



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 9: Ενεργειακή Αποθήκευση

Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

Τι είναι Ενεργειακή Αποθήκευση;

- ▶ Η αποθήκευση ενέργειας είναι κρίσιμο στοιχείο των ΑΠΕ και της ενεργειακής μετάβασης.
- ▶ Στόχοι:
 - ▶ εξομάλυνση παραγωγής-ζήτησης
 - ▶ ευστάθεια δικτύων
 - ▶ αύξηση διείσδυσης ΑΠΕ
 - ▶ μείωση κόστους λειτουργίας
 - ▶ βελτίωση αποδόσεων συστημάτων θέρμανσης & ψύξης
- ▶ Είδη: θερμική, μηχανική, χημική, ηλεκτρική.

Γιατί Θερμική Αποθήκευση;

- ▶ Τα 2/3 της τελικής ενέργειας στην Ευρώπη είναι θερμότητα & ψύξη.
- ▶ Μεγάλες εφαρμογές:
 - ▶ ηλιακά θερμικά
 - ▶ αντλίες θερμότητας
 - ▶ district heating/cooling
 - ▶ Βιομηχανική θερμότητα
 - ▶ CO₂ heat pumps, CHP, ORC
- ▶ Η TES (Thermal Energy Storage) είναι οικονομικότερη από μπαταρίες (€/kWh).
- ▶ Έχει τεράστιο εύρος θερμοκρασιών:
 - 0-120° C (νερό)
 - 100-600° C (molten salts)
 - 500-1200° C (θερμοχημική)

Κατηγορίες Θερμικής Αποθήκευσης

- ▶ **Αισθητή θερμότητα (Sensible Heat Storage):**
 - ▶ νερό, σκυρόδεμα, έδαφος
 - ▶ αποθήκευση μέσω αύξησης θερμοκρασίας
- ▶ **Λανθάνουσα θερμότητα (Latent Heat / PCM):**
 - ▶ υλικά αλλαγής φάσης
 - ▶ πολύ υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης
- ▶ **Θερμοχημική αποθήκευση (Thermochemical Storage):**
 - ▶ αναστρέψιμες χημικές αντιδράσεις
 - ▶ η υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα

Αισθητή Θερμότητα (Θεωρία)

Η αποθηκευμένη ενέργεια δίνεται από:

$$Q = m c_p \Delta T$$

Όπου:

- ▶ m : μάζα (kg)
- ▶ c_p : θερμοχωρητικότητα (kJ/kgK)
- ▶ ΔT : μεταβολή θερμοκρασίας (K)

Φυσική σημασία: θερμοταμιευτής αυξάνει θερμοκρασία → αποθηκεύει ενέργεια.

Υλικά:

- ▶ νερό ($c_p=4.18$ kJ/kgK - κορυφαίο)
- ▶ σκυρόδεμα
- ▶ έδαφος

Θερμική Αποθήκευση Νερού

Η πιο διαδεδομένη μορφή TES.

Πλεονεκτήματα:

- ▶ πολύ χαμηλό κόστος (5-20 €/kWh_{th})
- ▶ υψηλό c_p
- ▶ μεγάλη αξιοπιστία
- ▶ εύκολη ενσωμάτωση με Α/Θ

Μειονεκτήματα:

- ▶ περιορισμός 0-100 °C
- ▶ απαιτούνται μεγάλοι όγκοι

Παράδειγμα Υπολογισμού 1 (Αισθητή Θερμότητα)

Δίνεται:

- ▶ Δεξαμενή 20 m³ νερού
- ▶ Θερμοκρασίες: 35 → 75 °C

Να βρεθεί η αποθήκευση ενέργειας.

Λύση:

Μάζα: $m = 20\,000\text{kg}$

$$Q = mc_p\Delta T = 20,000 \cdot 4.18 \cdot (75 - 35) \approx 3.35 \times 10^6\text{kJ}$$

Σε kWh:

$$Q \approx 930\text{ kWh}$$

Molten Salts (Υψηλής Θερμοκρασίας TES)

Χρησιμοποιούνται σε CSP (concentrated solar panels) (ηλιοθερμικά).

Συνήθη μείγματα:

- ▶ $\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$
- ▶ Li/Na/K νιτρικά

Θερμοκρασίες: 250-600° C.

Πλεονεκτήματα:

- ▶ υψηλή θερμοκρασία
- ▶ υψηλή ενεργειακή πυκνότητα
- ▶ πολύ καλή συμβατότητα με CSP

Μειονεκτήματα:

- ▶ κόστος
- ▶ κρυστάλλωση
- ▶ διάβρωση

Θερμική Λανθάνουσα Αποθήκευση (PCM)

Τα PCM αποθηκεύουν θερμότητα με **μετάβαση φάσης (solid $\rightleftharpoons$ liquid)**.

Η αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα:

$$Q = mL$$

όπου L η λανθάνουσα θερμότητα τήξης (kJ/kg).

Πλεονεκτήματα:

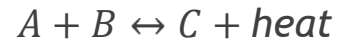
- ▶ σταθερή θερμοκρασία τήξης
- ▶ πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας
- ▶ ιδανικό για buildings & DHW

Παραδείγματα PCM:

- ▶ παραφίνες
- ▶ άλατα
- ▶ λιπαρά οξέα

Thermochemical Storage (TCS)

Αποθήκευση με αναστρέψιμες αντιδράσεις:



Ιδιότητες:

- ▶ τεράστια ενεργειακή πυκνότητα
- ▶ αποθήκευση χωρίς απώλειες για μήνες
- ▶ υψηλή εξέργεια

Παραδείγματα:

- ▶ $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$
- ▶ $\text{MgO}/\text{Mg}(\text{OH})_2$
- ▶ metal hydrides
- ▶ salt hydrates

Χρήση: seasonal storage - μεγάλης διάρκειας.

Θερμική Διαστρωμάτωση (Thermal Stratification)

- ▶ Η θερμική διαστρωμάτωση είναι η **κατακόρυφη στρώση θερμοκρασιών** μέσα σε έναν θερμοταμιευτή.
- ▶ Το ζεστό νερό ανεβαίνει, το κρύο μένει κάτω → φυσική στρώση μέσω πυκνότητας.
- ▶ Η σωστή διαστρωμάτωση **αυξάνει την αποτελεσματικότητα** του ταμιευτή.

Πλεονεκτήματα:

- ▶ Λιγότερη ανάμιξη → υψηλότερη θερμοκρασία χρήσης
- ▶ Μικρότερες απώλειες
- ▶ Βελτίωση COP αντλίας θερμότητας

Παράγοντες που την επηρεάζουν:

- ▶ θέση εισόδων/εξόδων,
- ▶ ρυθμός ροής,
- ▶ baffles,
- ▶ mixing.

Μοντελοποίηση Διαστρωμάτωσης

Δύο θεωρήσεις:

- ▶ **Perfect stratification** (ιδανικό μοντέλο)
- ▶ **Mixed tank** (πλήρης ανάμιξη)

Ενδιάμεση προσέγγιση: πολυζωνικό μοντέλο (multi-node model).

Εξίσωση ενέργειας ανά ζώνη:

$$m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = \sum \dot{m}_{in} (h_{in} - h_i) + UA_i (T_{amb} - T_i)$$

Χρησιμοποιείται σε:

- ▶ ηλιακά θερμικά,
- ▶ district heating,
- ▶ μονάδες θέρμανσης με A/Θ.

Θερμικές Απώλειες Ταμιευτών

Οι απώλειες περιγράφονται από:

$$Q_{loss} = UA (T_{tank} - T_{amb})$$

όπου:

- ▶ **U**: συνολικός συντελεστής μεταφοράς
- ▶ **A**: επιφάνεια δεξαμενής
- ▶ **T_{tank}**: μέση θερμοκρασία
- ▶ **T_{amb}**: περιβάλλον

Τυπικές απώλειες: 0.5-2 W/m²K.

Ρόλος μόνωσης:

- ▶ αυξάνει $U \cdot A \rightarrow$ μειώνει απώλειες
- ▶ μεγαλύτερο πάχος $\rightarrow$ καλύτερη απόδοση

BTES (Borehole Thermal Energy Storage)

Seasonal storage σε γεωτρήσεις 30-150 m.

Αρχή λειτουργίας:

- ▶ το καλοκαίρι αποθήκευση θερμότητας στο υπέδαφος
- ▶ τον χειμώνα άντληση για θέρμανση

Υλικά γεμίσματος:

- ▶ μπετονίτης
- ▶ χαλαζιακή άμμος
- ▶ νερό-γλυκόλη

Τυπικές αποδόσεις: 45-65%.

Εφαρμογές: Σουηδία, Δανία, Καναδάς.

PTES (Pit Thermal Energy Storage)

Μεγάλοι θερμοταμιευτές επιφανείας (μέχρι 100.000 m³).

Πλεονεκτήματα:

- ▶ πολύ χαμηλό κόστος (5-10 €/m³)
- ▶ εφαρμογή σε district heating

Θερμοκρασίες: 70-95° C.

Απώλειες: πολύ χαμηλές ανά m³.

Παράδειγμα: Marstal, Δανία.

ATES (Aquifer Thermal Energy Storage)

Αποθήκευση σε υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Λειτουργία:

- ▶ «θερμά» και «ψυχρά» πηγάδια
- ▶ θέρμανση / ψύξη κτιρίων
- ▶ πολύ υψηλή χωρητικότητα

Προϋποθέσεις:

- ▶ καλή υδρογεωλογία
- ▶ μη αλατούχος υδροφόρος
- ▶ αποφυγή ανάμιξης

Απόδοση: 60-70%.

CSP + Molten Salt Storage

Η ηλιοθερμία (Concentrating Solar Power) χρησιμοποιεί θερμικά ταμειυτήρια για **ηλεκτρικό φορτίο βάσης**.

Δυνατότητα αποθήκευσης:

- ▶ 6-15 ώρες
- ▶ θερμοκρασίες 300-600°C

Τυποποιημένη διάταξη:

- ▶ receiver
- ▶ hot tank
- ▶ cold tank
- ▶ ηλιακό πεδίο
- ▶ steam generator

Πλεονέκτημα: **σταθερή ηλεκτροπαραγωγή νύχτα**.

Λανθάνουσα Αποθήκευση (PCM)- Εμβάθυνση

Ιδιότητες PCM:

- ▶ μεγάλη L (latent heat 100-250 kJ/kg)
- ▶ μικρός όγκος
- ▶ σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας
- ▶ ενσωμάτωση σε τοίχους, δοχεία, DHW

Σύνολο εξίσωσης:

$$Q = m(c_p\Delta T_{solid} + L + c_p\Delta T_{liquid})$$

Προκλήσεις:

- ▶ υπερθέρμανση (superheating)
- ▶ υστέρηση φάσης (hysteresis)
- ▶ αγωγιμότητα χαμηλή → λύση: metal foams, fins

Thermochemical Storage - Τεχνική Ανάλυση

Αντιδράσεις:



(“φόρτιση”)



(“εκφόρτιση”)

Πλεονεκτήματα TCS:

- ▶ Η υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα: 400-600 kWh/m³
- ▶ Μηδενικές απώλειες κατά την αποθήκευση
- ▶ Ιδανικό για seasonal storage

Προκλήσεις:

- ▶ αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας
- ▶ υλικά και καταλύτες
- ▶ έλεγχος υγρασίας

Exergy Ανάλυση Θερμικής Αποθήκευσης

Η εξέργεια θερμότητας δίνεται από:

$$Ex = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

Όπου:

- ▶ Q: ποσότητα θερμότητας
- ▶ T: θερμοκρασία πηγής
- ▶ T₀: περιβάλλον (~293 K)

Σημασία:

- ▶ Αποθήκες υψηλής θερμοκρασίας έχουν **μεγάλη εξέργεια**
- ▶ Αποθήκες χαμηλής θερμοκρασίας έχουν μικρή

Παράδειγμα:

Αν T = 363 K (90°C):

$$1 - \frac{293}{363} = 0.19$$

→ μόνο 19% είναι διαθέσιμο ως έργο.

TES & Αντλίες Θερμότητας (Α/Θ)

Οι θερμικοί ταμιευτές βελτιώνουν τη λειτουργία των Α/Θ μέσω:

- ▶ εξομάλυνσης φορτίου → λιγότερες εκκινήσεις/σταματήματα
- ▶ αποθήκευσης φθηνής ενέργειας τις νυχτερινές ώρες
- ▶ αυξημένου COP επειδή η θερμοκρασία λειτουργίας σταθεροποιείται
- ▶ παροχής ισχύος αιχμής (peak shaving)

Σε μονάδες DH (district heating):

- ▶ TES + Α/Θ → κορυφαίος συνδυασμός για θερμοκρασίες 45-70° C
- ▶ TES επιτρέπει λειτουργία Α/Θ σε *βέλτιστη θερμοκρασία source*

TES & Ηλιακά Θερμικά (ST Collectors)

Οι θερμικοί ταμιευτές είναι *αναπόσπαστο μέρος* των ηλιακών συστημάτων:

Παραγωγή ΖΝΧ:

- ▶ δεξαμενές 150-500 L
- ▶ διπλής ή τριπλής ενέργειας
- ▶ ενσωμάτωση με ηλεκτρική αντίσταση / Α/Θ

Μεγάλα ηλιακά (Large-scale Solar Thermal):

- ▶ PTES + ηλιακά πεδία
- ▶ αποθήκευση για ώρες έως εβδομάδες
- ▶ χρήση για district heating (Δανία, Γερμανία)

Πρόβλημα υπερθέρμανσης:

- ▶ TES βοηθά στη διαχείριση υψηλών θερμοκρασιών >90° C.

TES σε District Heating (4ης και 5ης Γενιάς)

District heating 4ης γενιάς: θερμοκρασίες 65-80° C

District heating 5ης γενιάς: θερμοκρασίες 25-40° C, πλήρως αναστρέψιμες

Οι ρόλοι του TES:

- ▶ εξισορρόπηση ΑΠΕ (ηλιακά, αιολικά, υπερπλεόνασμα ηλεκτρισμού)
- ▶ χρήση με large-scale heat pumps
- ▶ νυχτερινή φόρτιση → ημερήσια εκφόρτιση
- ▶ seasonal storage (PTES, BTES, ATES)

Παράδειγμα:

- ▶ Marstal DH: PTES 75.000 m³ + ηλιακό πεδίο 33.000 m².

TES στη Βιομηχανία (Process Heat)

Αποθήκευση θερμότητας σε βιομηχανικές διεργασίες 100-500° C:

- ▶ food industry
- ▶ chemicals
- ▶ drying
- ▶ steam networks
- ▶ metal processing

Τεχνολογίες:

- ▶ molten salts
- ▶ θερμοταμιευτές λιθόσφαιρας
- ▶ TCS με οξείδια ($\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Οφέλη:

- ▶ peak shaving
- ▶ ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας
- ▶ μείωση κατανάλωσης φυσικού αερίου
- ▶ ευελιξία παραγωγής

Παραδείγματα Τυπικών Μεγεθών TES

Σύμφωνα με πραγματικά έργα:

Εφαρμογή	Όγκος	Θερμοκρασίες	Απώλειες
ΖΝΧ κατοικίας	150-500 L	45-75 °C	2-4 W
Πολυκατοικίες	2-20 m ³	50-70 °C	5-15 W
District heating	100-100.000 m ³	50-95 °C	πολύ χαμηλές
CSP molten salts	1.000-30.000 m ³	300-600 °C	0.2%/ημέρα

Παράδειγμα Υπολογισμού 2 (Συνδυασμός TES + Α/Θ)

Δίνεται:

- ▶ Δεξαμενή: 5 m³
- ▶ Α/Θ θερμοκρασία εξόδου: 55 °C
- ▶ Θερμοκρασία εισόδου δεξαμενής: 35 °C
- ▶ Εκτιμώμενη ζήτηση: 40 kWh

Ζητείται:

- α) Πόση ενέργεια αποθηκεύεται;
- β) Πόση ώρα μπορεί να καλύψει η δεξαμενή τη ζήτηση;

Λύση:

Μάζα: 5000 kg

$$Q = mc_p \Delta T = 5000 \cdot 4.18 \cdot (55 - 35)$$
$$Q = 418,000 \text{ kJ} = 116 \text{ kWh}$$

Χρόνος κάλυψης:

$$t = \frac{116}{40} = 2.9 \text{ ώρες}$$

Παράδειγμα Υπολογισμού 3 (PTES)

Δίνεται:

- ▶ PTES όγκου 50.000 m^3
- ▶ Θερμοκρασιακό εύρος: $35 \rightarrow 80^\circ \text{C}$
- ▶ Απώλειες: $0.5\%/\text{ημέρα}$

Ζητείται:

Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια και οι απώλειες ανά ημέρα.

Μάζα:

$$\begin{aligned}m &= 50,000 \text{ m}^3 = 50,000,000 \text{ kg} \\Q &= mc_p \Delta T = 50 \cdot 10^6 \cdot 4.18 \cdot 45 \\Q &= 9.4 \times 10^9 \text{ kJ} = 2.62 \times 10^6 \text{ kWh}\end{aligned}$$

Απώλειες ημέρας:

$$Q_{\text{loss}} = 0.005 \cdot 2.62 \times 10^6 = 13,100 \text{ kWh/ημέρα}$$

Παράδειγμα TCS ($\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Χρήση για seasonal storage.

Αντίδραση ενυδάτωσης:



Λανθάνουσα θερμότητα:

$$L \approx 1040 \text{ kJ/kg}$$

Για 10 τόνους:

$$Q = 10,000 \cdot 1040 = 1.04 \times 10^7 \text{ kJ} = 2,880 \text{ kWh}$$

Πλεονέκτημα: 100% διατήρηση ενέργειας μέχρι την εκφόρτιση.

Όρια TES σε Χαμηλές & Υψηλές Θερμοκρασίες

Χαμηλές T (<80 °C):

- ▶ νερό
- ▶ PCM χαμηλής τήξης
- ▶ ATES
- ▶ DHW

Μεσαίες T (80-300 °C):

- ▶ PCM υψηλής τήξης
- ▶ Βιομηχανικές διαδικασίες
- ▶ ORC preheating

Υψηλές T (300-600 °C):

- ▶ molten salts
- ▶ solar tower CSP
- ▶ gas-phase storage

Πολύ υψηλές T (600-1200 °C):

- ▶ TCS με οξείδια
- ▶ high-T reactors

Συνοπτική Σύγκριση TES Τεχνολογιών

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Θερμοκρασίες
Sensible heat	χαμηλό κόστος	μεγάλος όγκος	0-100° C
PCM	υψηλή πυκνότητα ενέργειας	χαμηλή αγωγιμότητα	-10-200° C
Molten salts	υψηλές θερμοκρασίες	διάβρωση	250-600° C
TCS	η υψηλότερη πυκνότητα	ακριβή υλικά	100-1200° C

Μηχανική Αποθήκευση Ενέργειας: Εισαγωγή

Μηχανική αποθήκευση = αποθήκευση ενέργειας σε βαρυτικά, κινητικά ή πιεστικά συστήματα.

Κύριες τεχνολογίες:

- ▶ Αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Storage, PHS)
- ▶ Περιστρεφόμενοι δίσκοι (Flywheels)
- ▶ Συμπιεσμένος αέρας (CAES / LAES)
- ▶ Βαρυτικά συστήματα (gravity storage - cranes, blocks)

Πλεονεκτήματα:

- ▶ μεγάλη διάρκεια ζωής (>30 έτη)
- ▶ υψηλή απόδοση
- ▶ μεγάλη ισχύς εξόδου
- ▶ κατάλληλη για grid balancing

Αντλησιοταμίευση (PHS): Αρχή λειτουργίας

Παραγωγή: νερό πέφτει από άνω δεξαμενή → στρόβιλος → γεννήτρια
Αποθήκευση: αντλίες ανεβάζουν νερό πίσω στην άνω δεξαμενή.

Αρχή αποθήκευσης:

$$E = \rho ghV$$

Όπου:

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

h = υψομετρική διαφορά

V = όγκος νερού

Αποδόσεις:

- ▶ στροβίλου: 90-93%
- ▶ αντλίας: 85-90%
- ▶ συνολική round-trip: 75-80%

Αντλησιοταμίευση: Πραγματικό Παράδειγμα

Ένα PHS 600 MW / 5 GWh απαιτεί:

- ▶ $h \approx 500\text{-}700\text{ m}$
- ▶ δεξαμενές: 5-10 εκατ. m^3
- ▶ χρόνος εκφόρτισης: 6-10 ώρες

Παράδειγμα Ευρώπης:

- ▶ Cruachan, Scotland — 440 MW
- ▶ Bath County, USA — 3 GW (το μεγαλύτερο στον κόσμο)

Χρήσεις:

- ▶ κάλυψη αιχμών
- ▶ σταθεροποίηση δικτύου
- ▶ αποθήκευση από αιολικά

Flywheel Energy Storage (FES)

Αποθήκευση ενέργειας σε περιστρεφόμενο δίσκο υψηλής ταχύτητας:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

I = ροπή αδράνειας
 ω = γωνιακή ταχύτητα

Υλικά:

- ▶ ατσάλι
- ▶ ανθρακονήματα (carbon composites)
- ▶ υπερ-μαγνητικά ρουλεμάν

Πλεονεκτήματα:

- ▶ εξαιρετικά υψηλή ισχύς (MW scale)
- ▶ πολύ γρήγορη απόκριση (<50 ms)
- ▶ τεράστιος αριθμός κύκλων (>100,000)

Μειονεκτήματα:

- ▶ μικρή ενεργειακή χωρητικότητα (kWh)
- ▶ υψηλό κόστος

Flywheels: Μηχανολογική Ανάλυση

Η ροπή αδράνειας ενός δίσκου:

$$I = \frac{1}{2}mr^2$$

Άρα:

- ▶ Μεγαλύτερη ακτίνα → εκθετική αύξηση ενέργειας
- ▶ Υψηλότερη ταχύτητα → τεράστια αύξηση αποθήκευσης
- ▶ Περιορισμός: η μέγιστη εφελκυστική τάση του υλικού

Η μέγιστη ταχύτητα:

$$\omega_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\rho}}$$

σ = αντοχή υλικού

ρ = πυκνότητα

Carbon fiber → $\omega_{max} > 60.000$ rpm.

CAES (Compressed Air Energy Storage)

Αποθήκευση ενέργειας με συμπίεση αέρα σε κοιλότητες/δεξαμενές.

Διάγραμμα λειτουργίας:

- ▶ φόρτιση: ηλεκτρισμός → συμπιεστής → αποθήκευση
- ▶ εκφόρτιση: αέρας → θέρμανση → τουρμπίνα → ηλεκτρισμός

Ενέργεια αποθήκευσης:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P \, dV$$

Δεξαμενές: υπόγειες αλατοσπηλιές, ατσάλινα δοχεία.

Αποδόσεις:

- ▶ Παλιά CAES: 40-50%
- ▶ Νέα adiabatic CAES: 65-70%

Adiabatic CAES (A-CAES)

Δεν χρειάζεται καύσιμο (σε αντίθεση με τα παλιά CAES που έκαιγαν φυσικό αέριο).

Αρχή:

- ▶ η συμπίεση θερμαίνει τον αέρα
- ▶ η θερμότητα αποθηκεύεται σε θερμικό ταμιευτή
- ▶ στην εκφόρτιση επαναθερμαίνει τον αέρα πριν την τουρμπίνα

Πλεονεκτήματα:

- ▶ μηδενικές εκπομπές
- ▶ υψηλότερη απόδοση
- ▶ αποθήκευση πολλών ωρών

Υλικά TES:

- ▶ λιθώματα
- ▶ molten salts
- ▶ packed beds

Liquid Air Energy Storage (LAES)

Αποθήκευση με υγροποίηση αέρα στους -196°C .

Φόρτιση:

- ▶ ηλεκτρισμός → υγροποίηση → δεξαμενές

Εκφόρτιση:

- ▶ εξάτμιση → επέκταση σε τουρμπίνα → παραγωγή έργου

Πλεονεκτήματα:

- ▶ πυκνότητα ενέργειας > CAES
- ▶ εύκολη αποθήκευση σε δεξαμενές (όπως LNG)

Μειονεκτήματα:

- ▶ αποδόσεις 50-60%
- ▶ πολύπλοκες θερμικές διεργασίες

Σύγκριση Μηχανικών Τεχνολογιών

Τεχνολογία	Απόδοση	Διάρκεια	Κόστος	Κλίμακα
PHS	75-80%	6-12h	χαμηλό	GW
Flywheel	85-95%	sec-min	υψηλό	kW-MW
CAES	40-70%	4-20h	μεσαίο	100-300 MW
LAES	50-60%	6-12h	υψηλό	5-50 MW

ΑΣΚΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (PHS)

Δίνεται:

- ▶ Υψομετρική διαφορά $h = 450 \text{ m}$
- ▶ Όγκος άνω δεξαμενής $V = 1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$
- ▶ Απόδοση στροβίλου = 90%
- ▶ Απόδοση αντλίας = 85%

Ζητείται:

- α) Πόση ενέργεια αποθηκεύεται;
- β) Πόση ενέργεια ανακτάται τελικά;

Λύση:

Μάζα νερού:

$$m = 1.5 \times 10^9 \text{ kg}$$

Θεωρητική ενέργεια:

$$\begin{aligned} E &= mgh = 1.5 \times 10^9 \cdot 9.81 \cdot 450 \\ E &= 6.62 \times 10^{12} \text{ J} = 1.84 \times 10^6 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Ανακτήσιμη:

$$\begin{aligned} E_{out} &= E \cdot \eta_{turbine} \cdot \eta_{pump} \\ E_{out} &= 1.84 \times 10^6 \cdot 0.90 \cdot 0.85 \\ E_{out} &= 1.41 \times 10^6 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Εισαγωγή στη Χημική Αποθήκευση

Η χημική αποθήκευση αφορά τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε **χημική μορφή** (H_2 , CH_4 , CH_3OH , NH_3), για μεταφορά ή μακροχρόνια αποθήκευση.

Κύριες τεχνολογίες:

- ▶ Υδρογόνο (H_2)
- ▶ Ηλεκτρόλυση νερού
- ▶ Power-to-Gas (PtG)
- ▶ Power-to-Liquid (PtL)
- ▶ Συνθετικά καύσιμα
- ▶ Κυψέλες καυσίμου (fuel cells)

Πλεονεκτήματα:

- ▶ υψηλή ενεργειακή πυκνότητα
- ▶ μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης (μήνες)
- ▶ δυνατότητα μεταφοράς

Τι είναι το Υδρογόνο και γιατί χρησιμοποιείται;

Το υδρογόνο αποτελεί **φορέα ενέργειας**, όχι πρωτογενή πηγή.

Ιδιότητες:

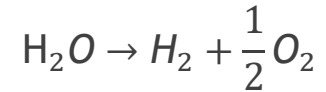
- ▶ Θερμογόνος δύναμη:
 - ▶ 120 MJ/kg (HHV)
 - ▶ ~3× περισσότερο από το diesel
- ▶ Μηδενικές εκπομπές κατά την καύση:
$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Γιατί είναι ιδανικό για αποθήκευση:

- ▶ μεγάλη πυκνότητα ενέργειας ανά μάζα
- ▶ εύκολη μετατροπή σε ηλεκτρισμό/θερμότητα
- ▶ μπορεί να αποθηκευτεί για μήνες
- ▶ αξιοποίηση σε δίκτυα φυσικού αερίου (H₂ blending 10-20%)

Ηλεκτρόλυση Νερού

Η ηλεκτρόλυση «σπάει» το νερό σε H_2 και O_2 :



Τύποι ηλεκτρολυτών:

- ▶ **Alkaline electrolysis (AEL)**
 - ▶ παλιά, φθηνή, αξιόπιστη
 - ▶ πιέσεις: 20-40 bar
- ▶ **PEM electrolysis**
 - ▶ υψηλή απόδοση
 - ▶ γρήγορη απόκριση
 - ▶ συνδυάζεται με ΑΠΕ
- ▶ **SOEC (Solid Oxide Electrolysis)**
 - ▶ υψηλές θερμοκρασίες 700-850° C
 - ▶ πολύ υψηλή απόδοση
 - ▶ Βιομηχανικές εφαρμογές

Απόδοση ηλεκτρόλυσης: **60-80%**.

Απαιτήσεις Ενέργειας για Παραγωγή Υδρογόνου

Η ενέργεια που χρειάζεται η ηλεκτρόλυση:

$$E_{req} = 39 - 55 \text{ kWh/kgH}_2$$

- ▶ Ανάλογα με:
 - ▶ τον τύπο ηλεκτρολύτη
 - ▶ τη θερμοκρασία
 - ▶ την πίεση εξόδου
 - ▶ το ρεύμα λειτουργίας
 - ▶ Παράδειγμα:
 - ▶ 50 kWh ηλεκτρισμού $\rightarrow$ 1 kg H₂
 - ▶ 1 kg H₂ $\rightarrow$ 33 kWh ηλεκτρισμού σε fuel cell
- Round-trip efficiency $\approx$ 30-40%**

Αποθήκευση Υδρογόνου

1. Συμπιεσμένο υδρογόνο (CH_2):

- ▶ 350-700 bar
- ▶ Δεξαμενές composite carbon
- ▶ Ενεργειακή πυκνότητα όγκου: 2-6 kWh/L

2. Υγροποιημένο υδρογόνο (LH_2):

- ▶ -253°C
- ▶ πολύ υψηλή πυκνότητα
- ▶ υψηλό κόστος υγροποίησης (30% απώλειες)

3. Solid-state (metal hydrides):

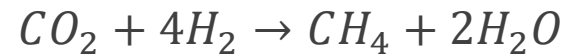
- ▶ αποθήκευση σε μεταλλικά κράματα
- ▶ υψηλή ασφάλεια
- ▶ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα

Power-to-Gas (PtG)

Μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας → υδρογόνο → συνθετικό φυσικό αέριο.

Στάδια:

- ▶ Ηλεκτρόλυση (H_2)
- ▶ Μεθανοποίηση:



Πλεονεκτήματα:

- ▶ δυνατότητα αποθήκευσης στο δίκτυο φυσικού αερίου
- ▶ χρήση απορριπτόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
- ▶ μετατροπή CO_2 σε καύσιμο

Απόδοση PtG: **45-60%**.

Power-to-Liquid (PtL) & Συνθετικά Καύσιμα

Παραγωγή υγρών καυσίμων με βάση H_2 + CO_2 :

- ▶ συνθετική βενζίνη
- ▶ συνθετικό diesel
- ▶ methanol
- ▶ aviation fuel (SAF)

Διεργασίες:

- ▶ Fischer-Tropsch
- ▶ methanol synthesis
- ▶ reverse water-gas shift (RWGS)

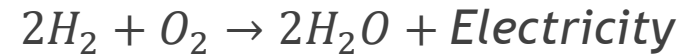
Πλεονεκτήματα:

- ▶ εύκολη μεταφορά/αποθήκευση
- ▶ χρήση στην αεροπλοΐα και βαριά βιομηχανία

Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells)

Μετατρέπουν $H_2 \rightarrow$ ηλεκτρισμό μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

Βασική αντίδραση:



Τύποι:

- ▶ PEMFC (χαμηλής T)
- ▶ SOFC (υψηλής T, 600-1000°C)
- ▶ AFC
- ▶ MCFC

Απόδοση:

- ▶ 45-60% ηλεκτρική
- ▶ 80-90% συνολική (ΣΗΘ - CHP mode)

Υδρογόνο & Θερμοδυναμική – Exergy

Το υδρογόνο έχει πολύ υψηλή εξέργεια καυσίμου.

$$Ex_{fuel} \approx HHV_{H_2} = 120 \text{ MJ/kg}$$

Exergy destruction εμφανίζεται σε:

- ▶ ηλεκτρόλυση
- ▶ συμπίεση
- ▶ υγροποίηση
- ▶ fuel cells
- ▶ μεταφορές

Η συνολική round-trip efficiency (ηλεκτρισμός→H₂→ηλεκτρισμός) είναι:

$$\eta_{RT} \approx 0.7 \cdot 0.6 = 0.42 = 42\%$$

Στην πράξη ~30-40%.

Παράδειγμα Υπολογισμού Υδρογόνου

Δίνεται:

- ▶ Ηλεκτρολύτης 5 MW
- ▶ Απόδοση 70%
- ▶ Χρόνος λειτουργίας: 4 ώρες

Ζητείται:

Παραγόμενη ποσότητα H_2 .

Λύση:

Ενέργεια ηλεκτρόλυσης:

$$E = 5 \cdot 4 = 20 \text{ MWh}$$

Ωφέλιμη ενέργεια:

$$E_{H_2} = 0.7 \cdot 20 = 14 \text{ MWh}$$

1 kg H_2 απαιτεί ~50 kWh

$$m_{H_2} = \frac{14,000}{50} = 280 \text{ kg}$$

Εισαγωγή στην Ηλεκτρική Αποθήκευση

Η ηλεκτρική αποθήκευση αφορά την αποθήκευση ηλεκτρισμού σε μπαταρίες ή ηλεκτροχημικά συστήματα.

Κύριες τεχνολογίες:

- ▶ Μπαταρίες Li-ion
- ▶ Νέες Na-ion
- ▶ Flow batteries (vanadium, Zn-Br, Fe)
- ▶ Υπερπυκνωτές (supercapacitors)
- ▶ BESS (Battery Energy Storage Systems)

Πλεονεκτήματα:

- ▶ υψηλή απόδοση (90-95%)
- ▶ ευελιξία
- ▶ ταχύτητα απόκρισης
- ▶ κατάλληλες για σταθεροποίηση δικτύου

Μειονεκτήματα:

- ▶ περιορισμένη διάρκεια (2-6 ώρες)
- ▶ υποβάθμιση με κύκλους
- ▶ θέματα θερμικής ασφάλειας

Μπαταρίες Λιθίου (Li-ion): Θεωρία Λειτουργίας

Μηχανισμός λειτουργίας:

Κατά τη φόρτιση:

- ▶ Li^+ ιόντα μετακινούνται από την καθόδο στην άνοδο
- ▶ ηλεκτρόνια ακολουθούν εξωτερικό κύκλωμα

Κατά την εκφόρτιση:

- ▶ η διαδικασία αντιστρέφεται

Βασική χημεία:

- ▶ Άνοδος: γραφίτης
- ▶ Κάθοδος: NMC, LFP, NCA
- ▶ Ηλεκτρολύτης: LiPF_6 σε οργανικό διαλύτη
- ▶ Separator: πορώδεις πολυμερές

Τύποι Li-ion Καθοδικών Υλικών

Τύπος	Ονομασία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
LFP	LiFePO_4	ασφάλεια, διάρκεια ζωής	χαμηλότερη τάση
NMC	LiNiMnCoO_2	υψηλή πυκνότητα ενέργειας	κόστος κοβαλτίου
NCA	LiNiCoAlO_2	εξαιρετική απόδοση	θερμικά ασταθής
LMO	LiMn_2O_4	καλή ισχύς	φθορά καθόδου

Η επιλογή εξαρτάται από:

- ενεργειακή πυκνότητα
- κόστος
- ασφάλεια
- κύκλους ζωής

Θερμική Ανάλυση Μπαταριών

Η θερμοκρασία επηρεάζει:

- ▶ Απόδοση
- ▶ Υποβάθμιση (degradation)
- ▶ Ασφάλεια
- ▶ Ρυθμό φόρτισης

Η θερμότητα που αναπτύσσεται στη μπαταρία:

$$Q = I^2 R + IT \frac{\partial E}{\partial T}$$

Όπου:

- ▶ I: ρεύμα
- ▶ R: εσωτερική αντίσταση
- ▶ E: open-circuit voltage
- ▶ T: θερμοκρασία

Απαιτείται thermal management:

- ▶ υγρόψυξη
- ▶ αερόψυξη
- ▶ phase change materials (PCM)

Degradation Μηχανισμοί

Υποβάθμιση λόγω:

1. SEI layer growth

- ▶ πάχυνση προστατευτικού φιλμ
- ▶ αυξάνει αντίσταση

2. Lithium plating

- ▶ εμφανίζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες
- ▶ μειώνει ικανότητα

3. Καθοδο-ανάδομηση (cathode restructuring)

- ▶ loss of active material
- ▶ cracking

4. Loss of electrolyte

Η διάρκεια ζωής εξαρτάται από:

- ▶ θερμοκρασία
- ▶ βάθος εκφόρτισης (DoD)
- ▶ ρυθμό φόρτισης C-rate
- ▶ πλήθος κύκλων

Flow Batteries (Vanadium, Zn-Br κ.λπ.)

Σε αντίθεση με τις Li-ion, οι flow batteries έχουν ηλεκτρολύτες σε δεξαμενές.

Πλεονεκτήματα:

- ▶ πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (10.000-20.000 κύκλοι)
- ▶ απομόνωση ισχύος και χωρητικότητας
- ▶ πλήρης εκφόρτιση χωρίς ζημιά
- ▶ ιδανικές για σταθερή αποθήκευση

Μειονεκτήματα:

- ▶ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
- ▶ ακριβή υλικά (vanadium)

Παράδειγμα εφαρμογών:

- ▶ σταθμοί αιολικών/φωτοβολταϊκών
- ▶ μικροδίκτυα

Na-ion Μπαταρίες

Νέα τεχνολογία (2023-2025).
Χρησιμοποιούν Na^+ αντί για Li^+ .

Πλεονεκτήματα:

- ▶ χαμηλό κόστος
- ▶ άφθονες πρώτες ύλες
- ▶ καλή ασφάλεια

Μειονεκτήματα:

- ▶ χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα
- ▶ ακόμα σε πρώιμο στάδιο

Προβλεπόμενη χρήση:

- ▶ σταθμοί αποθήκευσης
- ▶ οικιακές μπαταρίες
- ▶ οικονομικές λύσεις για μεγάλης διάρκειας αποθήκευση

Supercapacitors (Υπερπυκνωτές)

Αποθήκευση ενέργειας ηλεκτροστατικά:

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

Πλεονεκτήματα:

- ▶ πολύ υψηλή ισχύς
- ▶ εκατομμύρια κύκλοι
- ▶ γρήγορη φόρτιση/εκφόρτιση

Μειονεκτήματα:

- ▶ πολύ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
- ▶ όχι για μεγάλης διάρκειας αποθήκευση

Εφαρμογές:

- ▶ regenerative braking
- ▶ σταθεροποίηση τάσης
- ▶ υποστήριξη BESS

BESS (Battery Energy Storage Systems)

Ολοκληρωμένα συστήματα μεγάλης κλίμακας:

Αποτελούνται από:

- ▶ μπαταρίες (Li-ion / Na-ion / Flow)
- ▶ inverter
- ▶ thermal management
- ▶ BMS (Battery Management System)

Χρήσεις δικτύου:

- ▶ frequency regulation
- ▶ peak shaving
- ▶ arbitrage
- ▶ black-start δυνατότητα

Συνηθισμένες κλίμακες:

- ▶ 5-50 MW (utility scale)
- ▶ 100 kW-5 MW (εμπορικό)
- ▶ 5-20 kW (οικιακό)

Σύγκριση Ηλεκτρικών Τεχνολογιών Αποθήκευσης

Τεχνολογία	Απόδοση	Πυκνότητα	Κύκλοι	Κόστος
Li-ion	90-95%	πολύ υψηλή	3000-6000	μεσαίο
Na-ion	85-90%	μεσαία	2000-4000	χαμηλό
Flow batteries	70-85%	χαμηλή	10k-20k	υψηλό
Supercapacitors	95-99%	πολύ χαμηλή	1M+	υψηλό

Άσκηση: Σχεδιασμός Υβριδικού Συστήματος Αποθήκευσης (Θερμικό TES + BESS + Υδρογόνο)

Περιγραφή σε μία πρόταση:

Εξετάζεται ένα κτίριο/μικρό δίκτυο με ζήτηση θερμότητας και ηλεκτρισμού, με στόχο να διαστασιολογηθούν:

- ▶ ένας θερμικός ταμιευτής ζεστού νερού,
- ▶ ένα σύστημα μπαταριών (BESS),
- ▶ μία μικρή μονάδα υδρογόνου για μακροχρόνια αποθήκευση.

Δεδομένα Άσκησης (Σενάριο)

Κτίριο / Μικρό δίκτυο:

► Ζήτηση θερμότητας (για θέρμανση/ZNX):

- Ημερήσια ζήτηση: $Q_{th,day} = 400 \text{ kWh}_{th}$
- Θέλουμε ο θερμικός ταμιευτής (TES) να καλύπτει **8 ώρες** χωρίς λέβητα/A/Θ.

► Σύστημα θέρμανσης:

- Αντλία θερμότητας (A/Θ) με $COP = 3,0$
- Θερμοκρασίες ταμιευτή:
 - ελάχιστη $T_{min} = 40^{\circ}C$
 - μέγιστη $T_{max} = 70^{\circ}C$

► Ηλεκτρική πλευρά:

- Ημερήσια ζήτηση ηλεκτρισμού: $E_{load,day} = 300 \text{ kWh}$
- Φωτοβολταϊκό σύστημα δίνει επιπλέον μεσημεριανή περίσσεια:
 $E_{PV,excess} = 120 \text{ kWh/day}$

► Αποθήκευση ηλεκτρισμού:

- Θέλουμε οι μπαταρίες (BESS) να μεταφέρουν **80 kWh** από μεσημέρι → Βράδυ.
- Round-trip efficiency μπαταριών: $\eta_{BESS} = 0,9$ (%90)

► Υδρογόνο:

- Η περίσσεια ηλεκτρισμού που περισσεύει και δεν πάει σε BESS θα πηγαίνει σε ηλεκτρολύτη.
- Απόδοση ηλεκτρόλυσης: $\eta_{el} = 0,7$ (%70)
- $1\text{kg H}_2 \approx 33 \text{ kWh}$ (κάτω θερμογόνος, ηλεκτρική ισοδυναμία)

Ζητούμενα

- ▶ Διαστασιολόγηση θερμικού ταμιευτή (όγκος σε m^3).
- ▶ Exergy του αποθηκευμένου θερμικού φορτίου.
- ▶ Απαιτούμενη χωρητικότητα μπαταριών (kWh).
- ▶ Πόσα kg υδρογόνου παράγονται ημερησίως από το υπόλοιπο surplus.

Βήμα 1: Θερμικός Ταμιευτής - Πόση ενέργεια πρέπει να αποθηκεύει;

Θέλουμε ο θερμικός ταμιευτής να καλύπτει **8 ώρες** από τη ζήτηση θερμότητας.

Η ημερήσια ζήτηση είναι:

$$Q_{th,day} = 400 \text{ kWh}_{th}$$

Άρα η ωριαία μέση ζήτηση:

$$\dot{Q}_{th,avg} = \frac{Q_{th,day}}{24} = \frac{400}{24} \approx 16,7 \text{ kW}_{th}$$

Για **8 ώρες**:

$$Q_{TES,req} = \dot{Q}_{th,avg} \cdot 8 = 16,7 \cdot 8 \approx 133,6 \text{ kWh}_{th}$$

→ Αυτό είναι το **θερμικό φορτίο** που πρέπει να μπορεί να αποδώσει ο ταμιευτής.

Βήμα 2: Υπολογισμός όγκου δεξαμενής TES

Χρησιμοποιούμε αισθητή αποθήκευση σε νερό:

$$Q = mc_p\Delta T$$

Όροι:

- Q : αποθηκευμένη θερμότητα (kWh ή kJ)
- m : μάζα νερού (kg)
- c_p : ειδική θερμοχωρητικότητα νερού $\approx 4.18 \text{ kJ/kgK}$
- $\Delta T = T_{\max} - T_{\min} = 70 - 40 = 30\text{K}$

1 kWh = 3600 kJ.

Άρα:

$$Q_{TES,req} = 133,6 \text{ kWh} = 133,6 \cdot 3600 \approx 481,000 \text{ kJ}$$

Λύνουμε ως προς m :

$$m = \frac{Q}{c_p\Delta T} = \frac{481,000}{4.18 \cdot 30}$$
$$m \approx \frac{481,000}{125,4} \approx 3,835 \text{ kg}$$

Επειδή 1 m^3 νερού $\approx 1000 \text{ kg}$:

$$V_{TES} \approx 3,8 \text{ m}^3$$

Άρα ο ταμιευτής πρέπει να είναι περίπου 4 m^3 .

Βήμα 3: Exergy του αποθηκευμένου θερμικού φορτίου

Η exergy της θερμότητας δίνεται από:

$$Ex = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_{mean}} \right)$$

Όροι:

- ▶ Ex : εξέργεια (kWh_{ex})
- ▶ Q : θερμότητα (kWh_{th})
- ▶ T_0 : θερμοκρασία περιβάλλοντος σε Kelvin (π.χ. 20°C → 293 K)
- ▶ T_{mean} : μέση θερμοκρασία του ταμιευτή σε Kelvin

Εδώ:

- ▶ $Q = 133,6 \text{ kWh}$
- ▶ $T_{mean} \approx \frac{T_{max} + T_{min}}{2} = \frac{70+40}{2} = 55^\circ\text{C} = 328\text{K}$
- ▶ $T_0 = 293\text{K}$

Υπολογίζουμε τον συντελεστή ποιότητας:

- ▶ $\phi = 1 - \frac{T_0}{T_{mean}} = 1 - \frac{293}{328} \approx 1 - 0,893 = 0,107$

Άρα:

$$Ex_{TES} = 133,6 \cdot 0,107 \approx 14,3 \text{ kWh}_{ex}$$

Σχόλιο:

Βλέπουμε ότι από τις 133,6 kWh θερμότητας, μόνο ~14,3 kWh είναι διαθέσιμες ως “έργο” (exergy). Αυτό είναι το θεμελιώδες νόημα της ανάλυσης 2ου νόμου.

Βήμα 4: Διαστασιολόγηση Μπαταριών (BESS)

Θέλουμε οι μπαταρίες να μεταφέρουν:

$$E_{shift} = 80 \text{ kWh}$$

από μεσημέρι → βράδυ.
Η απόδοση του κύκλου:

$$\eta_{BESS} = 0,9$$

Προσοχή:

Η απόδοση round-trip σημαίνει:

$$E_{out} = \eta_{BESS} \cdot E_{in}$$

Εδώ ζητάμε να έχουμε **80 kWh εξόδου** (βράδυ). Άρα:

$$E_{in} = \frac{E_{out}}{\eta_{BESS}} = \frac{80}{0,9} \approx 88,9 \text{ kWh}$$

→ Τόση ενέργεια πρέπει να φορτίζουμε στις μπαταρίες μεσημέρι.

Ονομαστική χωρητικότητα μπαταριών

Αν θεωρήσουμε ότι μπορούμε να εκφορτίζουμε μέχρι 90% (DoD = 0.9):

$$E_{BESS,nom} = \frac{E_{in}}{DoD} = \frac{88,9}{0,9} \approx 98,8 \text{ kWh}$$

Άρα μια μπαταρία ~100 kWh είναι επαρκής για αυτόν τον ρόλο.

Βήμα 5: Υπόλοιπη περίσσεια ηλεκτρισμού για Υδρογόνο

Το ημερήσιο surplus από τα PV είναι:

$$E_{PV,excess} = 120 \text{ kWh/day}$$

Από αυτά, ~88,9 kWh θα πηγαίνουν στο BESS (φόρτιση).

Άρα μένει:

$$E_{H2,input} = 120 - 88,9 = 31,1 \text{ kWh/day}$$

Αυτή η ενέργεια οδηγείται στον ηλεκτρολύτη.

Απόδοση ηλεκτρόλυσης:

$$\eta_{el} = 0,7$$

Άρα η χημική ενέργεια στο υδρογόνο:

$$E_{H_2} = \eta_{el} \cdot E_{H2,input} = 0,7 \cdot 31,1 \approx 21,8 \text{ kWh/day}$$

Βήμα 6: Πόσα kg Υδρογόνου παράγονται;

Χρησιμοποιούμε περίπου:

$$1 \text{ kg } H_2 \approx 33 \text{ kWh}$$

Άρα:

$$m_{H_2} = \frac{E_{H_2}}{33} = \frac{21,8}{33} \approx 0,66 \text{ kg/day}$$

Συμπέρασμα:

Το σύστημα παράγει περίπου **0,65-0,7 kg H₂** την ημέρα από την περίσσεια ηλεκτρισμού που δεν πάει στις μπαταρίες.

Αν αποθηκεύεται για 30 ημέρες:

$$m_{H_2,30d} \approx 0,66 \cdot 30 \approx 19,8 \text{ kg}$$

που αντιστοιχεί σε:

$$E_{H_2,30d} = 19,8 \cdot 33 \approx 653 \text{ kWh}$$

(ηλεκτρικά ισοδύναμο, αν γυρίσει πίσω με fuel cell).

Συνοπτικά Αποτελέσματα Άσκησης

► Θερμικός Ταμιευτής (TES):

- Χρειαζόμαστε αποθηκευμένη θερμική ενέργεια:
 $Q_{TES, req} \approx 133,6 \text{ kWh}$

- Όγκος δεξαμενής (νερό, 40-70°C):
 $V_{TES} \approx 3,8 \text{ m}^3 \Rightarrow \text{επιλέγουμε } 4 \text{ m}^3.$

► Exergy της θερμότητας:

- $Ex_{TES} \approx 14,3 \text{ kWh}_{ex}$
- Δείχνει ότι η “ποιότητα” της θερμότητας είναι πολύ μικρότερη από την ποσότητα.

► Μπαταρίες (BESS):

- Απαιτούμενη έξοδος: 80 kWh
- Λόγω απόδοσης + DoD: ονομαστική χωρητικότητα $\approx 100 \text{ kWh}.$

► Υδρογόνο:

- Υπόλοιπο surplus σε ηλεκτρολύτη: 31,1 kWh/day
- Χημική ενέργεια H₂: 21,8 kWh/day
- Παραγόμενη μάζα H₂: ~0,66 kg/day.

Διδακτικά Συμπεράσματα & Σχόλια

- ▶ Η **θερμική αποθήκευση (TES)** με νερό είναι εξαιρετικά αποτελεσματική και φθηνή για βραχυχρόνια αποθήκευση θερμότητας σε κτίρια και δίκτυα.
- ▶ Η **exergy** της θερμότητας είναι πολύ μικρότερη από την ενέργεια, κάτι που είναι κρίσιμο για μηχανολόγους που σχεδιάζουν θερμικά συστήματα.
- ▶ Οι **μπαταρίες** είναι ιδανικές για ημερήσια μετατόπιση φορτίου (μεσημέρι → βράδυ), με υψηλή απόδοση αλλά περιορισμένη διάρκεια αποθήκευσης.
- ▶ Το **υδρογόνο** είναι κατάλληλο για **μακροχρόνια αποθήκευση** (εβδομάδες-μήνες), αλλά με πολύ χαμηλότερη συνολική απόδοση.
- ▶ Ο συνδυασμός **TES + BESS + H₂** προσφέρει ένα πλήρες “οπλοστάσιο” για μηχανολόγους στην ενεργειακή μετάβαση.

Βιβλιογραφία

- ▶ Dincer, I. & Rosen, M. A., *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, Wiley, 2021.
- ▶ Cabeza, L. F. (Ed.), *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, Woodhead, 2021.
- ▶ Duffie, J. & Beckman, W., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, 2020.
- ▶ Lund, H. et al., *4th & 5th Generation District Heating Systems*, Energy, 2020.
- ▶ Rezaie, B. & Rosen, M. A., *District Heating and Cooling*, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012.
- ▶ IRENA, *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets*, 2020.
- ▶ IEC & EPRI, *Electric Energy Storage Technology Review*, 2021.
- ▶ Dunn, B., Kamath, H., Tarascon, J.-M., *Electrical Energy Storage for the Grid*, Science, 2011.
- ▶ Zakeri, B., Syri, S., *Electrical Energy Storage Systems: A Review*, Energy Procedia, 2015.
- ▶ Budt, M. et al., *Air-based Energy Storage Systems (CAES & LAES)*, Journal of Energy Storage, 2016.
- ▶ Staffell, I., Scamman, D. et al., *The Role of Hydrogen and Fuel Cells in Future Energy Systems*, Energy & Environmental Science, 2019.
- ▶ IEA, *The Future of Hydrogen*, International Energy Agency, 2019.
- ▶ Kreuer, K., *Fuel Cells: Selected Entries from the Encyclopedia*, Springer, 2013.
- ▶ Yang, Z. et al., *Electrochemical Energy Storage*, Chemical Reviews, 2011.
- ▶ Abdin, Z., Mérida, W., *Electrolyzer Technologies for Green Hydrogen Production*, International Journal of Hydrogen Energy, 2021.