



Κόντης Ελευθέριος

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών

kontislefteris@gmail.com

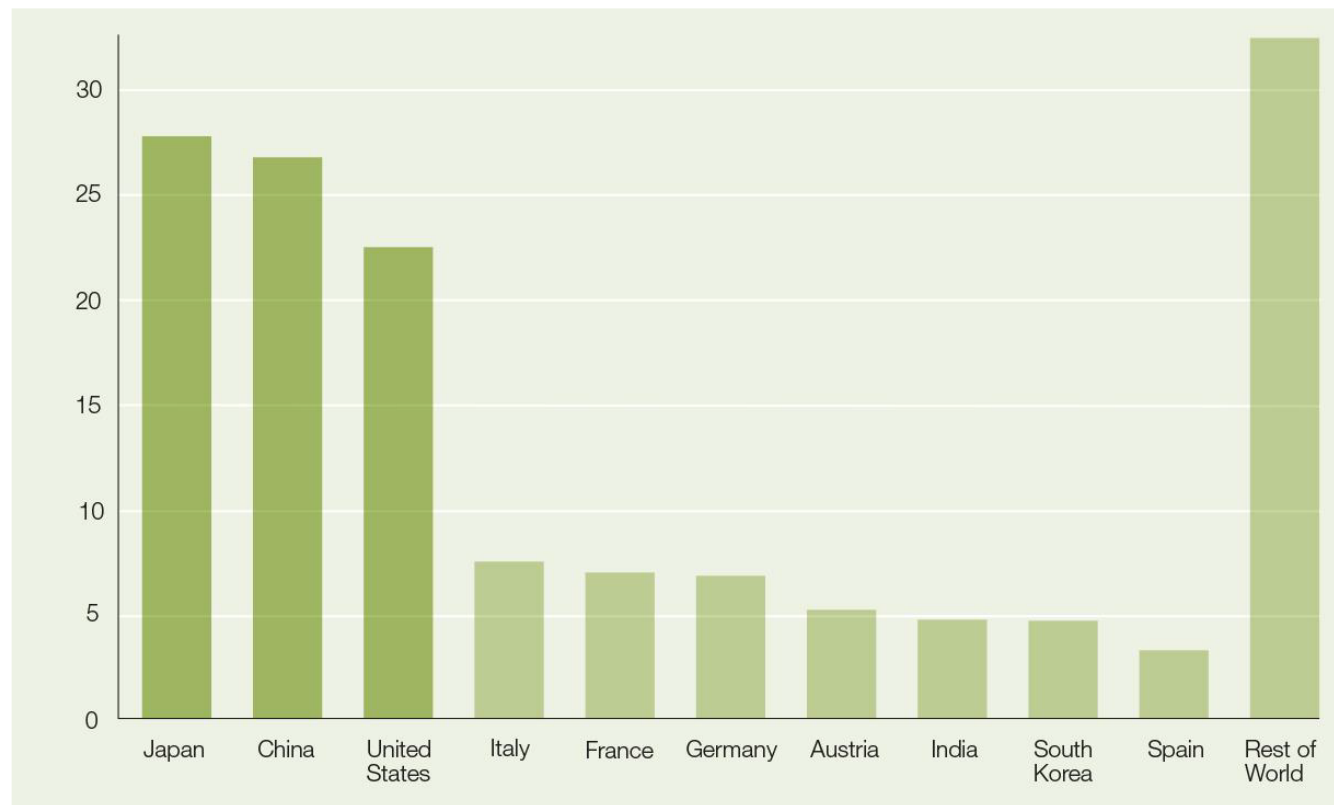
Δικτυακοί τόποι μαθήματος:

ΠΕ: <https://eclass.uowm.gr/courses/HMMY112/>

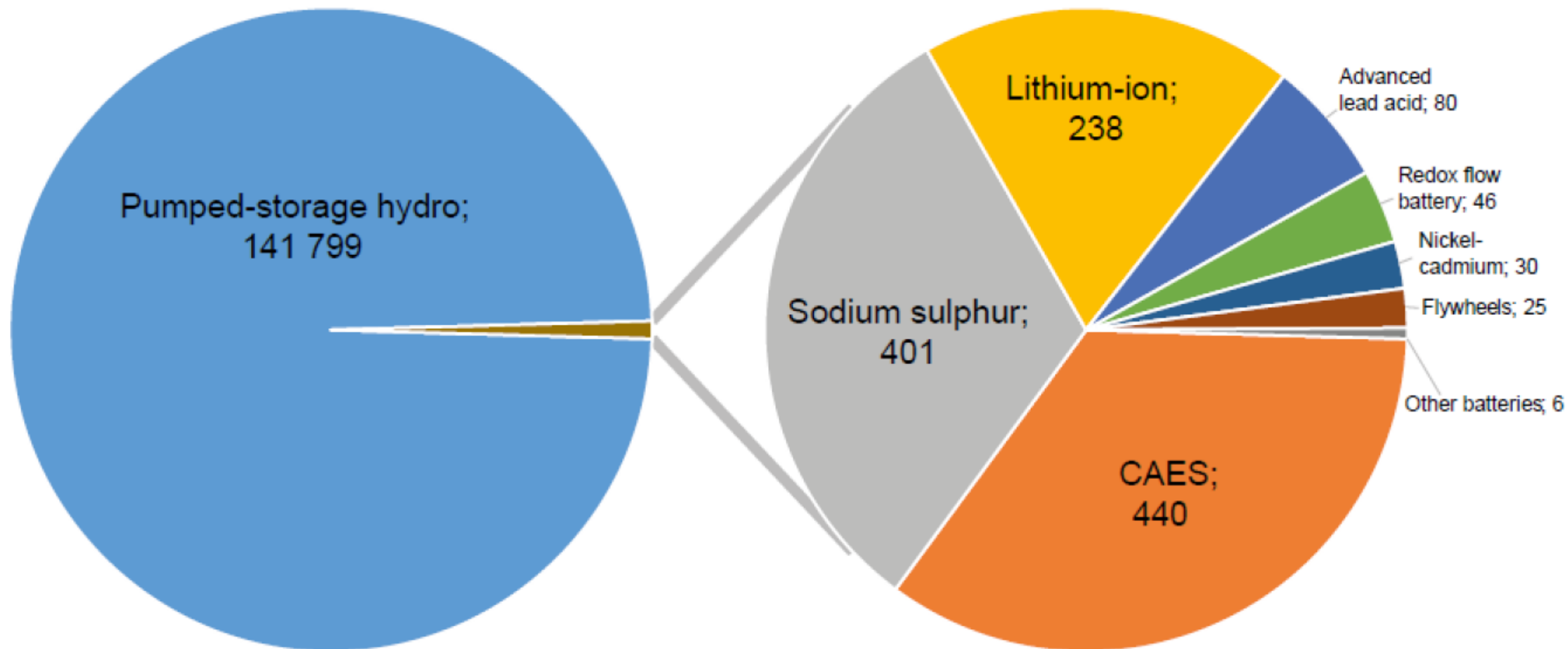
ΤΕ: <https://eclass.teiwm.gr/courses/EE193/>



- ✓ Αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Storage - PHS)
- ✓ Αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο αποθήκευσης σε ΣΗΕ
- ✓ Σε διεθνές επίπεδο υπάρχουν έργα εγκατεστημένης ισχύος σχεδόν 150 GW (αποτελούν το 99% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας)
- ✓ Αυτή τη στιγμή έργα δυναμικότητας περίπου 20 GW βρίσκονται σε φάση κατασκευής σε όλο τον κόσμο



Πηγή: International Hydropower Association, 2017, Key Trends in Hydropower.





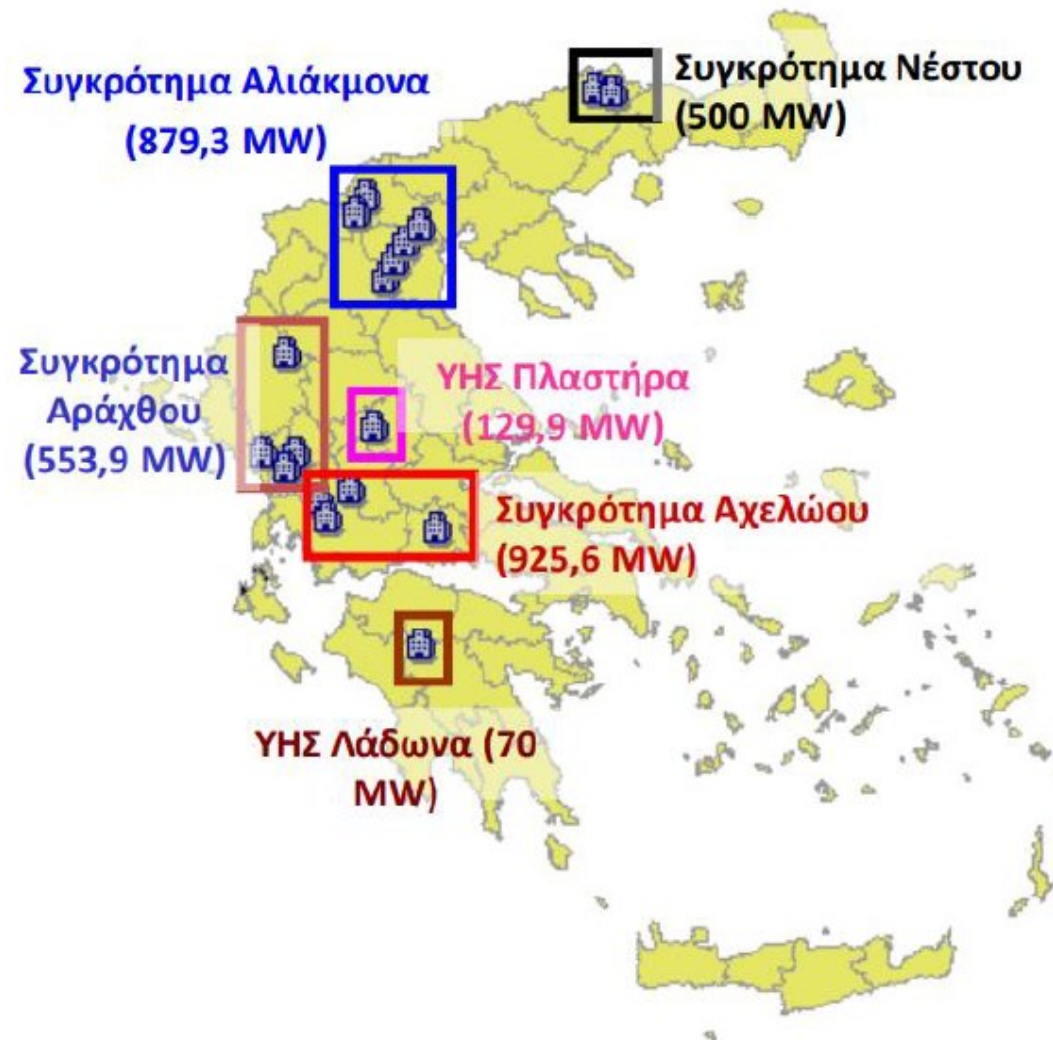
- ✓ Η τεχνολογία εφαρμόστηκε αρχικά στη Ζυρίχη, στην Ελβετία, στις αρχές της δεκαετίας του 1890, όταν ένας τοπικός ποταμός συνδεόταν υδραυλικά με μια κοντινή λίμνη μέσω μιας μικρής μονάδας αντλησιοταμίευσης
- ✓ Τα έργα αντλησιοταμίευσης έχουν παράσχει εμπορικές δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας και πλεονεκτήματα σταθεροποίησης του δικτύου από τη δεκαετία του 1920. Η πρώτη εφαρμογή μεγάλης κλίμακας αναφέρεται το 1929 στην Γερμανία. Στη συνέχεια, η τεχνολογία βελτιώθηκε και αναπτύχθηκε σημαντικά
- ✓ Στη δεκαετία του 1970 και του 1980, οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια του δικτύου και του εφοδιασμού, καθώς και οι απαιτήσεις εξισορρόπησης του βασικού φορτίου, προκάλεσαν ώθηση στα έργα αντλησιοταμίευσης
- ✓ Το 2015, η Συμφωνία για το Κλίμα του Παρισιού έθεσε παγκόσμιους στόχους για την άμβλυνση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Πολλές χώρες προώθησαν τη παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό οδήγησε σε αυξανόμενη ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας. Επί του παρόντος, η αντλησιοταμίευση είναι η βασική τεχνολογία για υπηρεσίες αποθήκευσης ενέργειας σε ΣΗΕ



Υδροηλεκτρική Ενέργεια στην Ελλάδα



- ✓ Στη δυτική και βόρεια Ελλάδα υπάρχει ιδιαίτερα πλούσιο δυναμικό υδατοπτώσεων λόγω της διαμόρφωσης λεκανών απορροής και των σημαντικών βροχοπτώσεων
- ✓ Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 3060 MW
- ✓ Η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι 4000 – 5000 GWh
- ✓ Η μέση συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 8% – 10%
- ✓ Η ενέργεια που προέρχεται από τους ΥΗΣ καλύπτει φορτία αιχμής
- ✓ Υπάρχει μεγάλη δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης ΥΗΣ

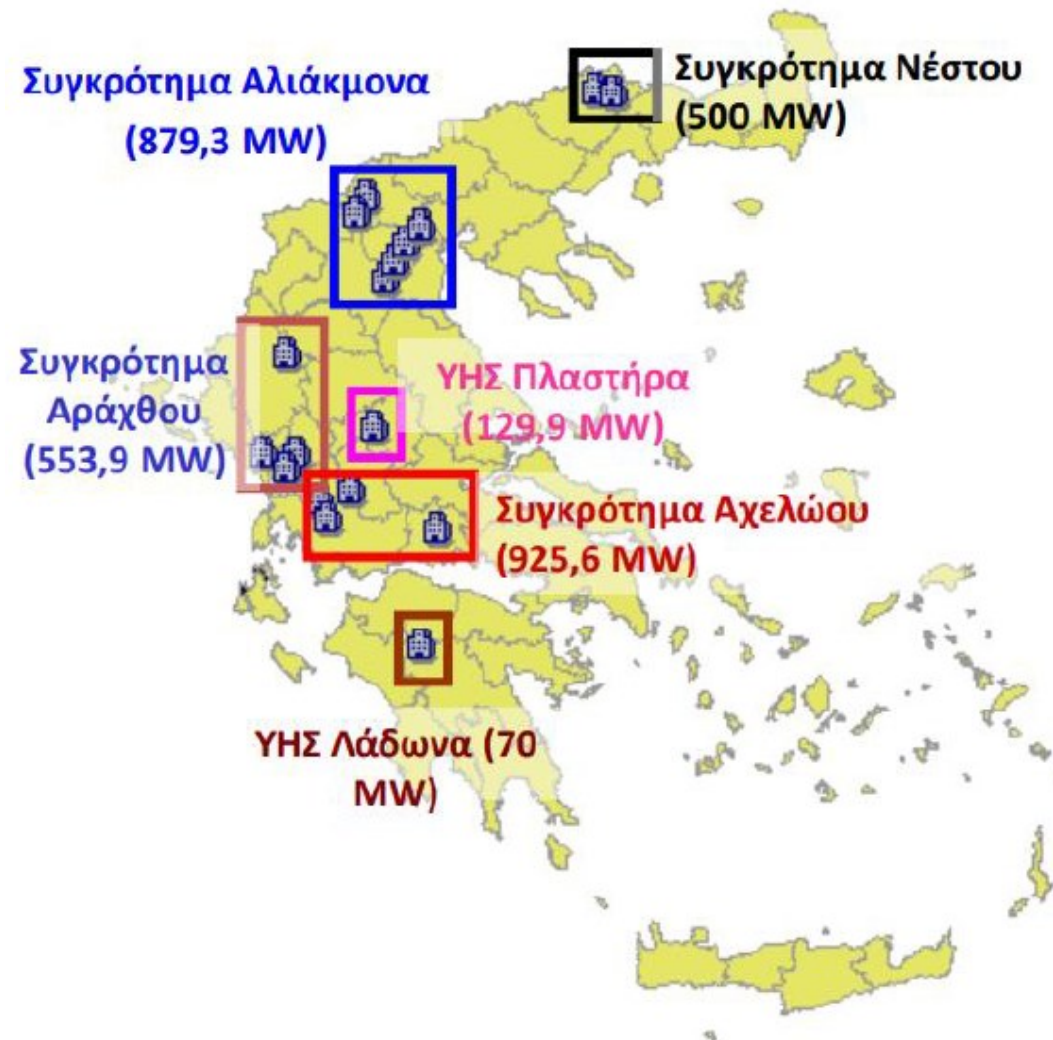




Αντλησιοταμίευση στην Ελλάδα



- ✓ Στην Ελλάδα λειτουργούν 2 αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα:
 - Της Σφηκιάς στον ποταμό Αλιάκμονα (1985) με 3 αναστρέψιμες μονάδες ισχύος $3 \cdot 105 = 315$ MW
 - Του Θησαυρού στον ποταμό Νέστο (1998) με 3 αναστρέψιμες μονάδες ισχύος $3 \cdot 127 = 381$ MW

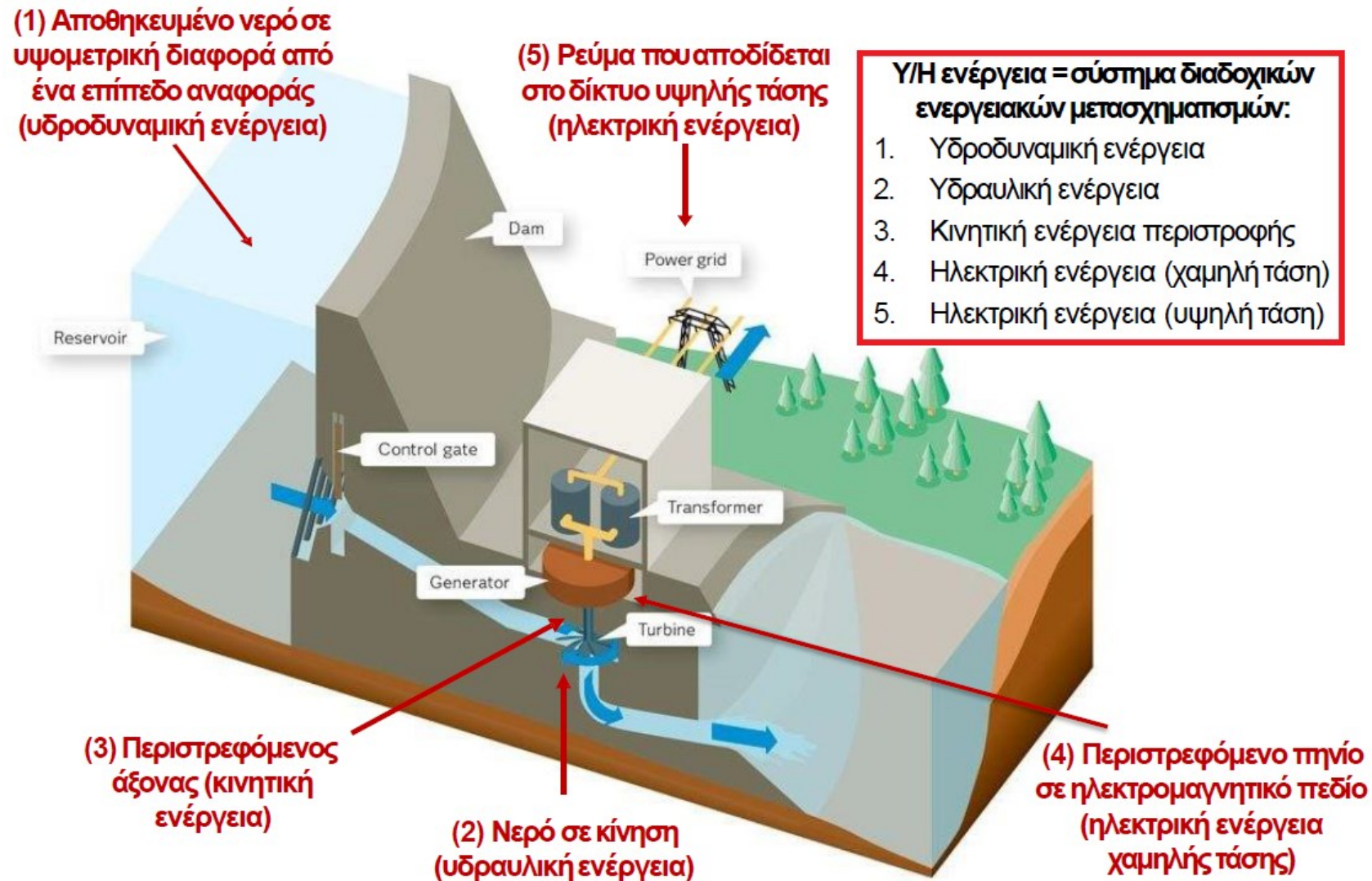


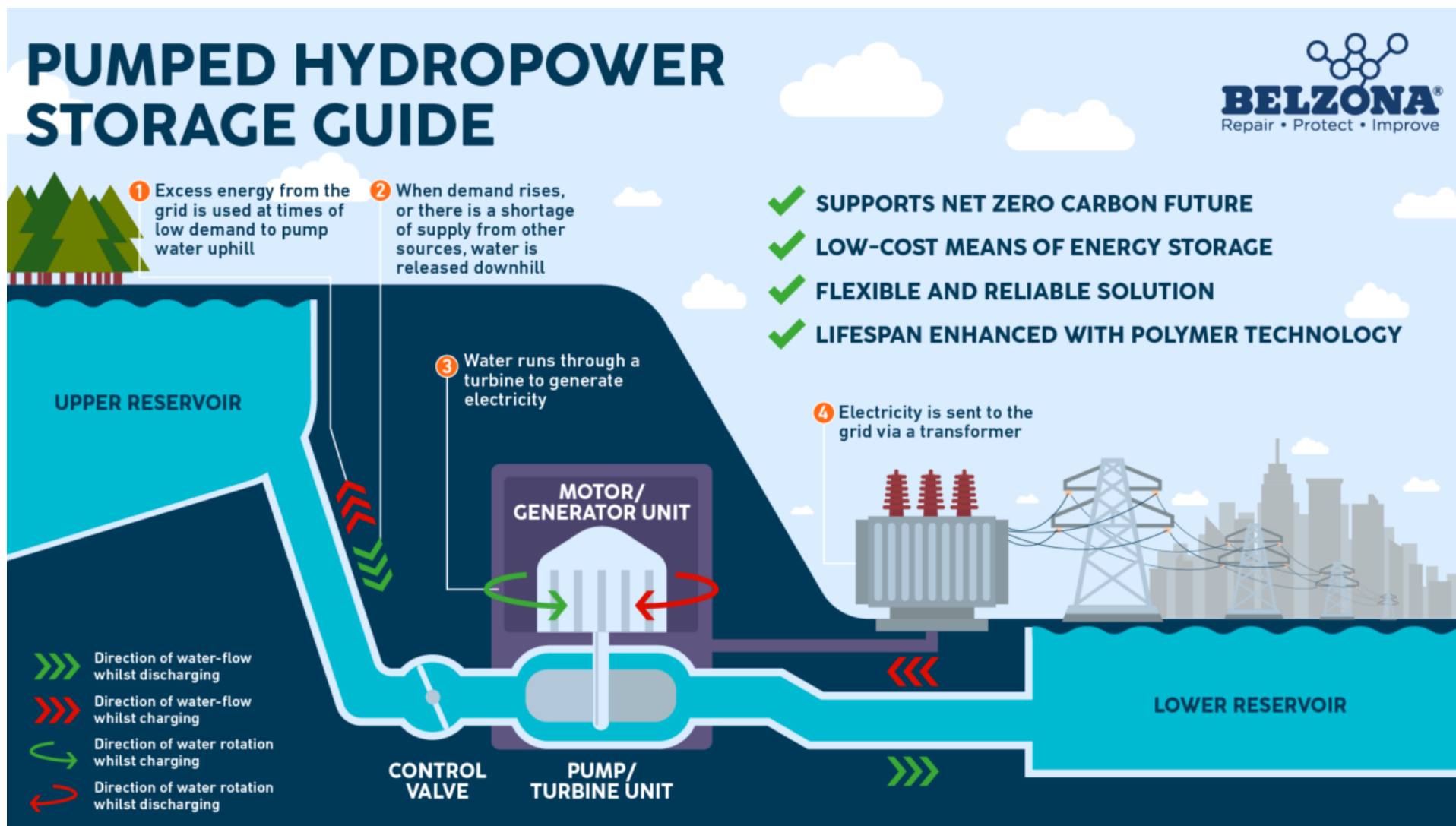


- ✓ Ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα παρακάτω:
 - Μια αντλία ή ένα σύστημα αντλιών
 - Έναν υδροστρόβιλο ή ένα σύστημα υδροστροβίλων
 - Δύο δεξαμενές νερού, οι οποίες βρίσκονται σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους
 - Ένα σύνολο σωληνώσεων για την άντληση νερού από την κάτω δεξαμενή προς την άνω
 - Ένα σύνολο σωληνώσεων για την προσαγωγή νερού από την άνω δεξαμενή προς την κάτω μέσω του υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
 - Μια ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με την αντλία και τον υδροστρόβιλο



Αντλησιοταμίευση – Αρχές Λειτουργίας







- ✓ Σε αυτό το σημείο είναι αναγκαίο να αναφερθούν οι διαφορές ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος και ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης
 - **Αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα**: Υπάρχει ενιαίος αγωγός στον οποίο τοποθετείται ειδικός τύπος στροβίλου (αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που ονομάζεται αντλιοστρόβιλος). Ο αντλιοστρόβιλος έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως αντλία (φάση αποθήκευσης) είτε ως στρόβιλος (φάση παραγωγής) με αντιστροφή της φοράς περιστροφής της πτερωτής (του δρομέα) και της φοράς της ροής
 - **Σύστημα αντλησιοταμίευσης**: Υπάρχουν δύο παράλληλοι αγωγοί. Ο ένας εξοπλισμένος με συμβατικό υδροστρόβιλο και ο δεύτερος με αντλία. Το βασικό πλεονέκτημα του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης σε σχέση με το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα, είναι ότι κάθε μηχανή (υδροστρόβιλος και αντλία) έχει τα βέλτιστα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Αντίθετα στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα είναι ανάγκη να γίνεται συμβιβασμός στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της στροβιλοαντλίας



✓ Ο πλήρης κύκλος περιλαμβάνει:

- Κατά τη φάση της αποθήκευσης ενέργειας → άντληση νερού από ένα κάτω ταμιευτήρα σε ένα άνω ταμιευτήρα (μετατρέπεται η ηλεκτρική ενέργεια σε υδροδυναμική)
- Κατά τη φάση της παραγωγής → διακίνηση νερού από τον άνω ταμιευτήρα στον κάτω. Η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω υδροστροβίλων

✓ Λειτουργία συστήματος:

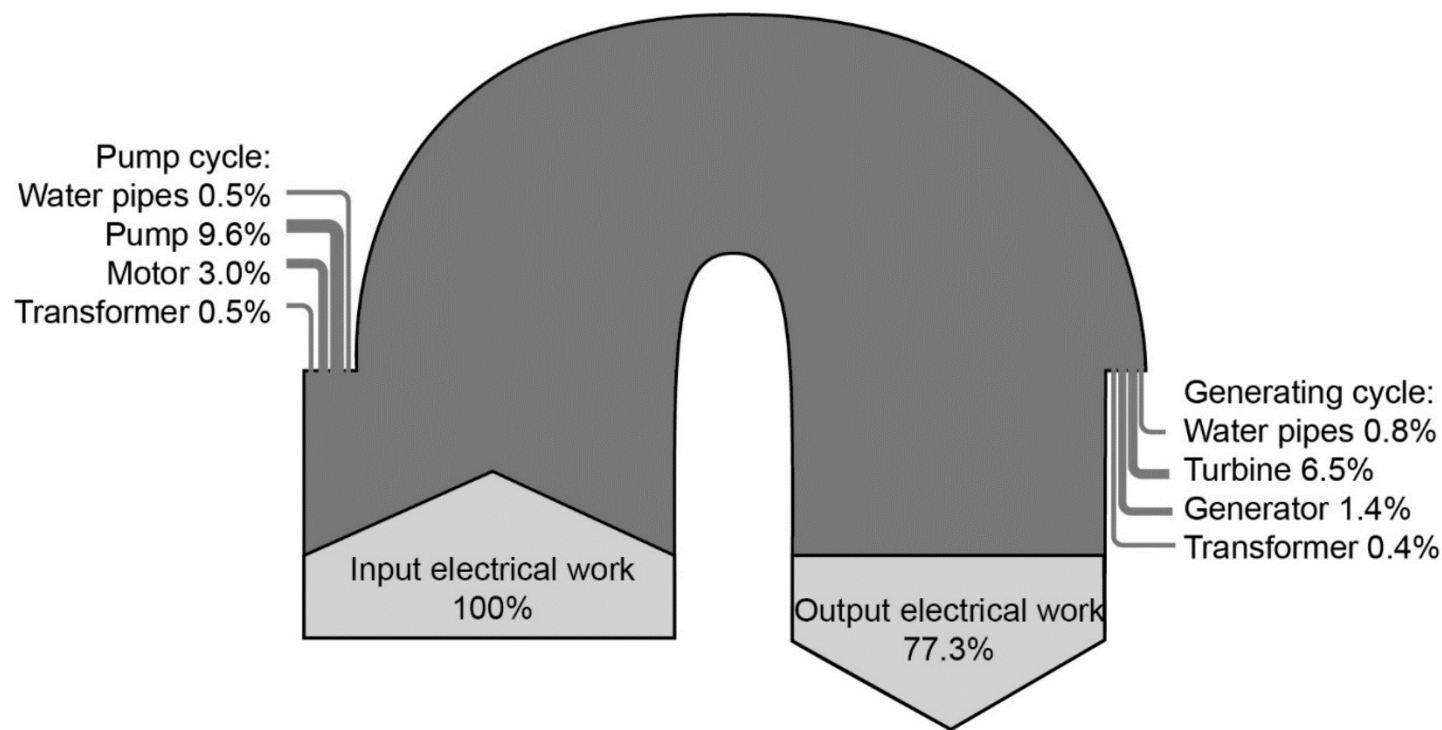
- Παραγωγή ενέργειας τις ώρες αιχμής της ζήτησης
- Άντληση νερού για αποθήκευση ενέργειας τις ώρες χαμηλής ζήτησης



- ✓ **Παραδοσιακή θεώρηση** (που οδήγησε στην ανάπτυξη των πρώτων σταθμών αντλησιοταμίευσης):
 - Εκμετάλλευση της περίσσειας νυχτερινής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς βάσης. Πράγματι, στα συμβατικά ΣΗΕ οι μεγάλοι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί δεν σταματούν τη λειτουργία τους τις νυχτερινές ώρες για παράδειγμα που μειώνεται η ισχύς του συνολικού φορτίου. Η περίσσεια ενέργεια πρέπει να αξιοποιηθεί (εξ ου και η χαμηλή τιμή του νυχτερινού ρεύματος)
- ✓ **Σύγχρονη θεώρηση** (που οδηγεί σε αυξημένο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τέτοιων σταθμών):
 - Εξομάλυνση ελλειμμάτων και πλεονασμάτων ενέργειας που δημιουργούνται λόγω της μη ελεγχόμενης και διαλείπουσας παραγωγής από μονάδες ΑΠΕ



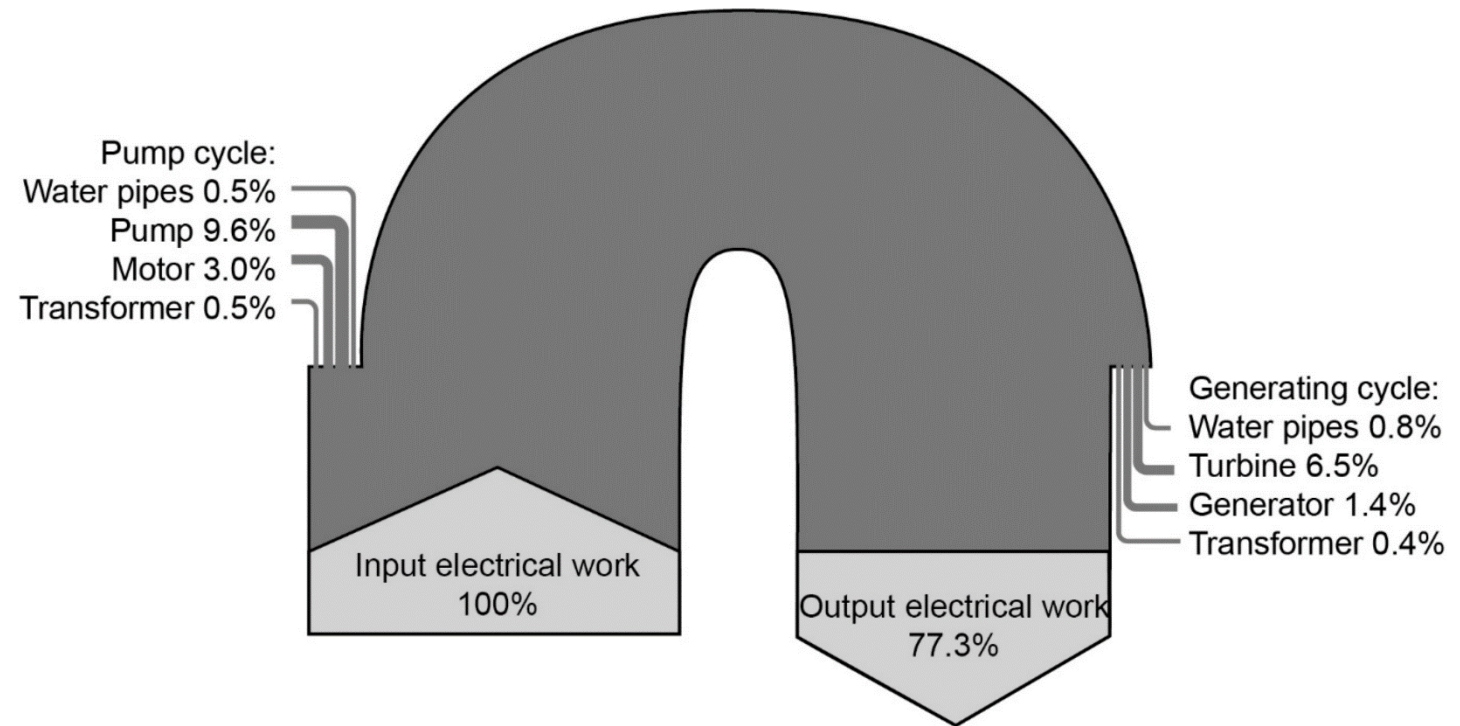
- ✓ Η διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδραυλική μέσω της άντλησης και στη συνέχεια η εκ νέου μετατροπή της σε ηλεκτρική μέσω των υδροστροβίλων συνοδεύεται από απώλειες ενέργειας
- ✓ Οι συνολικές απώλειες ενέργειας σε έναν κύκλο άντλησης – παραγωγής κυμαίνονται από 20% έως 35% (ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας, την επιλογή του εξοπλισμού της κα)



Πηγή: Economic Feasibility of Semi-Underground Pumped Storage Hydropower Plants in Open-Pit Mines, Energies.



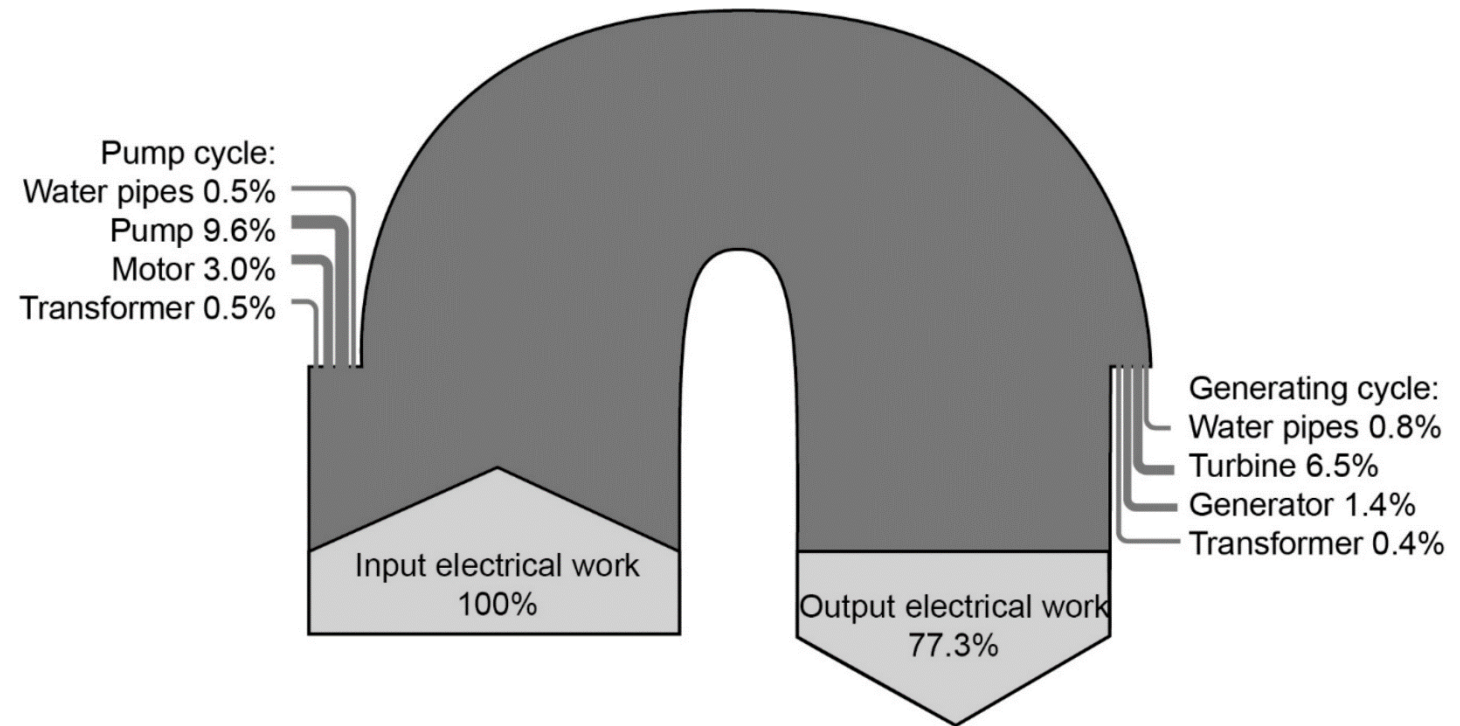
- ✓ Οι απώλειες γενικά διακρίνονται σε:
 - Υδραυλικές
 - Μηχανικές
 - Ηλεκτρικές
- ✓ Υδραυλικές απώλειες: στον αγωγό κατάθλιψης (άντλησης) και στον αγωγό προσαγωγής (πτώσεως). Εξαρτώνται κυρίως από τη διάμετρο του αγωγού και το μήκος του, δηλαδή το μήκος μεταξύ του κάτω και άνω ταμιευτήρα



Πηγή: Economic Feasibility of Semi-Underground Pumped Storage Hydropower Plants in Open-Pit Mines, Energies.



- ✓ Μηχανικές απώλειες: Απώλειες αντλίας - ηλεκτροκινητήρα, υδροστροβίλου – γεννήτριας. Εξαρτώνται από τον τύπο και το μέγεθος του εξοπλισμού. Οι συνολικές απώλειες ενέργειας είναι αναλογικά μεγαλύτερες όσο το μέγεθος των μηχανών είναι μικρότερο
- ✓ Ηλεκτρικές απώλειες: Στον κινητήρα, στη γεννήτρια, στο μετασχηματιστή του συγκροτήματος



Πηγή: Economic Feasibility of Semi-Underground Pumped Storage Hydropower Plants in Open-Pit Mines, Energies.



✓ Βασικά **πλεονεκτήματα**:

- Δυνατότητα αποθήκευσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας συγκριτικά με άλλους τρόπους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας
- Ευέλικτες μονάδες στην εκκίνηση και τον τερματισμό τους
- Έχουν γρήγορη απόκριση και ικανότητα να παρακολουθούν τις μεταβολές του φορτίου, ομαλές ή απότομες, και να καλύπτουν τις αιχμές του ηλεκτρικού συστήματος. Τις αιχμές ζήτησης του ηλεκτρικού φορτίου αντί να τις αναλάβουν οι υψηλού κόστους θερμικές μονάδες, μπορεί να τις αναλάβει το σύστημα αντλησιοταμίευσης, απ' τη στιγμή που τεθεί σε λειτουργία το σύστημα υδροστροβίλων, με αποτέλεσμα να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου και η έκλυση καυσαερίων. Το κέρδος προκύπτει απ' την εξοικονόμηση καυσίμων



✓ Βασικά **πλεονεκτήματα**:

- Ευελιξία και υπηρεσίες όλων των ειδών (ρύθμιση συχνότητας, εφεδρείες όλων των τύπων, ετοιμότητα, διαχείριση τάσης, black start) Οι δυνατότητες αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε μη διασυνδεδεμένα νησιά που λειτουργούν ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες δεν έχουν σταθερή παραγωγή και έτσι «επιβαρύνουν» τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου
- Η παραγωγή ενέργειας από συστήματα αντλησιοταμίευσης είναι πολύ πιο οικονομική για τους κατοίκους των μη διασυνδεδεμένων νησιών σε σχέση με τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής τους
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (>50 έτη) και θεωρητικά άπειρος αριθμός κύκλων λειτουργίας
- Μεγάλη ισχύς και ενέργεια (> GW, > 6 h)
- Μεγάλη εμπειρία σε αντίστοιχα έργα (εμπειρία διαχείρισης, κατασκευής, κλπ). Πολύ ώριμη τεχνολογία



- ✓ Τα σημαντικότερα **μειονεκτήματα** της αντλησιοταμίευσης αφορούν:
 - Γεωγραφικούς, γεωλογικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς που σχετίζονται με τη σχεδίαση των ταμιευτήρων. Τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα παρουσιάζουν δυσκολία εύρεσης τοπογραφικά κατάλληλων περιοχών, οι οποίες έχουν επαρκή χωρητικότητα νερού και κατάλληλη υψομετρική διαφορά
 - Το υψηλό κόστος επένδυσης
 - Τους μεγάλους χρόνους υλοποίησης (για αδειοδότηση και κατασκευή)



- ✓ Μια ειδική κατηγορία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών, **ιδιαίτερης σημασίας για την Ελλάδα** και, ειδικότερα για τα ελληνικά νησιά, είναι η χρήση θαλασσινού νερού ως εργαζόμενου μέσου στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό και η απευθείας χρήση της θάλασσας ως κάτω δεξαμενή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού
- ✓ Η περίπτωση λειτουργίας αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών με θαλασσινό νερό παρέχει μία πολύτιμη εναλλακτική λύση σε γεωγραφικές περιοχές με χαμηλές βροχοπτώσεις, καθώς εξασφαλίζει τη διαθεσιμότητα του εργαζόμενου μέσου χωρίς να επηρεάζει τα περιορισμένα αποθέματα γλυκού νερού
- ✓ Προφανώς, τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά με χρήση θαλασσινού νερού εγκαθίστανται επί της ακτογραμμής
- ✓ Η μορφολογία του εδάφους στην ακτογραμμή αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σχετικά με την τεχνική εφικτότητα του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού και τη διαμόρφωση του συνολικού αρχικού κόστους εγκατάστασής του



- ✓ Λόφοι και μικρά υψώματα με απόλυτα υψόμετρα από 200m έως 600m θεωρούνται ιδανικά για την εγκατάσταση αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών
- ✓ Οι ήπιες κλίσεις των πρανών από τις κορυφές προς την ακτή, καθώς και η ήπια μορφολογία τόσο των πρανών όσο και της ακτής (απουσία γκρεμών, χαραδρών κλπ), συμβάλλουν προς την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων χωματουργικών έργων για την εγκατάσταση των αγωγών και των σταθμών υδροδυναμικών μηχανών (αντλιοστάσιο και υδροηλεκτρικός σταθμός). Ιδιαίτερα οι απότομες κλίσεις των πρανών ενδεχομένως να συνεπάγονται την κατασκευή υπόγειων σηράγγων
- ✓ Τα παραπάνω συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης του έργου



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

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

- ✓ όπου ρ η πυκνότητα του νερού (1000 kg/m³), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²), γ το ειδικό βάρος του νερού (9.81 kN/m³) και V ο όγκος (m³). Στα υδροενεργειακά έργα, η υψομετρική διαφορά H αναφέρεται και ως ολικό ή ακαθάριστο ύψος πτώσης

- ✓ **Υδραυλική ενέργεια:**

$$E_{\gamma} = \gamma V H_n$$

- ✓ όπου H_n το λεγόμενο καθαρό ύψος πτώσης



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

$$E = \eta E_r = \eta \gamma V H_n$$

- ✓ όπου η ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων
- ✓ Ποια θα πρέπει να είναι, όμως, η ισχύς των στροβίλων και των αντλιών???
- ✓ Η ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P = dE / dt$$

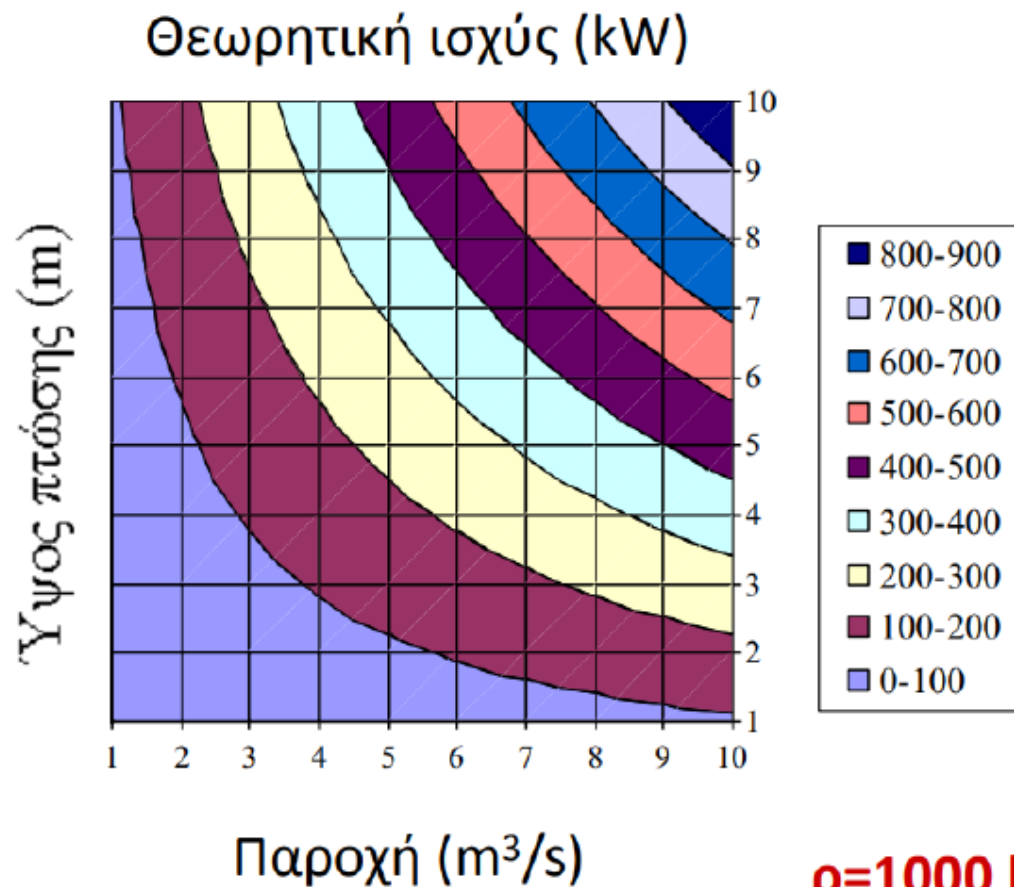
- ✓ Ισχύει όμως: $Q = dV / dt$. Ο ρυθμός μεταβολής του όγκου ενός ρευστού καλείται ροή ή παροχή. Η παροχή που διέρχεται από τον αγωγό πτώσης (και τους στροβίλους) αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος σχεδιασμού του Υ/Η έργου
- ✓ Έτσι, η ισχύς δίνεται από τη σχέση: $P = \eta \gamma Q H_n = \eta \rho g Q H_n$



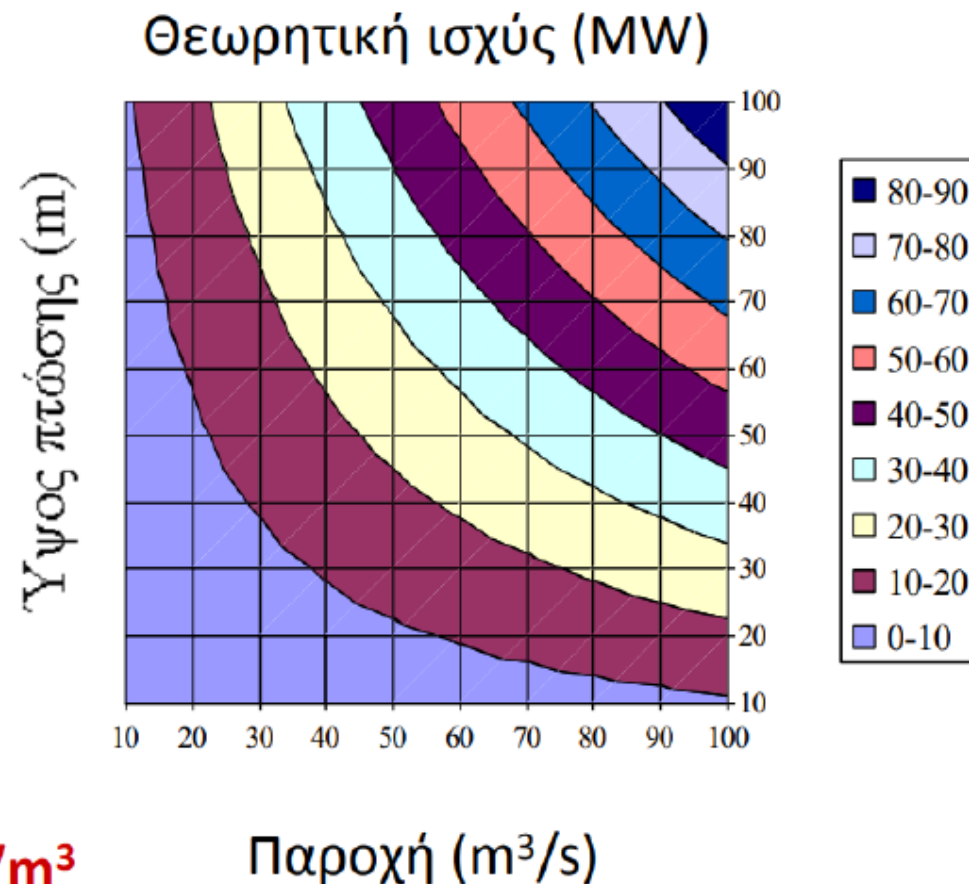
- ✓ Από την προηγούμενη σχέση γίνεται φανερός ο ρόλος της υψομετρικής διαφοράς H μεταξύ κάτω και άνω ταμιευτήρα για την αποθήκευση δεδομένης ισχύος P επί κάποιο χρονικό διάστημα δt , άρα ενέργειας: $E=P\delta t$, όσο μεγαλύτερη είναι η υψομετρική διαφορά H τόσο μικρότερη η αντίστοιχη παροχή Q και η ποσότητα νερού ($Q\delta t$) που αντιστοιχεί
- ✓ Άρα για την αποθήκευση της ίδιας ισχύος και ενέργειας όσο αυξάνεται η υψομετρική διαφορά H μειώνεται η παροχή, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους:
 - των σωληνώσεων (μικρότερη διάμετρος),
 - των αντλιών και
 - του ταμιευτήρα λόγω της μικρότερης χωρητικότητας που απαιτείται για την αποθήκευση της ίδιας ποσότητας ενέργειας
- ✓ Για τον λόγο αυτό τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα θεωρούνται οικονομοτεχνικά αποδοτικά όταν η υδραυλική πτώση είναι υψηλότερη των 100 m περίπου



Αντλησιοταμίευση – Βασικά Μεγέθη



$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$
 $g=9.81 \text{ m/s}^2$
 $n=0.9$





Αντλησιοταμίευση – Βασικά Μεγέθη

