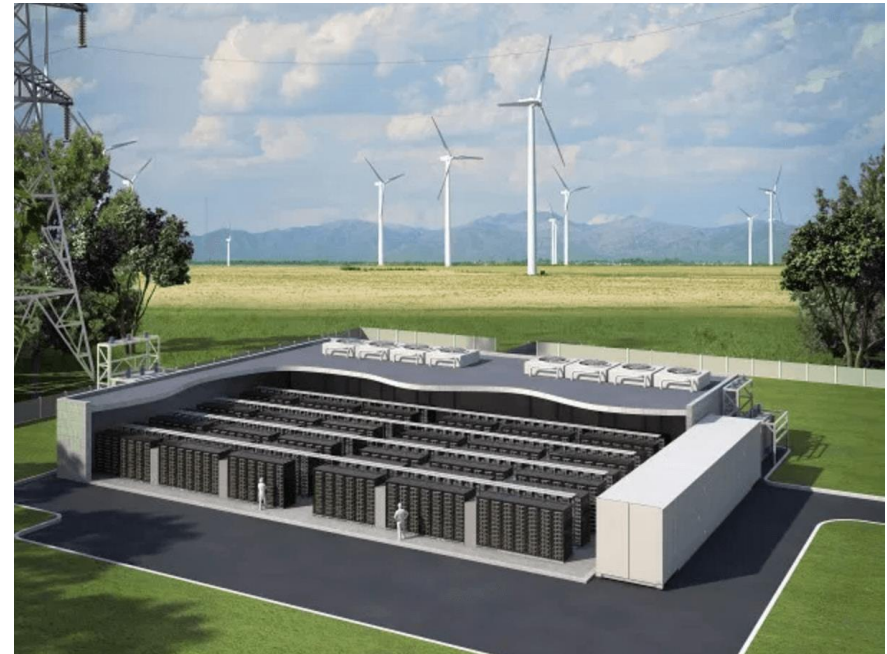


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1^ο και 5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας – Υβριδικά συστήματα



Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2022-23

Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στο παραδοσιακό και σύγχρονο μοντέλο παραγωγής-διανομής-κατανάλωσης

- **Παραδοσιακό μοντέλο ηλεκτρικής ενέργειας:**
 - Συγκεντρωτικό σύστημα καθετοποιημένης παραγωγής-διανομής (λίγες μονάδες, μεγάλης ισχύος, κεντρικά ελεγχόμενες)
 - Μονάδες βάσης, αργής απόκρισης (π.χ. θερμοηλεκτρικοί σταθμοί), και μονάδες αιχμής, γρήγορης απόκρισης (π.χ. μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα)
 - Παρακολούθηση φορτίου με πρόσθεση ή αφαίρεση μονάδων παραγωγής
 - Οικονομικά κίνητρα στους καταναλωτές για χρονική εξομάλυνση των ενεργειακών χρήσεων (νυχτερινά και βιομηχανικά τιμολόγια)
 - Απόρριψη πλεονάζουσας ενέργειας ή πώλησή της (εξαγωγή) σε πολύ χαμηλή τιμή
- **Σύγχρονο μοντέλο ηλεκτρικής ενέργειας:**
 - Αποκεντρωτικό σύστημα (πολλές μονάδες κάθε ισχύος, χωρικά διασπαρμένες)
 - Αυξανόμενη διείσδυση ΑΠΕ, μη ελεγχόμενη παραγωγή
 - Σταδιακή απόσυρση συμβατικών μονάδων
 - Αυτόνομα υβριδικά συστήματα μικρής κλίμακας (π.χ. νησιά)
 - Αυτονομία ακόμα και σε επίπεδο νοικοκυριού (net metering)
 - Έντονα ανταγωνιστικό οικονομικό περιβάλλον

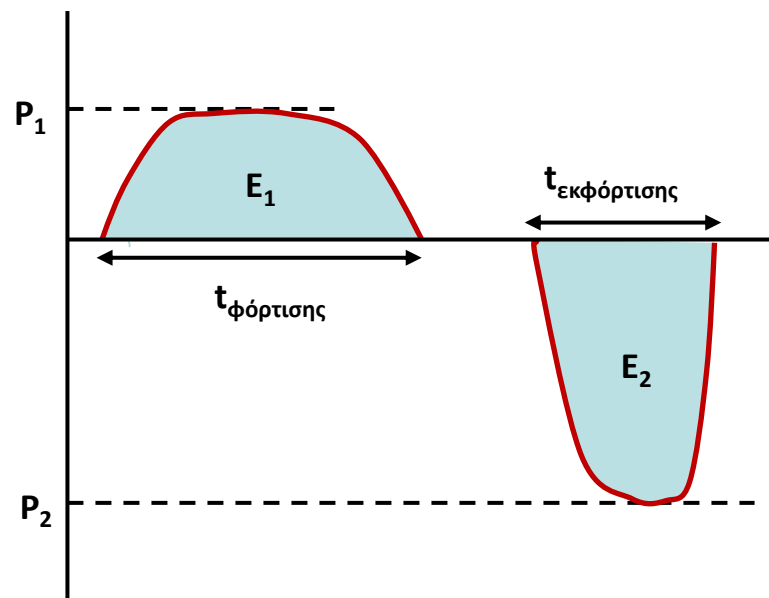
Η έννοια της αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

□ Γενικές απαιτήσεις συστημάτων παραγωγής και διανομής:

- Αμελητέα αποθηκευτικότητα ηλεκτρικού δικτύου (με πολύ μικρή ανοχή) → απαίτηση άμεσης απορρόφησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την κατανάλωση → ρύθμιση συστήματος παραγωγής σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο
- Βελτίωση 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

□ Γενικές αρχές συστημάτων αποθήκευσης:

- «Φόρτιση» σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (γενικότερα: όταν η προσφορά υπερβαίνει τη ζήτηση), και απόδοση ενέργειας για την κάλυψη των αιχμών (γενικά: ελλειμάτων) της ζήτησης
- Εφαρμογή **μίγματος τεχνολογιών** με διαφορετικά χαρακτηριστικά (χρόνος απόκρισης, μέγιστο βάθος εκφόρτισης, χρόνοι φόρτισης-εκφόρτισης)



Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

- **Γενική διαδικασία:** μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια άλλη μορφή, η οποία έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης, και μετέπειτα μετατροπή της και πάλι σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Στα συστήματα αποθήκευσης προκύπτουν δύο μορφές **απωλειών ενέργειας**:
 - κατά τις διεργασίες μετατροπής της ενέργειας (σε όλες οι 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
- **Τεχνολογίες αποθήκευσης:**
 - Ηλεκτρική: υπερπυκνωτές, υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας
 - Μηχανική: σφόνδυλοι, αποθήκευση με συμπιεσμένο ή υγροποιημένο αέρα, αντλησιοταμίευση
 - Ηλεκτροχημική: συσσωρευτές - μπαταρίες
 - Χημική: υδρογόνο
 - Θερμική: θέρμανση, ψύξη
 - Λοιπές τεχνολογίες αποκλειστικά για αξιοποίηση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς δυνατότητα παραγωγής στο δίκτυο
- Ουσιώδης παράγοντας διαφοροποίησης των επιμέρους τεχνολογιών είναι η **χρονική κλίμακα** της ενεργειακής αποθήκευσης (βραχυπρόθεσμη/μακροπρόθεσμη).

Βραχυπρόθεσμη vs. μακροπρόθεσμη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

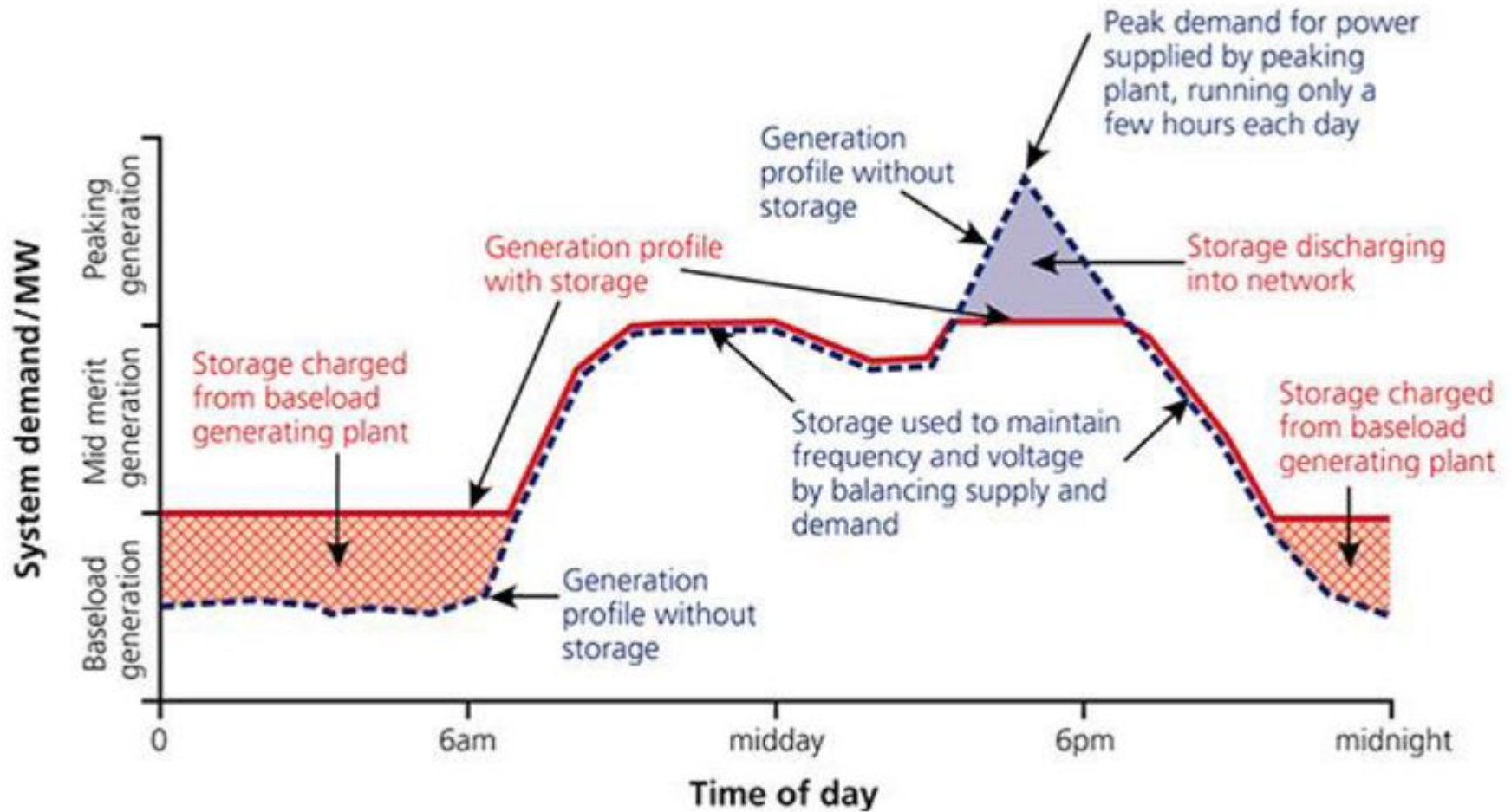
□ Βραχυπρόθεσμη αποθήκευση:

- Χρησιμοποιούνται σε **κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής**, όταν δηλαδή η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης, και μπορούν να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα.
- Εφαρμόζονται για βελτίωση της **ποιότητας ισχύος** στα ηλεκτρικά συστήματα, διατηρώντας σταθερή τάση κατά την ενεργειακή συνεισφορά, σε περιπτώσεις βυθίσεων ή κυματισμών που διαρκούν για **λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά**.
- 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 κατά τη διάρκεια ωρών ή 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

Ρύθμιση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε κλίμακα 24ώρου με χρήση τεχνολογιών αποθήκευσης



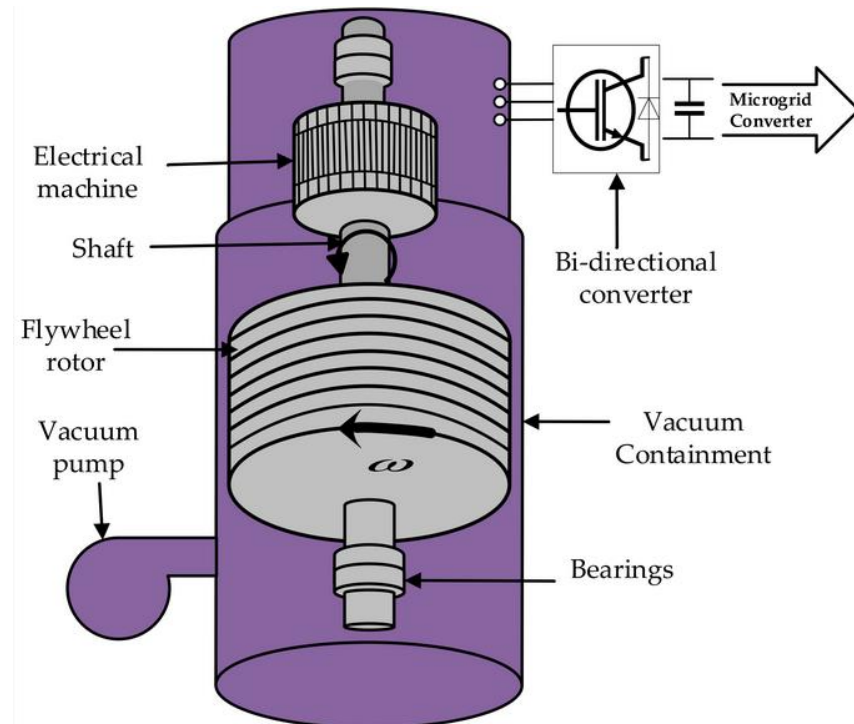
Ηλεκτρικά μέσα αποθήκευσης

- ❑ **Υπερπυκνωτές (supercapacitors)**
 - ❑ Κλασικοί πυκνωτές με προσθήκη διπλού στρώματος (double layer capacitors) για αύξηση της χωρητικότητας
 - ❑ Αποθήκευση σε μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς
 - ❑ Πλεονεκτήματα: υπερταχεία απόκριση, μεγάλο πλήθος κύκλων ζωής (~10 000)
 - ❑ Μειονεκτήματα: υψηλό επίπεδο αυτοεκφόρτισης, χαμηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας
- ❑ **Υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (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 (περίπου 100 000)
 - ❑ Μειονεκτήματα: υψηλό κόστος παραγωγής τους λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής τους, αλλά και του επιπλέον εξοπλισμού που απαιτείται για τη διατήρηση της υπεραγωγιμότητας των υλικών του πηνίου
 - ❑ Χρήσεις: ρύθμιση συχνότητας, υπηρεσίες ποιότητας ισχύος, παροχή εφεδρειών σε περιπτώσεις διακοπών του συστήματος

Μηχανικά μέσα αποθήκευσης: Σφόνδυλοι (flywheels)

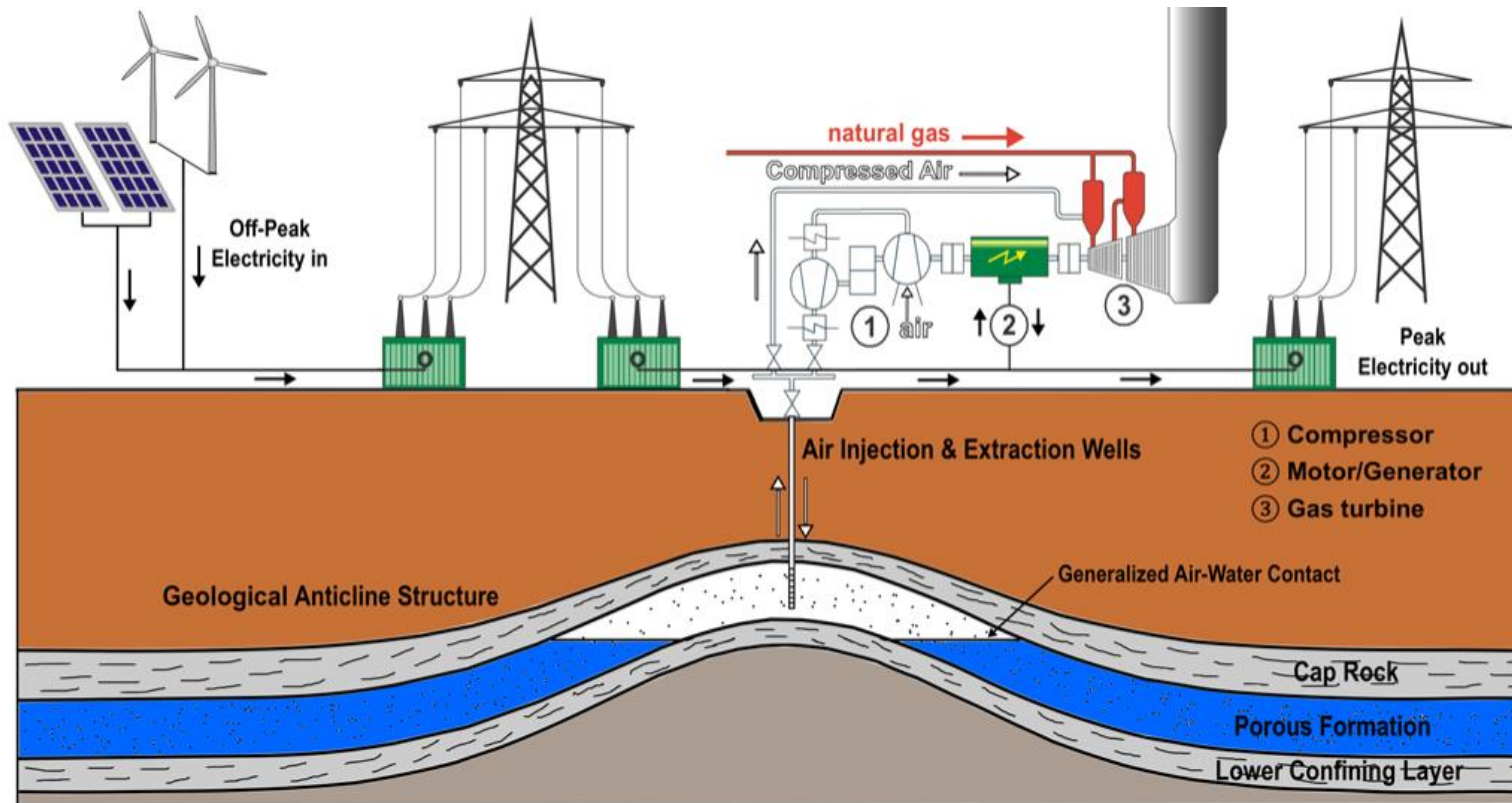
- ❑ Περιστερέφόμενος συμπαγής δίσκος, προσαρμοσμένος σε άξονα περιστροφής, που τοποθετείται σε θάλαμο κενού, το οποίο δημιουργείται μέσω μιας αντλίας αέρα, για της ελαχιστοποίηση των τριβών
- ❑ Περίσσεια ενέργειας → περιστροφή δρομέα, με ταχύτητα 20 000 έως 50 000 rpm
- ❑ Απόδοση ενέργειας → με χρήση της ροπής του περιστερέφόμενου 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
- ❑ Μειονεκτήματα: μικρή ενεργειακή χωρητικότητα

Πηγή: Soomro, A., K.R. Pullen, and 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, έπειτα, θερμαίνεται και απελευθερώνεται, τροφοδοτώντας συμβατικούς αεριοστρόβιλους ή ατμοστρόβιλους.
- Μέσα αποθήκευσης: χαλύβδινες δεξαμενές, σπήλαια, ορυχεία (αλατιού)



Πηγή: Crotagino, F., K.-U. Mohmeyer, and R. Scharf, Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation, *Proceedings of the Solution Mining Research Institute (SMRI) Spring Meeting*, Orlando, FL, USA, 351–357, 2001.

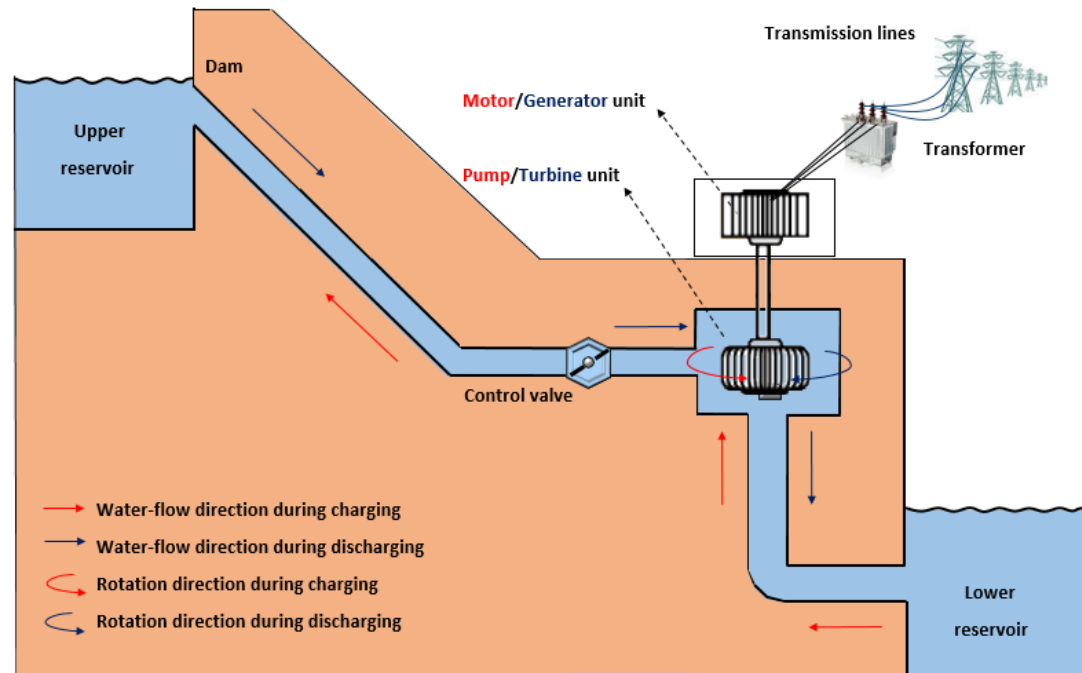
Μηχανικά μέσα αποθήκευσης: Αντλησιοταμίευση

- Συνιστώσες συστήματος αντλησιοταμίευσης (Pumped Hydro Storage, PHS):
 - **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.
- Γενική αρχή: παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας για κάλυψη των ελλειμμάτων της ζήτησης, άντληση νερού για αποθήκευση ενέργειας όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας
- Συνολικές απώλειες στο κύκλο: 70-75%

Σε παγκόσμια κλίμακα:

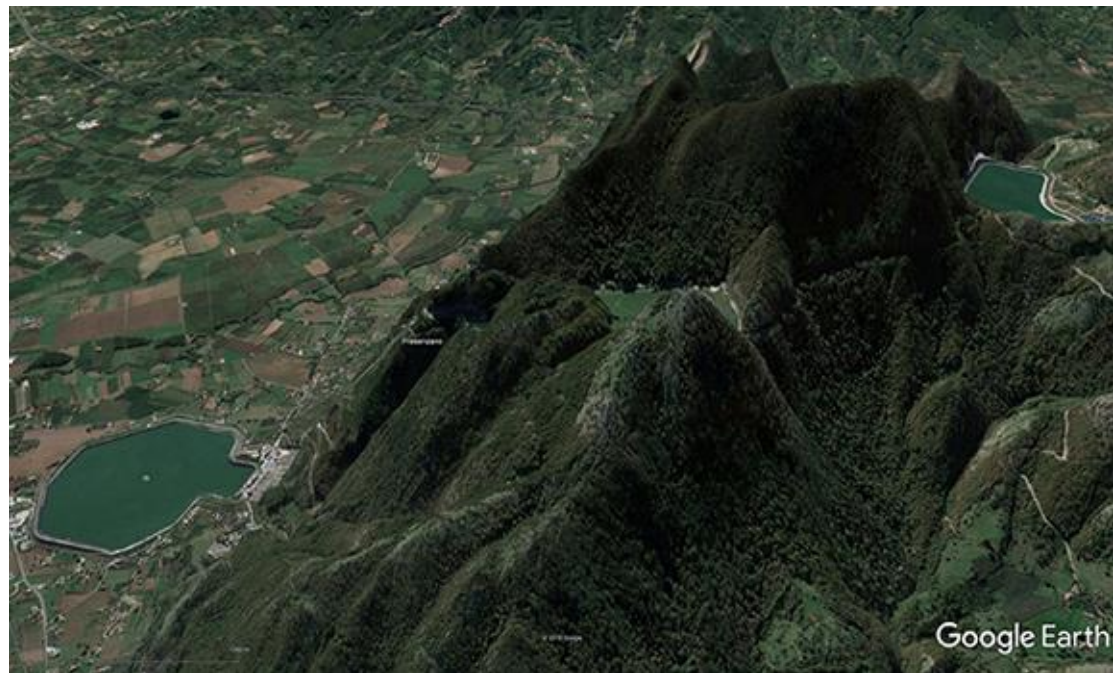
- Αποτελεί το 94% της συνολικής εγκαταστημένης ισχύος σε μέσα αποθήκευσης ενέργειας
- Συνολική ισχύς το 2021: 165 GW (+3.3% σε σχέση με το 2020)
- Αναμένεται να προστεθούν επιπλέον ~80 GW έως το 2030
- Πρόσθετη ενέργεια: 9.0 TWh
- Θεωρητικό δυναμικό: 22 000 TWh

Πηγή: <https://www.hydropower.org/status-report>



Κατηγορίες έργων

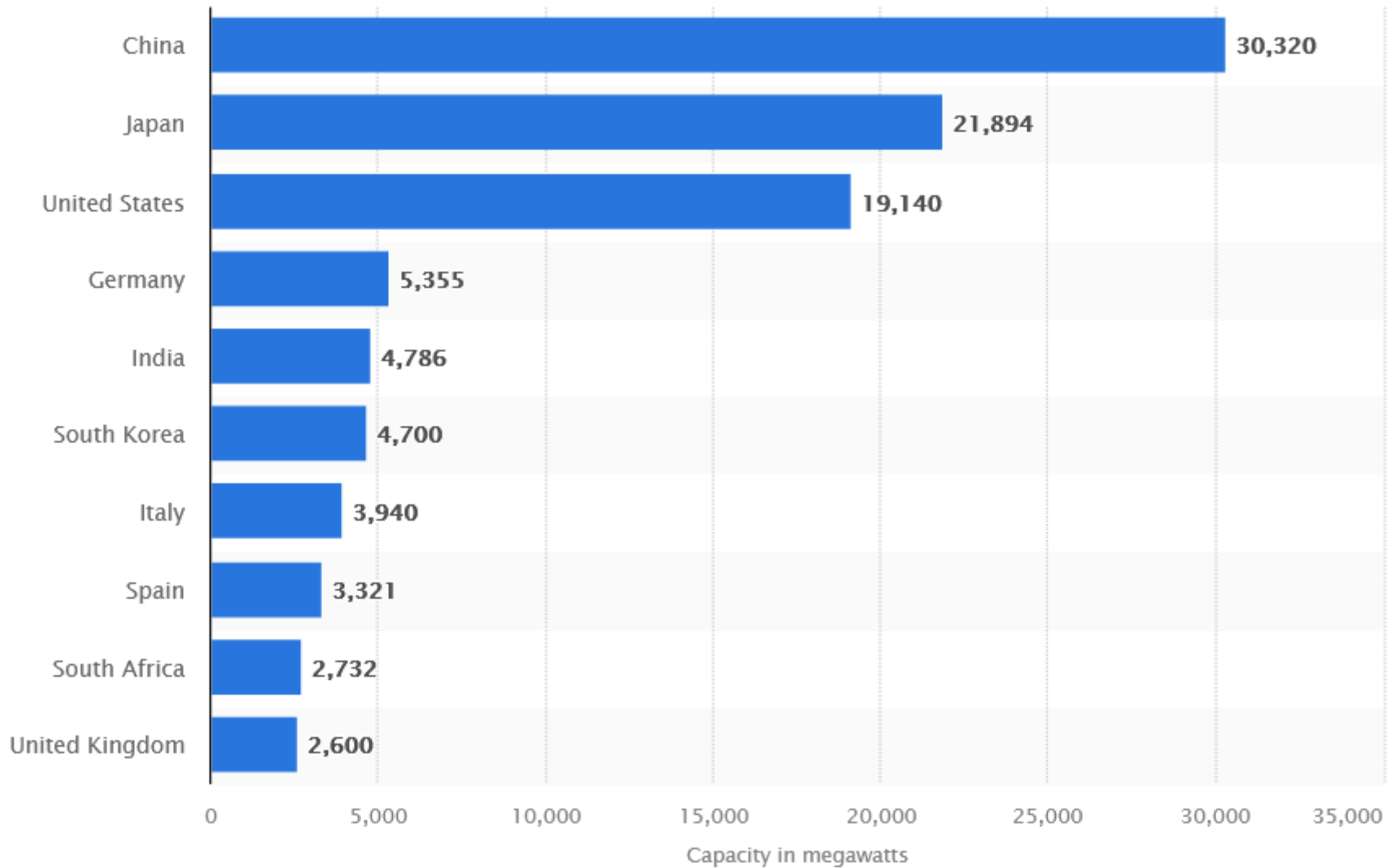
- ❑ **Ανοιχτού κύκλου:** συνδυασμός δεξαμενής (ψηλά) και ταμιευτήρα ή υδροληψίας επί ποταμού (χαμηλά)
- ❑ **Κλειστού κύκλου:** δεξαμενές ή ταμιευτήρες με παρεμφερή χωρητικότητα, σε ικανή υψομετρική διαφορά, που ανακυκλώνουν νερό μεταξύ τους



Prezzenano, Ιταλία: Δύο ταμιευτήρες ίσης χωρητικότητας 6.0 hm^3 , εγκατεστημένη ισχύς 1000 MW, υψομετρική διαφορά 495 m (έναρξη λειτουργίας: 1991)

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

Εγκατεστημένη ισχύς έργων αντλησιοταμίευσης (2020)



Πηγή: IEA, Pumped storage hydropower storage capability by countries, 2020-2026, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/pumped-storage-hydropower-storage-capability-by-countries-2020-2026>

Παράδειγμα: Καζυνογawa (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.



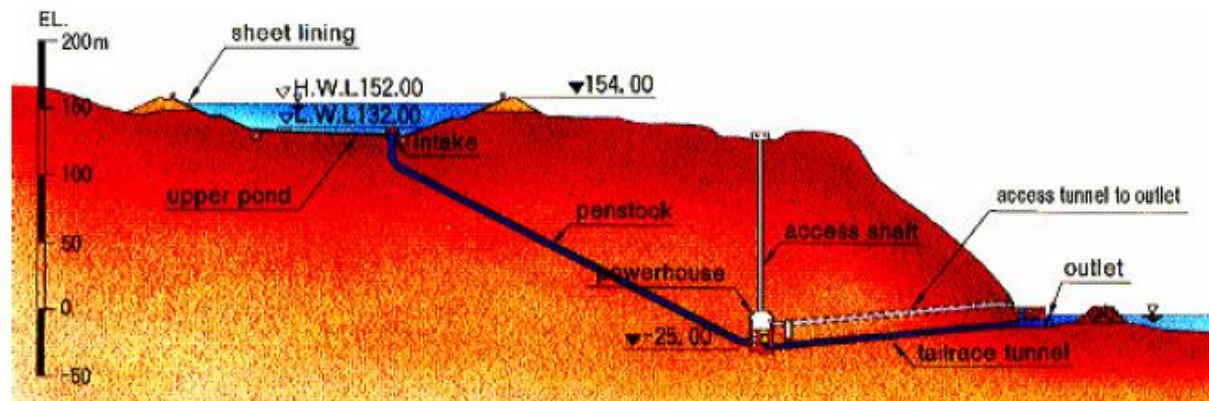
Παράδειγμα: Geesthacht (Γερμανία)



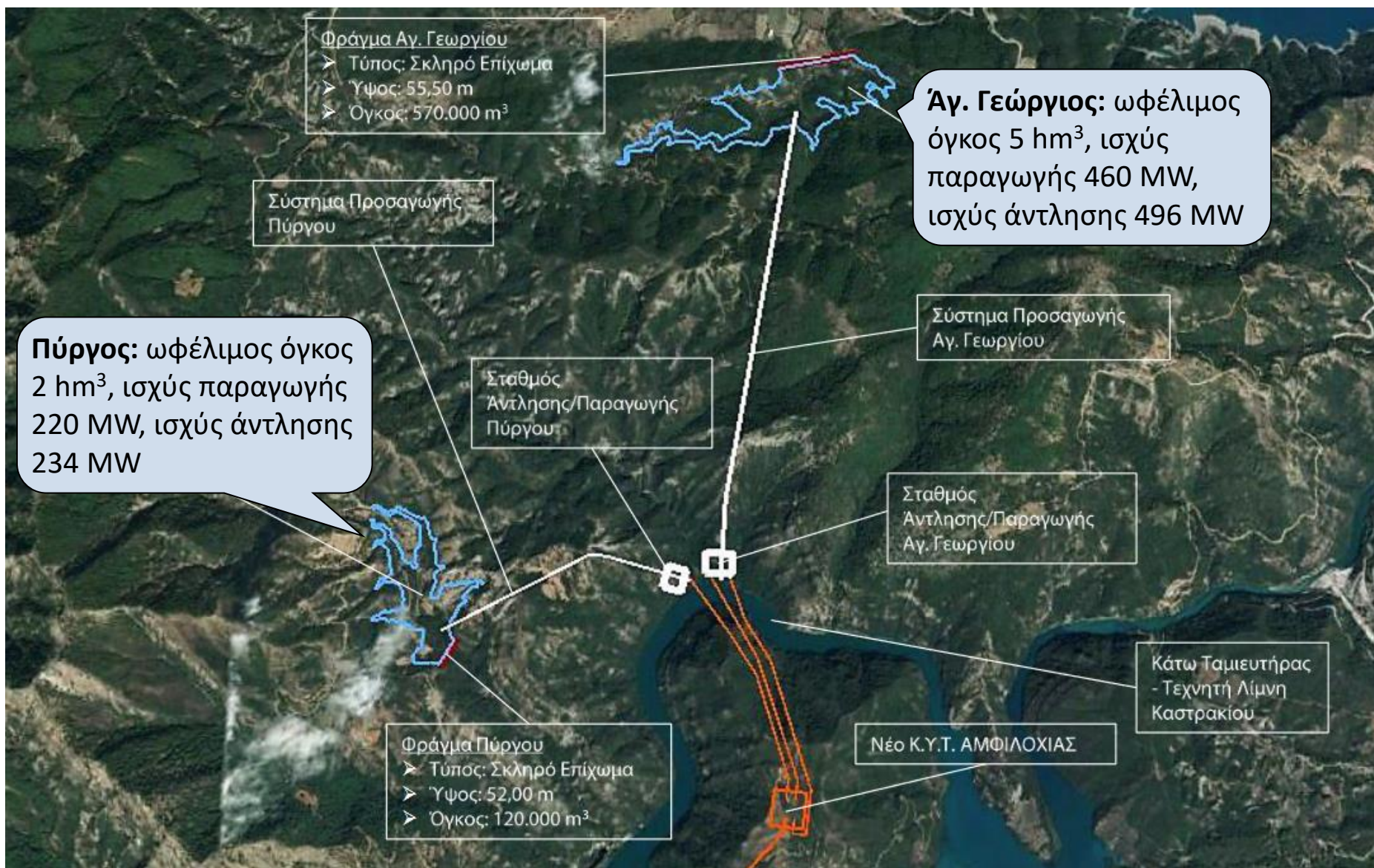
- Έναρξη λειτουργίας: 1958
- Εγκατεστημένη ισχύς: 3×40 MW
- Μέσο ύψος πτώσης: 83 m
- Κάτω ταμιευτήρας: φράγμα επί του ποταμού Έλβα, 8.21 hm^3
- Άνω ταμιευτήρας: λιμνοδεξαμενή, ωφέλιμη χωρητικότητα 3.3 hm^3
- Ισοδύναμη αποθήκευση: 600 MWh
- Χρόνος αυτονομίας: 4.5 ώρες
- Χρόνος πλήρωσης άνω δεξαμενής μέσω άντλησης: 9 ώρες
- Χρόνος απόκρισης: 90 s

Παράδειγμα: 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



Παράδειγμα: Σύστημα αντλησοταμείωσης Αμφιλοχίας με δύο ανεξάρτητες λιμνοδεξαμενές (Αγ. Γεώργιος, Πύργος)



Βασικά μεγέθη 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.

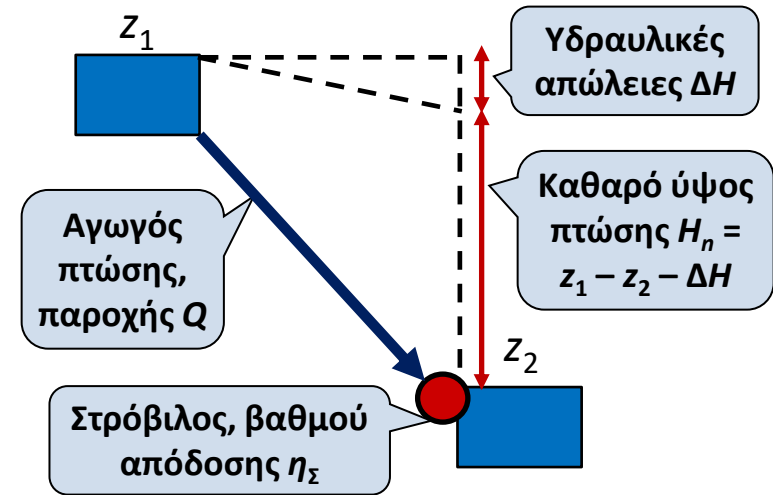
- Το μανομετρικό ύψος εκφράζει την **υδραυλική ενέργεια** που απαιτείται προκειμένου να καλυφθεί η υψομετρική διαφορά, Δz , και οι υδραυλικές απώλειες, ΔH , κατά τη μεταφορά του νερού (απώλειες ενέργειας στον **καταθλιπτικό αγωγό**):

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

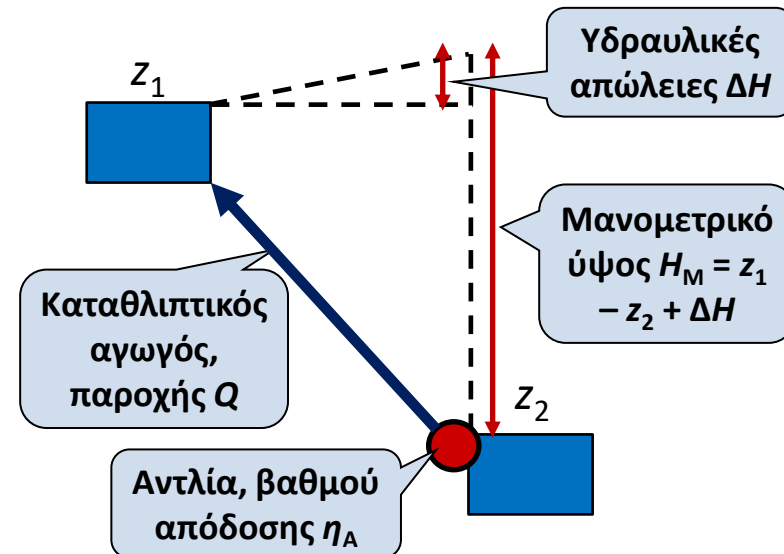
- Ο βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος της **μηχανικής ενέργειας** που παρέχει η αντλία προς την ηλεκτρική ενέργεια που της παρέχεται.
- Η απαιτούμενη **ισχύς** της αντλίας ισούται με:

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

όπου Q η διερχόμενη παροχή.



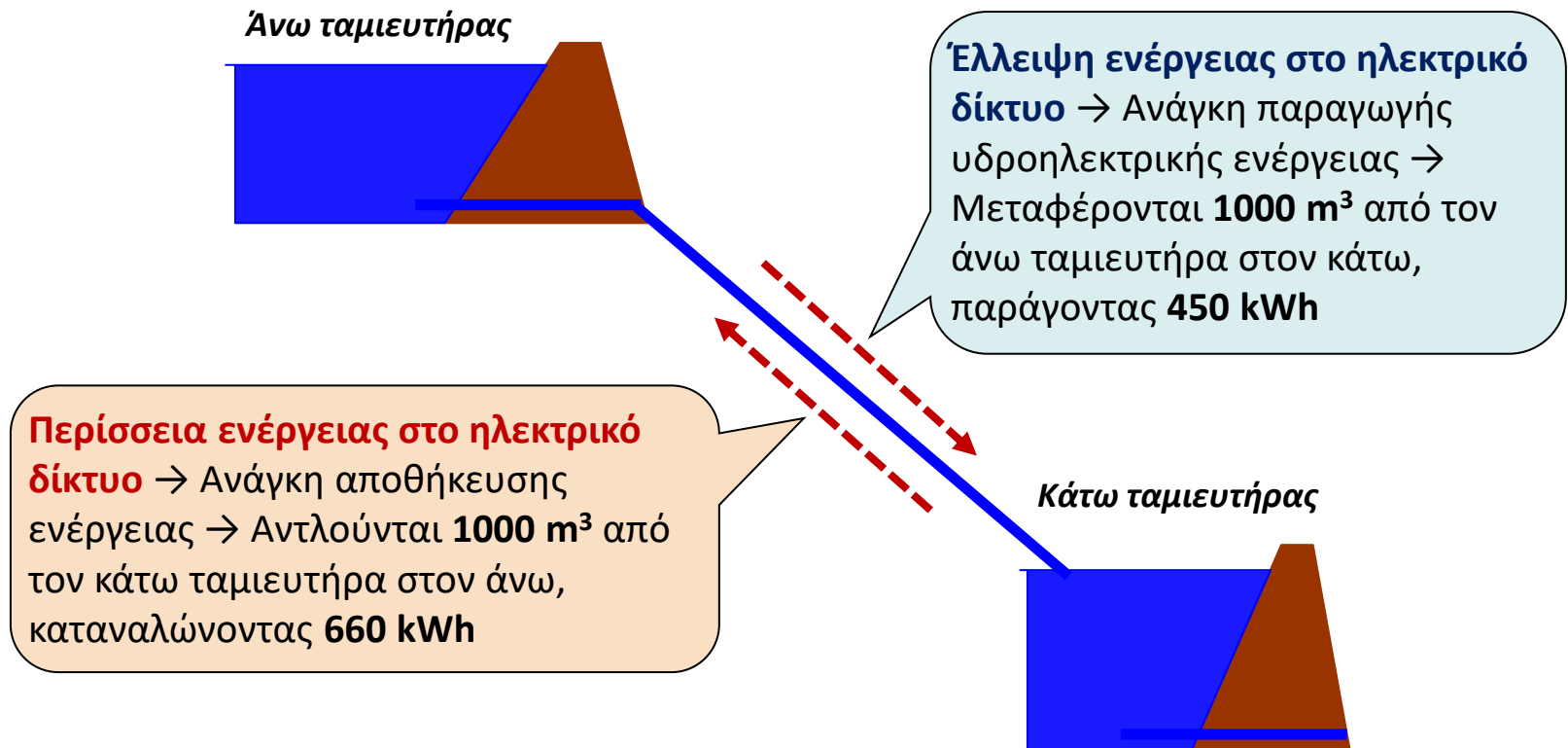
Παραγόμενη ισχύς: $P = \eta_\Sigma \gamma Q (\Delta z - \Delta H)$



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

Αριθμητική εφαρμογή

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



Ηλεκτροχημικά μέσα αποθήκευσης: Ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες)

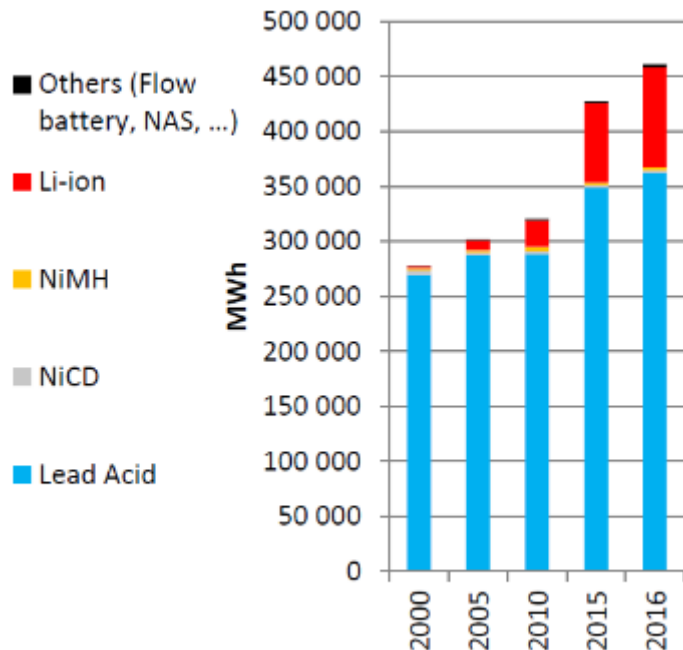
- **Γενική αρχή:** Δύο ηλεκτρόδια, ένα ανόδου και ένα καθόδου, τα οποία παρεμβάλλονται από ένα ηλεκτρολυτικό υλικό, μεταφέρουν μεταξύ τους ιόντα, παράγοντας ή απορροφώντας ενέργεια, ανάλογα με τη φορά ροής των ιόντων.
- **Τύποι συσσωρευτών:**
 - Μπαταρίες Μολύβδου – Οξέως (Lead-acid):
 - Παλαιά και φθηνή τεχνολογία
 - Μικρός κύκλος ζωής, ταχεία αυτοεκφόρτιση, μικρή πυκνότητα ενέργειας
 - Υποστηρικτικές διατάξεις σε αιολικά και Φ/Β πάρκα
 - Μπαταρίες Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd)
 - Μπαταρίες Νικελίου – Μετάλλου του Υδριδίου (NiMH)
 - Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-Ion)
 - Τρέχουσα τεχνολογία ηλεκτροχημικής αποθήκευσης για ηλεκτρικά δίκτυα
 - Πολύ υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας, υψηλή απόδοση, διάρκεια ζωής που υπερβαίνει τους 10 000 κύκλους φόρτισης
 - Αλλοιώσεις όταν υπερφορτίζονται ή υπερεκφορτίζονται (+ κίνδυνος ανάφλεξης) → ειδικά συστήματα προστασίας → αύξηση κόστους
 - Μπαταρίες Θείου – Νατρίου (NaS)

Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών (1)

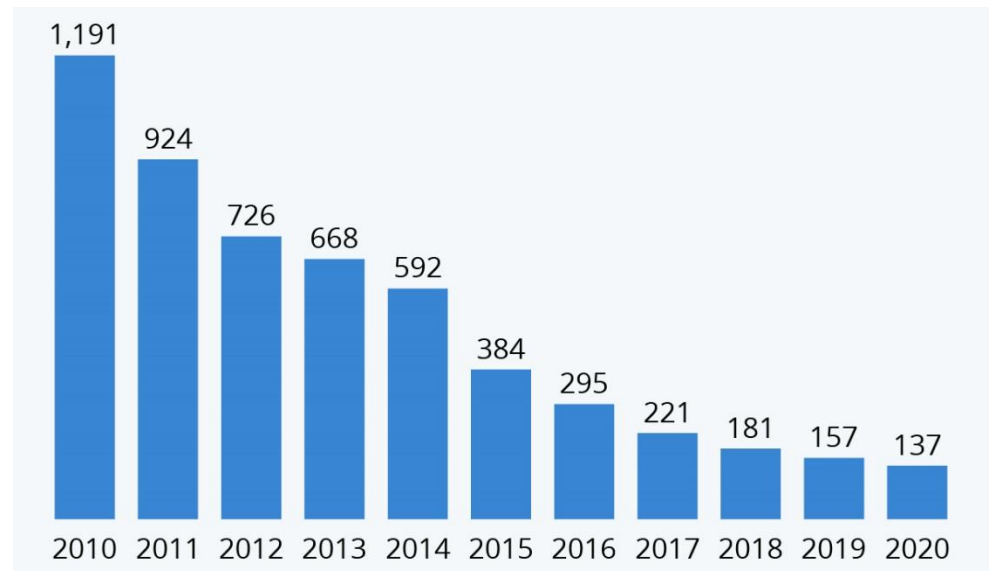
- ❑ **Φόρτιση/εκφόρτιση:** Διαδικασίες μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική (φόρτιση) ή της χημικής σε ηλεκτρική (εκφόρτιση) κατά το πέρασμα συνεχούς ρεύματος
- ❑ **Χωρητικότητα:** Ποσότητα φορτίου (σε αμπερώρια, $1 \text{ Ah} = 1 \text{ Coulomb/s}$) που μπορεί να παρέχει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια μιας εκφόρτισης (συμβολίζεται με C)
- ❑ **Ονομαστική χωρητικότητα:** Ποσότητα φορτίου που μπορεί θεωρητικά να αντληθεί σε δεδομένο χρονικό διάστημα (συνήθως 10 h (C10) ή 20 h (C20)) υπό θερμοκρασία 20°C
- ❑ **Βάθος εκφόρτισης:** Λόγος αντλούμενου φορτίου προς ονομαστική χωρητικότητα
- ❑ **Μέγιστο βάθος εκφόρτισης:** Η μέγιστη τιμή βάθους εκφόρτισης που μπορεί να λειτουργήσει ένας συσσωρευτής χωρίς να προκληθεί βλάβη σ' αυτόν
- ❑ **Στάθμη φόρτισης (SOC):** Χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή
- ❑ **Ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα:** Γινόμενο ονομαστικής χωρητικότητας και μέγιστου βάθους εκφόρτισης
- ❑ **Ρυθμός εκφόρτισης/φόρτισης:** Ρεύμα στο οποίο φορτίζονται/εκφορτίζονται οι μπαταρίες για συγκεκριμένο αριθμό ωρών (π.χ., C/5 για 5 ώρες, C/20 για 20 ώρες, κλπ)
- ❑ **Απόδοση:** Λόγος των Ah που εκφορτίζονται από τη μπαταρία προς τις Ah που φορτίζονται στην μπαταρία σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο
- ❑ **Κύκλος:** Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε μια μπαταρία εν λειτουργία

Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών (2)

- ❑ **Κύκλος ζωής:** Αριθμός κύκλων που μπορεί να δώσει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της – αντιστοιχεί συνήθως στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για ένα συγκεκριμένο βάθος που η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η χωρητικότητά της μειωθεί σε συγκεκριμένο ποσοστό (συνήθως 80%) της αρχικής της τιμής
- ❑ **Αυτοεκφόρτιση:** Απώλεια φορτίου μπαταρίας αν αυτή αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για υπολογίσιμο χρονικό διάστημα (τυπικές τιμές: 1-4% ανά μήνα σε θερμοκρασία 20-25°C)



Κόστος μπαταριών λιθίου-ιόντων (Li-ion) σε \$/kWh

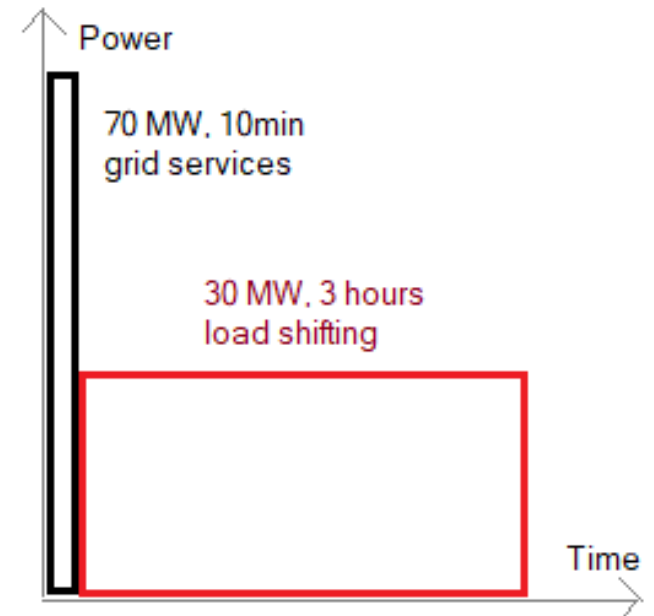


Πηγή: Battery storage to drive the power system transition (<https://ec.europa.eu/energy/>)

Πηγή: <https://www.statista.com/chart/23807/lithium-ion-battery-prices/>

Παράδειγμα: Hornsdale Power Reserve (Αυστραλία)

- Το 2017 τέθηκε σε λειτουργία η μεγαλύτερη μπαταρία ιόντων λιθίου της Tesla, που τοποθετήθηκε στο αιολικό πάρκο στο Hornsdale στη Νότια Αυστραλία.
- Αρχική ονομαστική ισχύς 100 MW, μέγιστη αποθήκευση ενέργειας 129 MWh
- Κόστος: 90 εκατομμύρια Α\$
- Χρόνος κατασκευής < 100 ημέρες
- 70 MW × 10 λεπτά για σταθεροποίηση δικτύου έναντι δυσμενών καιρικών φαινομένων (αφού η κατασκευή εφεδρικών μονάδων Φ/Α κρίθηκε οικονομικά ασύμφορη)
- 30 MW × 3 ώρες για διαχείριση φορτίων από ΑΠΕ
- Το 2020 έγινε επέκταση κατά 50MW/64.5MWh

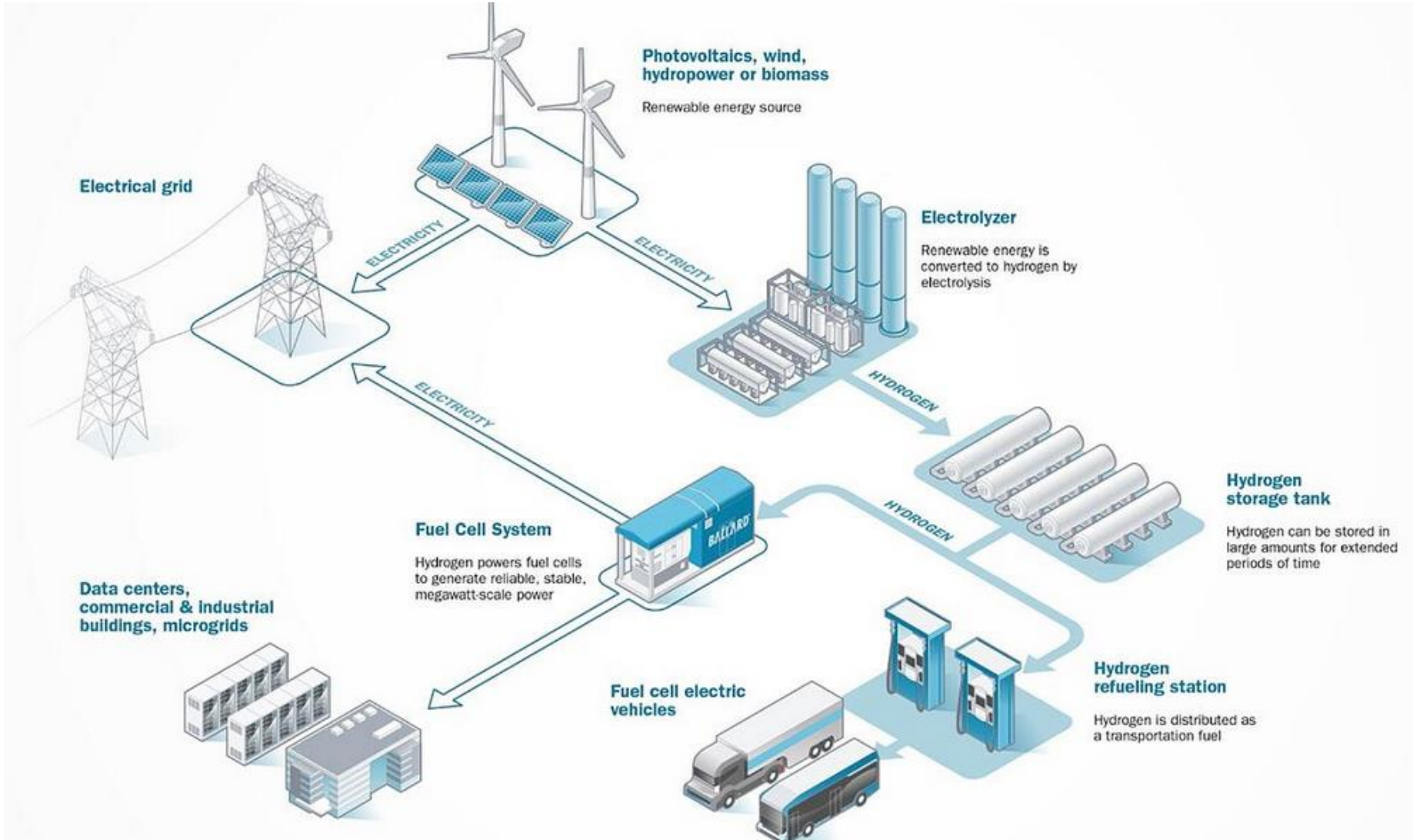


Χημικά μέσα αποθήκευσης: «Πράσινο» υδρογόνο

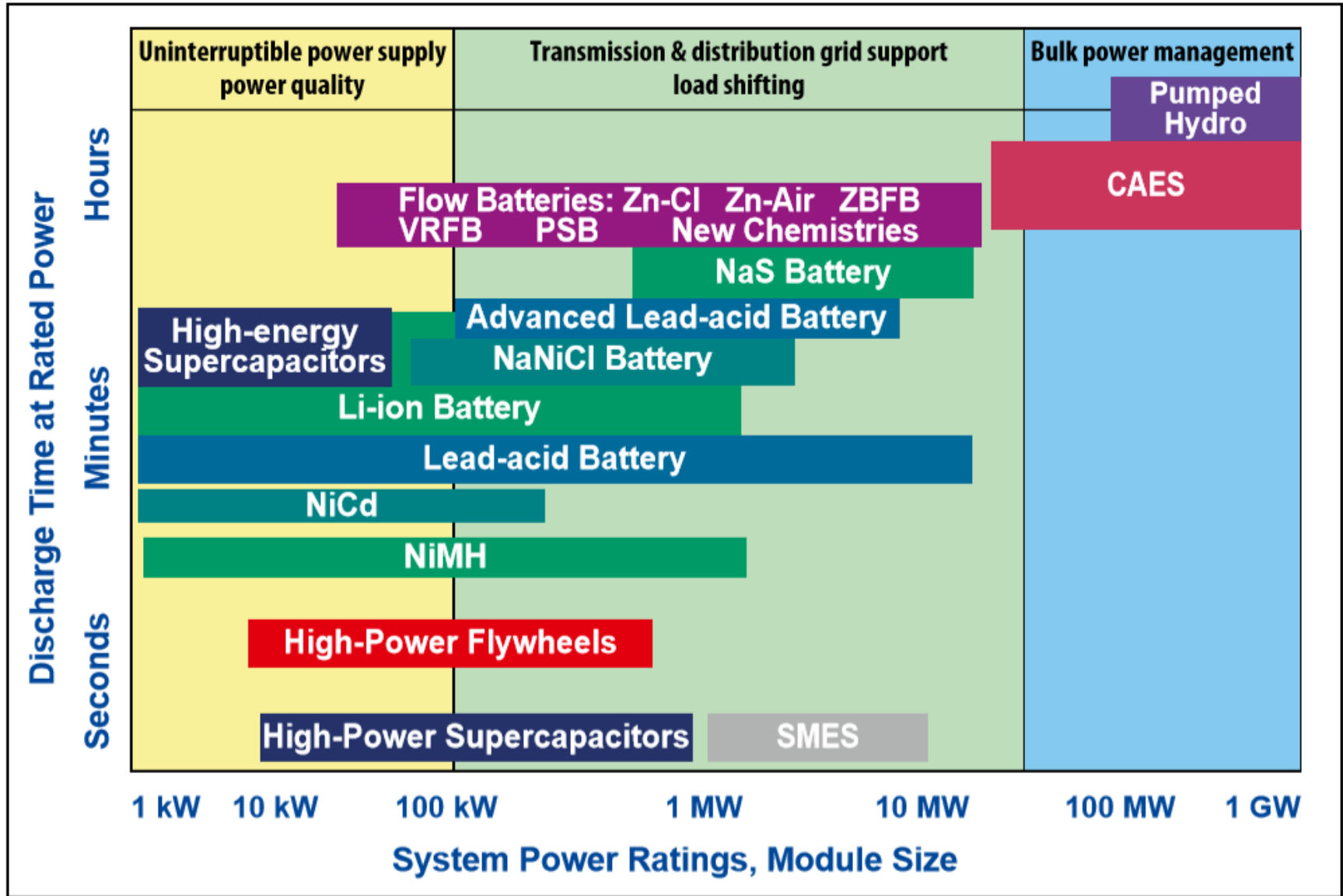
- ❑ Υδρογόνο: φυσικό καύσιμο σε αφθονία, απαιτεί ενέργεια για τη διάσπασή του
- ❑ «Πράσινο» υδρογόνο: παραγωγή μέσω ηλεκτρόλυσης, με ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτείται από ΑΠΕ (σε αντίθεση με λοιπές μορφές, ήτοι «μπλε», «γκρι», «καφέ»)
- ❑ Μέθοδοι αξιοποίησης:
 - ❑ παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (βαθμός απόδοσης 50%, σε συμβατικές μονάδες καύσης, ή 60%, σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου)
 - ❑ απευθείας χρήση ως καύσιμο
- ❑ Μέσα 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 m³, 2900 psi)
- ❑ Σε σχέση με τα υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, προς το παρόν μειονεκτεί τόσο ως προς τον βαθμό απόδοσης όσο και ως προς το κόστος.



Ο κύκλος παραγωγής και χρήσης πράσινου υδρογόνου



Σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας



Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας: Τεχνικά μεγέθη

System	Max. Power Rating (MW)	Efficiency (%)	Discharge Time	Energy Density (Wh/L)
PHS	3000	70–85	4 h–16 h	0.2–2
CAES	1000	40–70	2 h–30 h	2–6
FES	20	70–95	sec–mins	20–80
Lead-acid	100	80–90	1 min–8 h	50–80
NiCd/NiMH	40		sec–hours	60–150
Li-ion	100	85–95	1 min–8 h	200–400
Metal-air	0.01	50	secs–day	500–10,000
Sodium-sulfur	0.05–8	75–90	sec–hours	150–250
RFB/HFB	100	60–85	hours	20–70
H ₂	100	25–45	min–week	600
Fuel Cell	50	60–80	secs–day	500–3000
SMES	10 MW	95	millisec–secs	0.2–2.5
Thermal	150	80–90	hours	70–210

Πηγή: Chakraborty, M. R., S. Dawn, P. K. Saha, J. B. Basu, and T. S. Ustun, A comparative review on energy storage systems and their application in deregulated systems, *Batteries*, 8, 124, doi:10.3390/batteries8090124, 2022 (μετά από προσαρμογή).

Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας: Χρόνος ζωής & οικονομικά μεγέθη

System	Life Time/Cycles
PHS	30–60 years
CAES	20–40 years
FES	20,000–100,000
Lead-acid	6–40 years
NiCd/NiMH	10–20 years
Li-ion	1000–10,000
Metal-air	100–300
Sodium-sulphur	10–15 years
RFB/HFB	12,000–14,000
H2	5–30 years
Fuel Cell	5–15 years
SMES	20 years
Thermal	30 years

System	Cost/KW (USD)	Cost/KWh (USD)
PHS	600–2000	5–100
CAES	400–800	2–50
FES	250–350	1000–5000
Lead-acid	300–600	200–400
NiCd/NiMH	500–1500	800–1500
Li-ion	1200–4000	600–2500
Metal-air	100–250	10–60
Sodium-sulfur	1000–3000	300–500
RFB/HFB	700–2500	150–1000
H2		10
Fuel Cell	10,000	
SMES	200–300	1000–10,000
Thermal	200–300	30–60

Πηγή: Chakraborty, M. R., S. Dawn, P. K. Saha, J. B. Basu, and T. S. Ustun, A comparative review on energy storage systems and their application in deregulated systems, *Batteries*, 8, 124, doi:10.3390/batteries8090124, 2022 (μετά από προσαρμογή).

Οδεύοντας προς πιο αποτελεσματικά και χαμηλότερου κόστους συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

- Υβριδικά συστήματα
 - Συνδυασμός συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών, που (αναγκαστικά) περιλαμβάνουν και διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας
 - Αξιοποίηση των πλεονασμάτων ενέργειας που παράγονται από τις ΑΠΕ και ως τώρα αναγκαστικά απορρίπτονται (μικροί συντελεστές δυναμικότητας)
 - Μακροπρόθεσμα: εξασφάλιση πλήρους ενεργειακής αυτονομίας (π.χ., σε μη διασυνδεδεμένα νησιά)
- Λοιπές μορφές αξιοποίησης των πλεονασμάτων ενέργειας (χωρίς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο)
 - Άντληση νερού → μεταφορά και αποθήκευση νερού
 - Αφαλάτωση → παραγωγή πόσιμου νερού
 - Αποθήκευση θερμότητας → αποθήκευση ζεστού νερού χρήσης
 - Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων
- «Έξυπνες» (smart) τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας (δίκτυα, συσκευές, μετρητές)
- Διάφορα μέτρα διαχείρισης της ζήτησης (οικονομικά κίνητρα και αντικίνητρα)

Υβριδικό ενεργειακό έργο Ικαρίας

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

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

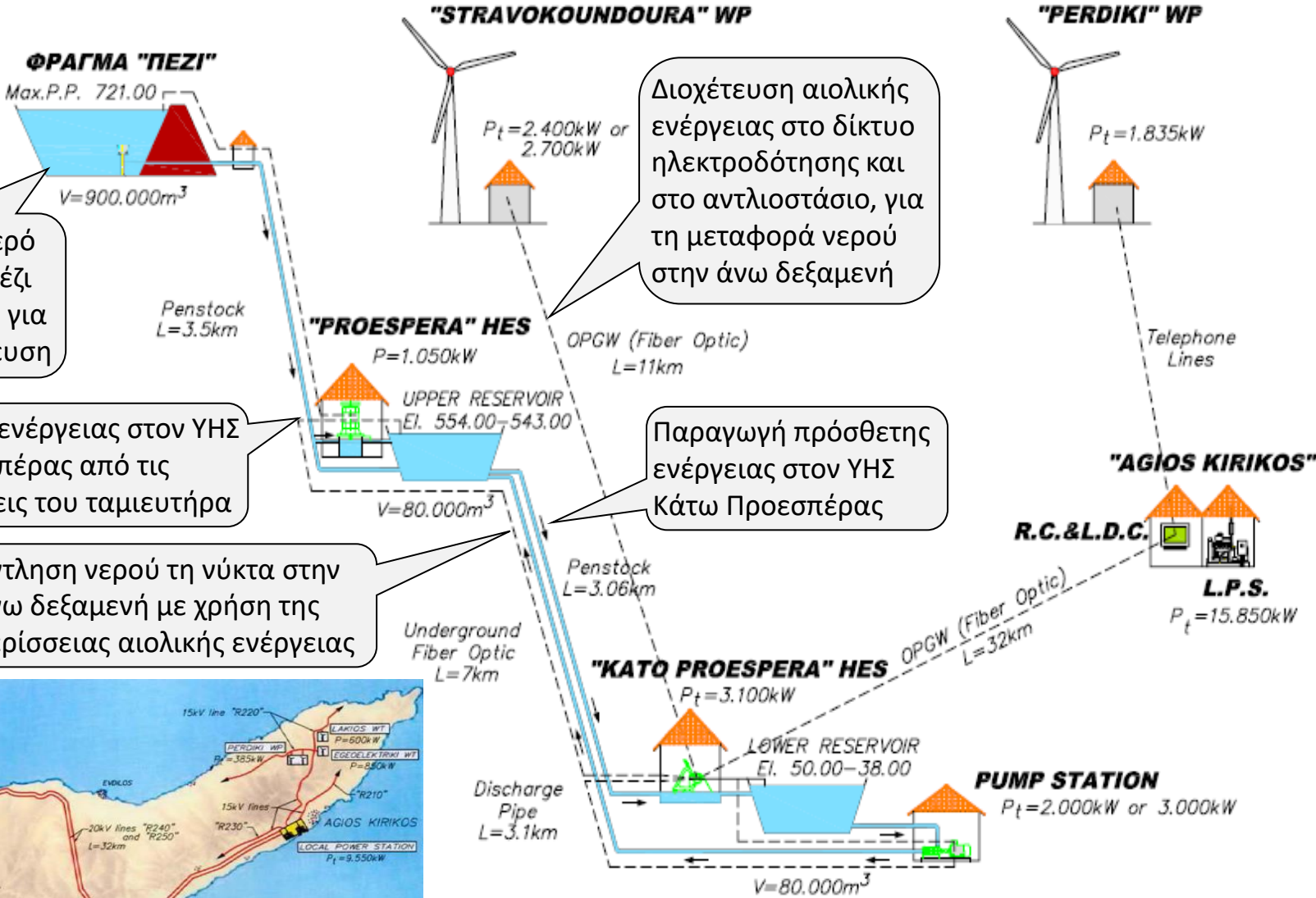
Παραγωγή ενέργειας στον ΥΗΣ Άνω Προεσπέρας από τις υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα

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**



Υβριδικό “Green energy project” Tent Mountain

