



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS

Εισαγωγή στην Αποθήκευση Ενέργειας

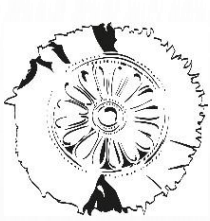
Δρ. Παναγιώτης Γραμμέλης

Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ),
ΕΚΕΤΑ, Πτολεμαΐδα,
grammelis@certh.gr



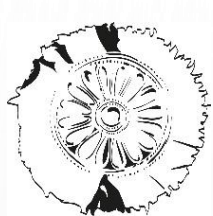
CPERI

Chemical
Process and
Energy
Resources
Institute



Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή
2. Η ανάγκη για Ενεργειακή Αποθήκευση
 - a. Η τρέχουσα κατάσταση της Αποθήκευσης Ενέργειας στην Ελλάδα
3. Διατάξεις Μεθόδων Ενεργειακής Αποθήκευσης
4. Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης
 - a. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)
 - b. Συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες
 - c. Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας
 - d. Υδρογόνο



Εισαγωγή



Τρέχουσα κατάσταση

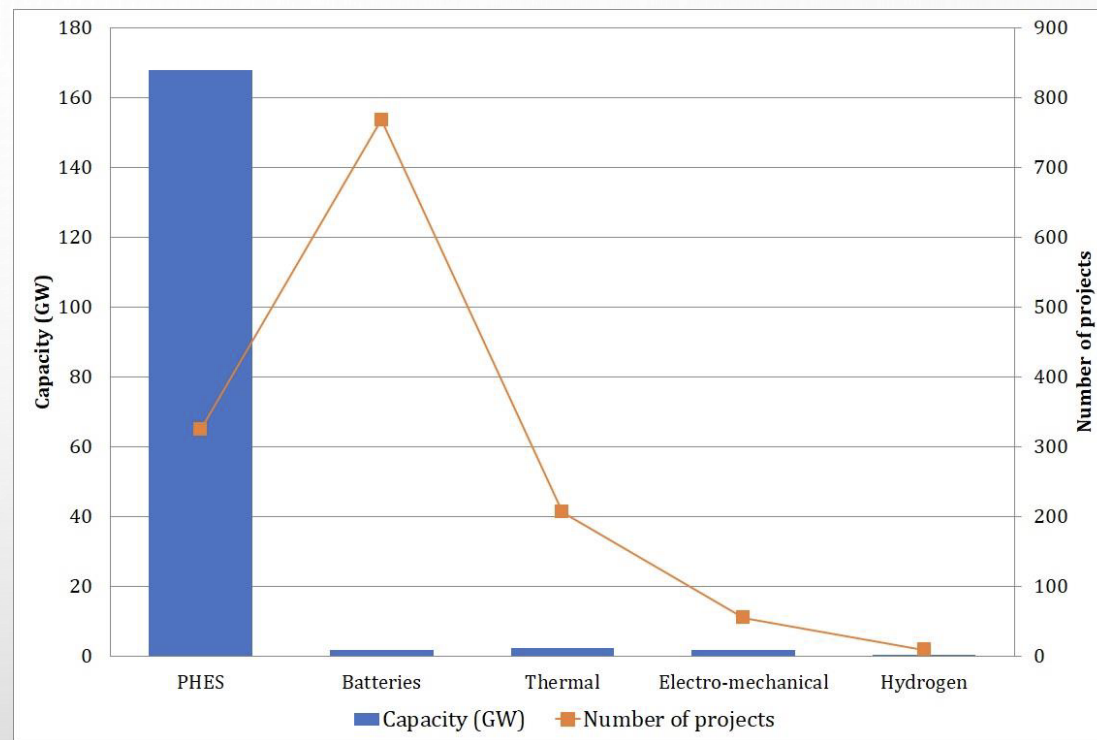
- Κεντρικός Στόχος ΕΕ: **Επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050.**
- Κρίσιμος ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στον επίτευξη του στόχου.
- Αύξηση χρήσης αιολικών και ηλιακών τεχνολογιών.
- Αυξανόμενη **ανάγκη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας** για εξισορρόπηση προσφοράς/ζήτησης.
- Ζωτικός ρόλος των τεχνολογιών αποθήκευσης στην επίτευξη πλήρους απεξάρτησης από τον άνθρακα και υποστήριξη διάφορων τομέων.
- Συμβολή στην Πράσινη Συμφωνία: Συμβολή των τεχνολογιών αποθήκευσης στους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Παγκόσμια αποθήκευση:

- 1363 έργα με συνολική δυναμικότητα **173,7 GW** ¹
- Η αποθήκευση ενέργειας με **αντλησιοταμίευση** κυριαρχεί με ποσοστό 97%, ακολουθούμενη από τη θερμική αποθήκευση και τις ηλεκτροχημικές τεχνολογίες

Ο οδικός χάρτης της χώρας για την ενεργειακή μετάβαση έως το 2030 περιλαμβάνει **υψηλότερη διείσδυση ΑΠΕ και αποθήκευσης ενέργειας**, αλλά και επέκταση των μηχανισμών στήριξης των επενδύσεων. Ειδικότερα, στο αναθεωρημένο ΕΣΕΚ προβλέπεται έως το τέλος της τρέχουσας δεκαετίας διείσδυση ΑΠΕ κατά:

- 44% στην τελική κατανάλωση ενέργειας (από 35% στο ισχύον ΕΣΕΚ του 2019)
- 79% στην ηλεκτροπαραγωγή (από 61%) και περίπου 95 % από το 2035 και μετά.
- 46% στους τομείς θέρμανσης – ψύξης (από 43%)
- 29% στις μεταφορές (από 19%)
- 5,3 GW μονάδων αποθήκευσης ενέργειας εκ των οποίων 3,1 GW μπαταρίες και 2,2 GW²

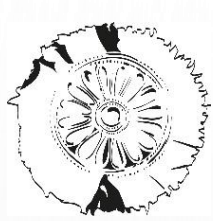


Σχήμα 1: Παγκόσμια χωρητικότητα ανά τεχνολογία.

Πηγή: 1DOE OE Global Energy Storage Database, <https://www.sandia.gov/ess/>, ανακτήθηκε 01/12/2023

¹ 1DOE OE Global Energy Storage Database, <https://www.sandia.gov/ess/>, ανακτήθηκε 01/12/2023

² Greek Ministry of Environment and Energy (December 2019), National Energy and Climate Plan https://energy.ec.europa.eu/index_en, ανακτήθηκε 01/12/2023

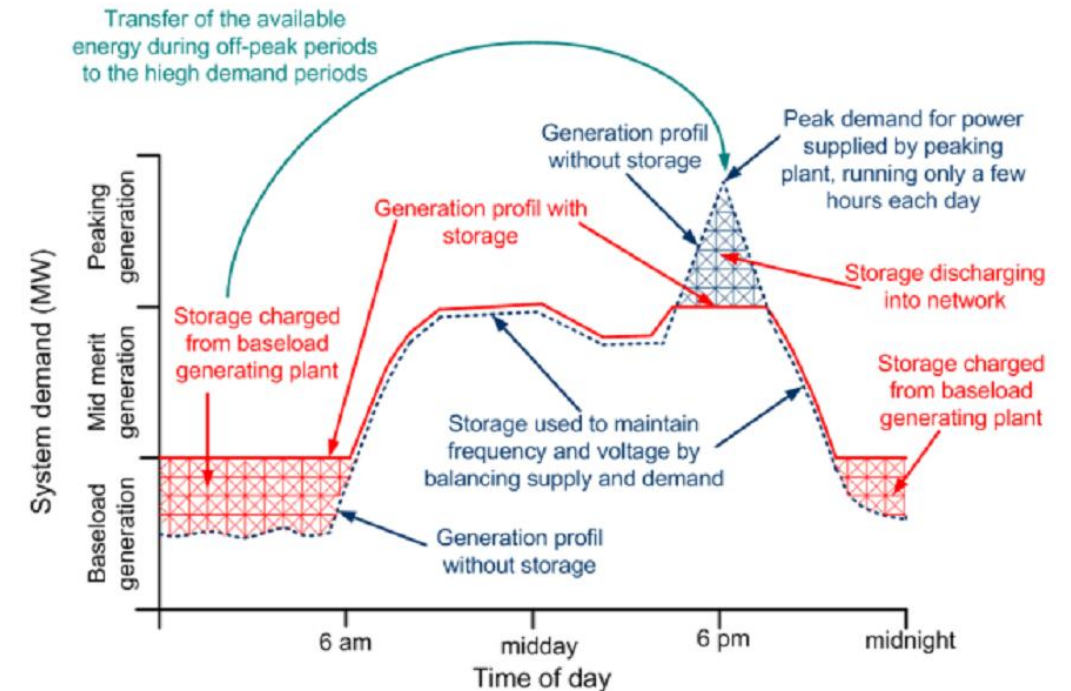


Η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση



- Αποθήκευση Ενέργειας -> Κρίσιμη για **αποτελεσματική** χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.
- Παροχή **σταθερότητας** στο ενεργειακό δίκτυο.
- Στήριξη της **ένταξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας**.
- Παροχή **εφεδρικής ισχύος** κατά τις διακοπές ρεύματος.
- Συνεισφορά στη **μείωση εκπομπών θερμοκηπίου**.
- Συμβολή στην επίτευξη ενός **βιώσιμου ενεργειακού συστήματος**.
- Διευκόλυνση της **ομαλής ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών** στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- **Μείωση Διακυμάνσεων**: Μελέτες NREL και IEA ³ υπογραμμίζουν τον κρίσιμο ρόλο στη μείωση των διακυμάνσεων στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας.
- Συνεισφορά στην αύξηση της **ενεργειακής ασφάλειας**.

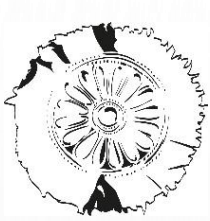
Στα αυτόνομα συστήματα, όπως σε πολλά ελληνικά νησιά, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια είναι οι πιο ελπιδοφόρες μέθοδοι για την ηλεκτροπαραγωγή, αλλά υπόκεινται σε διακυμάνσεις λόγω μη προβλέψιμων μετεωρολογικών δεδομένων. Η ενεργειακή αποθήκευση είναι κρίσιμη για την αντιμετώπιση ελλείψεων και την ενίσχυση της απόδοσης. Στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, η αποθήκευση αξιοποιείται για την αντιμετώπιση αιχμών ισχύος, ενισχύοντας τη συσχέτιση προσφοράς και ζήτησης.



Σχήμα 2: Αρχή ενεργειακής αποθήκευσης.

Πηγή: Ibrahim, Hussein, Mazen Ghandour, and Sabine Saad. "Performance Index: A Simple Selection Method of Appropriate Energy Storage for Specific Application." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 171. EDP Sciences, 2018.

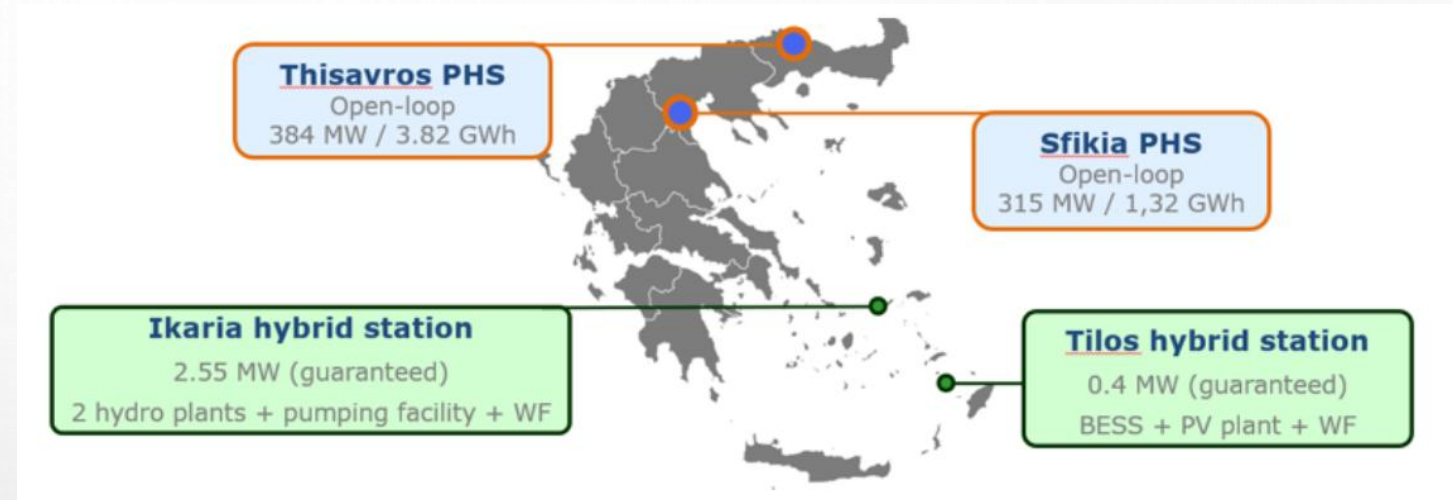
³ International Energy Agency, (2014). Energy storage: A key to a more secure, sustainable and competitive energy system
[<https://www.iea.org/reports/energy-storage-a-key-to-a-more-secure-sustainable-and-competitive-energy-system>, ανακτήθηκε 01/12/2023]



Η τρέχουσα κατάσταση της Αποθήκευσης Ενέργειας στην Ελλάδα



- **Δύο σταθμοί αντλησιοταμίευσης** λειτουργούν στην ηπειρωτική Ελλάδα με συνολική δυναμικότητα 700MW.
- Στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο, υπάρχουν μικρότερα συστήματα στην **Τήλο** και την **Ικαρία**.
- Η **Τήλος** φιλοξενεί το **πρώτο υβριδικό σύστημα ΑΠΕ** στη **Μεσόγειο** από το **2018**, συνδυάζοντας **ανεμογεννήτρια 800KW**, **φωτοβολταϊκό σύστημα 160KW**, και **δύο μπαταρίες NaNiCl με αποθήκευση 2,8MWh**.
- Το **2019**, εγκαταστάθηκε το **υβριδικό σύστημα "Naeras"** της ΔΕΗ Ανανεώσιμες στην **Ικαρία**, με τρεις ανεμογεννήτριες (2,55MW), δύο υδροηλεκτρικά συστήματα (1,05MW και 3,1MW) και αντλητική ικανότητα 3MW.⁴
- Μελέτη ΕΜΠ (Μάιος 2020): Επικεφαλής ο καθηγητής Σ. Παπαθανασίου από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
 - Εκπονήθηκε για ΡΑΕ: Διερεύνησε βέλτιστες αναλογίες αποθηκευτικής ικανότητας για αποθήκευση ενέργειας με PHES και μπαταρίες μέσης-υψηλής χωρητικότητας, κατ' εντολή της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ).
 - Στόχος 60% Διείσδυσης ΑΠΕ έως το 2030:
 - Απαιτούμενη Αποθηκευτική Ικανότητα: 1,5-1,75GW
 - Κατανομή Αποθήκευσης: 1-1,25GW σε PHES και 0,5GW σε μπαταρίες.⁵



Σχήμα 3: 4 σταθμοί αποθήκευσης που λειτουργούν στην Ελλάδα

Πηγή: Electra, Electricity Storage in Greece <https://electra.cigre.org/329-august-2023/global-connections/electricity-storage-in-greece-state-of-play-near-term-outlook.html>

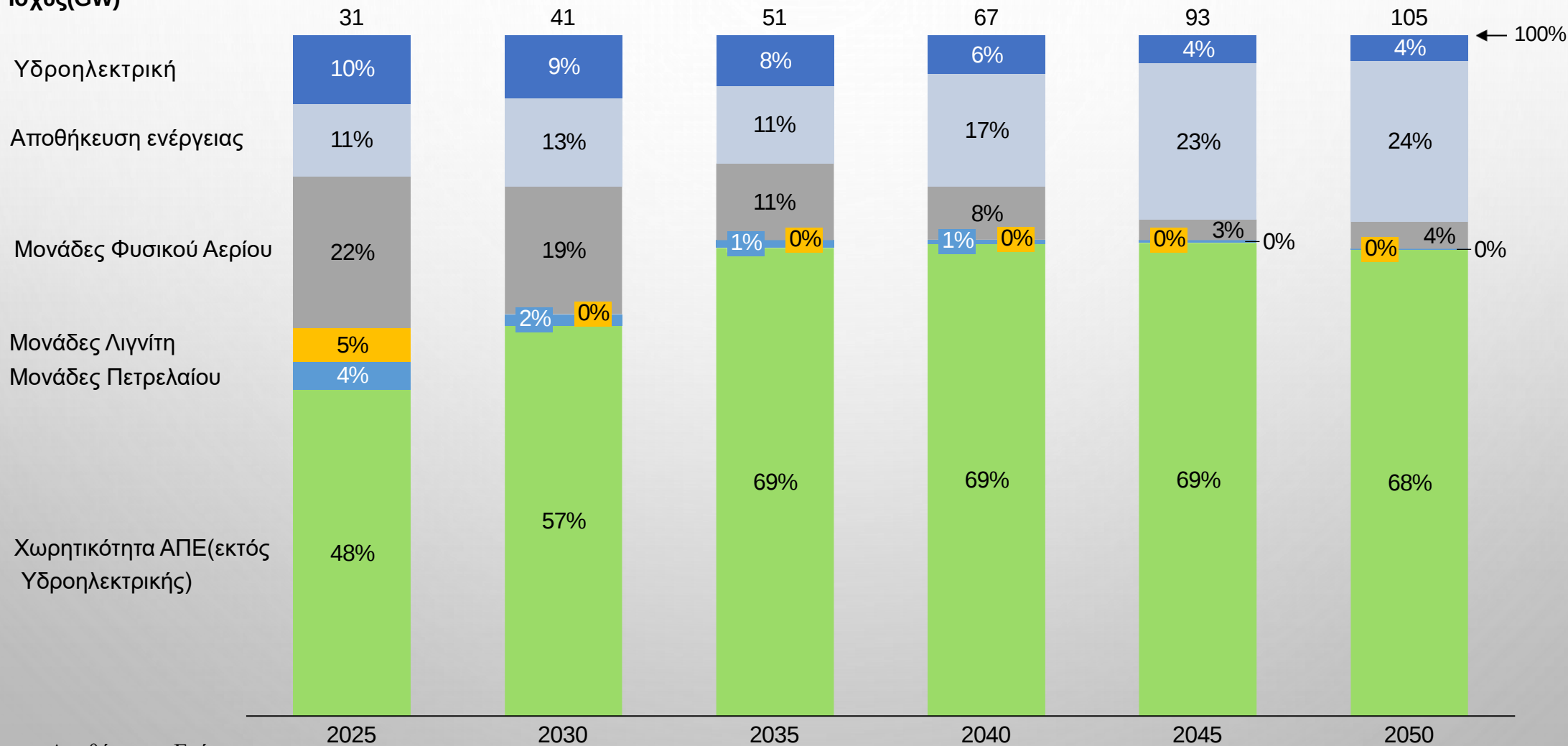
⁴ PPC Renewables (2019) "Naeras: Ikaria's hybrid energy system". <https://www.dei.gr/en/ppc-group/ppc/business-areas/renewable-energy-sources/hybrid-power-generation-systems/>
⁵ Pantele Capros, Modelling, Professor at NTUA (30.9.2020) "PRIMES MODEL SCENARIOS FOR THE EU'S GREEN DEAL" <https://energypress.gr/sites/default/files/media/haee2020capros.pdf>



Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΟΥ ΕΣΕΚ



Εγκατεστημένη
Ισχύς(GW)



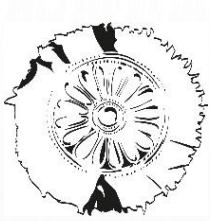
Εισαγωγή στην Αποθήκευση Ενέργειας



Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΟΥ ΕΣΕΚ



Εγκατεστημένη ισχύς (GW)		2025	2030	2035	2040	2045	2050
Χωρητικότητα ΑΠΕ (εκτός Υδροηλεκτρικής)		14,8	23,5	34,7	46,2	64,4	71,7
Υδροηλεκτρική		3,1	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9
Αποθήκευση ενέργειας		3,3	5,3	5,7	11,0	21,3	24,8
Μονάδες Φυσικού Αερίου		6,9	7,7	5,7	5,2	2,8	4,2
Μονάδες Λιγνίτη		1,5	0	0	0	0	0
Μονάδες Πετρελαίου		1,3	0,7	0,6	0,4	0,4	0,1
Συνολική Παραγωγή ενέργειας	TWh	58	66	87,5	114,6	157,7	175,3
Ανθρακικό αποτύπωμα της ηλεκτροπαραγωγής	tCO ₂ / MWh	0,212	0,063	0,013	0,001	0,001	0,000



Διατάξεις Μεθόδων Ενεργειακής Αποθήκευσης

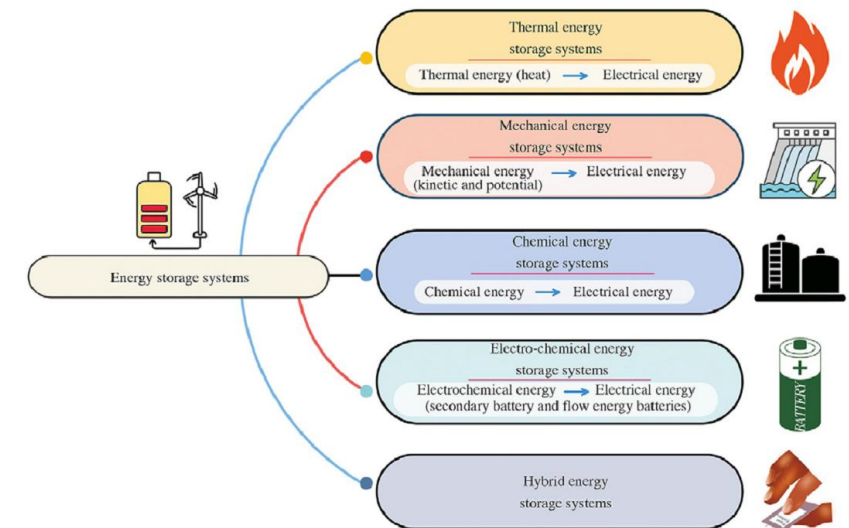


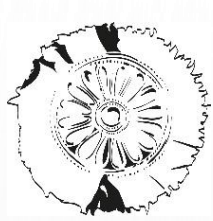
Έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές ενεργειακής αποθήκευσης, με βάση διάφορες μορφές ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στις εξής μορφές:

- **Χημική μορφή** (Μπαταρίες): μέσω χημικών διεργασιών.
- **Μηχανική μορφή** (Κινητική ενέργεια σε σφόνδυλο): ως κινητική ενέργεια σε περιστρεφόμενα αντικείμενα.
- **Ηλεκτροστατικό πεδίο** (Υπερπυκνωτές): μέσω διαφορετικών ηλεκτρικών φορτίων.
- **Μαγνητικό πεδίο** (Υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα): μέσω μαγνητικού πεδίου.
- **Πεπιεσμένος αέρας** (Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα): με συμπίεση αέρα.
- **Υδραυλική μορφή** (Συστήματα αντλησιοταμίευσης): με υδραυλικές διεργασίες.
- **Υδρογόνο** (Κυψέλες καυσίμου): Αποθήκευση ενέργειας υδρογόνου.
- **Θερμότητα**: ως θερμότητα.

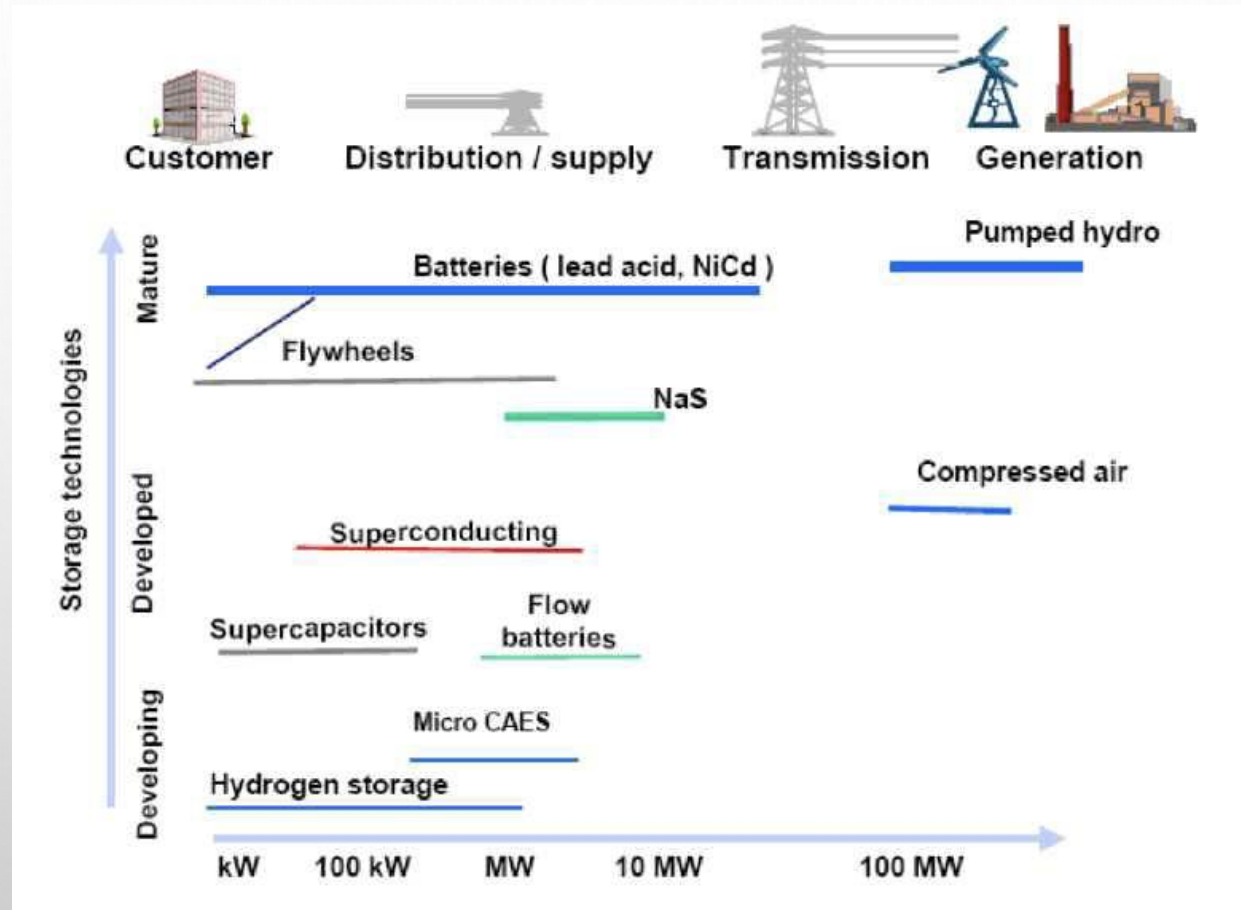
Οι τεχνολογίες αυτές διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο ανάπτυξης, αντικειμενικών κριτηρίων και οικονομικής αποδοτικότητας, καθιστώντας τη συγκριτική ανάλυσή τους προκλητική.

ΠΙΝΑΚΑΣ	
Μορφή μετατροπής	Αντιπροσωπευτική διάταξη
Ηλεκτρική	Πυκνωτές και υπέρ-πυκνωτές
Μαγνητική	Υπεραγώγιμα πηνία - Superconducting Magnetic Energy Storage systems (SMES)
Χρήση μηχανικής ενέργειας (δυναμική ή περιστροφή)	Αντλησιοταμίευση (PHS) Συστήματα με Συμπιεσμένο αέρα (CAES) Στρεφόμενοι Σφόνδυλοι (Flywheels)
Χημικές μέθοδοι	Μπαταρίες, μπαταρίες ροής, προχωρημένου τύπου μπαταρίες (BESS)

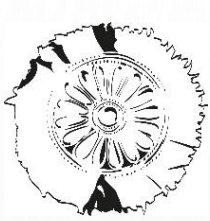




Διατάξεις Μεθόδων Ενεργειακής Αποθήκευσης (1/2)



Σχήμα 5: Η τεχνολογική ωριμότητα, οι εφαρμογές και το μέγεθος των διαφορετικών αποθηκευτικών διατάξεων.

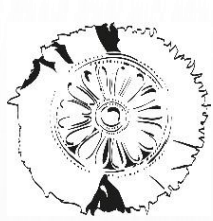


Διατάξεις Μεθόδων Ενεργειακής Αποθήκευσης (2/2)



Καταλληλότητα των διαφόρων αποθηκευτικών διατάξεων, όσον αφορά εφαρμογές ισχύος και ενέργειας αλλά και τις συνηθισμένες τους εφαρμογές

Αποθηκευτική Διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές Ισχύος	Εφαρμογές ενέργειας	Συνήθης Εφαρμογή
Μπαταρίες ροής (flow): PSB, VRBr, ZuBr	Υψηλή χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος-ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	+		Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών
Μολύβδου-οξέος	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση	+		Εξομάλυνση αιχμών
Ni-Cd	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, απόδοση		+		Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Li-ion	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση	Υψηλό κόστος παραγωγής, απαιτεί ειδικό κύκλωμα φόρτισης	+		Κινητή τηλεφωνία, υποσταθμοί ενέργειας
NaS	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση	Κόστος παραγωγής, μέτρα ασφαλείας (λόγω σχεδιασμού)	+		Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Σφόνδυλοι (flywheels)	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής	+		Εξομάλυνση ισχύος για λίγα λεπτά
SMES (Υπεραγώγιμη Μαγνητική Αποθήκευση)	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής	+		Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
E.C. Capacitors	Μεγάλος κύκλος ζωής, υψηλή απόδοση	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	+		Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
Αντλησιοταμίευση (pumped storage)	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία			Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα
Ενεργειακή Αποθήκευση Συμπιεσμένου Αέρα CAES	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία για τις χρησιμοποιούμενες κοιλότητες			Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα



Αποθηκευτικές Διατάξεις και Χρονική Περίοδος Αποθήκευσης



Βραχυπρόθεσμη Αποθήκευση:

- Απορροφά ή προσφέρει ενέργεια για εξαιρετικά **μικρό χρονικό διάστημα** (μερικά λεπτά ή δευτερόλεπτα).
- Εφαρμογές περιλαμβάνουν τη **συνεχή παροχή ευστάθειας λειτουργίας** και ισχύος για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.).

Μεσοπρόθεσμη Αποθήκευση:

- Χρησιμοποιείται για χρονικές περιόδους **από λίγα λεπτά έως μερικές ώρες**.
- Εφαρμογές περιλαμβάνουν τη **διαχείριση ισχύος** στους καταναλωτές, την **αύξηση της παροχής εφεδρείας** και τη διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

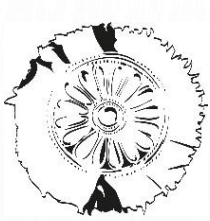
Μακροπρόθεσμη Αποθήκευση:

- Χρησιμοποιείται για χρονικές περιόδους από **αρκετές ώρες έως μήνες και εβδομάδες**.
- Κυρίως αξιοποιείται για την ικανοποίηση της **ζήτησης αιχμής** ή την ομαλοποίηση της ζήτησης **μεταξύ ωρών μη αιχμής και αιχμής**.⁶

⁶ Energy Storage Council, [www.energystoragecouncil.org, ανακτήθηκε 22/11/2023]

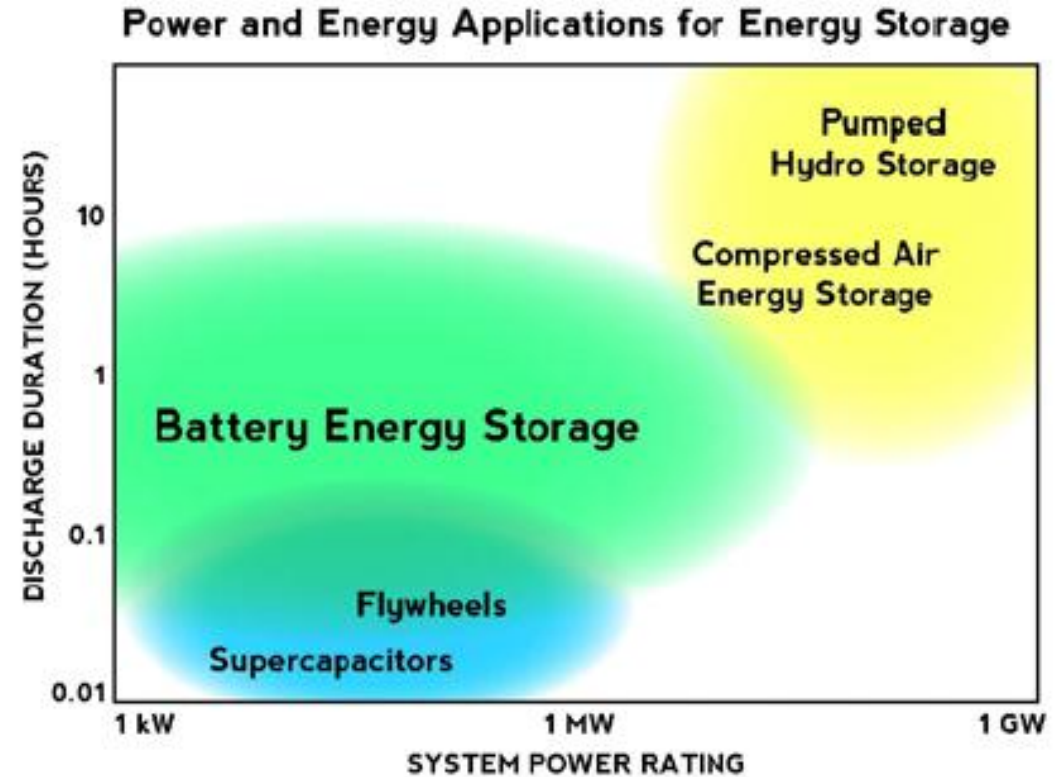
Ομάδα Εφαρμογών	Εφαρμογές	Διάρκεια κύκλου Φόρτισης/Εκφόρτισης
Διαχείριση μονάδων ΑΠΕ	• Εξασφάλιση ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ • Συμβόλαια ανάλογα με την ώρα παράδοσης της παραγωγής από ΑΠΕ.	4-10 ώρες
Χειρισμοί συστήματος μεταφοράς ή διανομής	• Υποστήριξη συστημάτων μεταφοράς	2-5 δευτ.
	• Μείωση των απαιτήσεων για εγκατεστημένη ισχύ συστήματος μεταφοράς • Υποκατάσταση κεντρικών μονάδων παραγωγής	4-6 ώρες
	• Μείωση της συμφόρησης δικτύων • Αναβολή επενδύσεων σε συστήματα μεταφοράς και διανομής • Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών	2-6 ώρες
	• Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών	1-5 ώρες
	• Χρήση για εξομάλυνση των τιμών αγοράς	1-10 ώρες
Σχέσεις εταιριών ηλεκτρισμού και πελατών	• Παροχή υπηρεσιών ποιότητας ισχύος (PQ)	10-60 δευτ.
	• Παροχή υπηρεσιών για εφαρμογές αξιοπιστίας (PR)	15 λεπ. – 5 ώρες
	• Διαχείριση μεταβολής ζήτησης	4-12 ώρες
	• Διαχείριση για τη χρήση τιμολογίων χρέωση ανάλογα με την ώρα κατανάλωσης	2 ώρες

Αξιοποίηση του κύκλου λειτουργίας των αποθηκευτικών μονάδων ως βάσεις για τις τυπικές εφαρμογές τους.

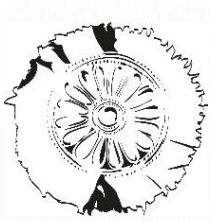


Κριτήρια επιλογής μεθόδων Αποθήκευσης Ενέργειας

- **Κυρίαρχη Τεχνολογία:** Η **αντλησιοταμιευτική υδροηλεκτρική ενέργεια** αποτελεί το μεγαλύτερο κομμάτι της εγκατεστημένης δυναμικότητας αποθήκευσης ενέργειας.
- **Εξέλιξη σε Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου:** Οι πρόσφατες εγκαταστάσεις επικεντρώνονται κυρίως σε μπαταρίες, κυρίως ιόντων λιθίου.
- **Ευρύ Φάσμα Εφαρμογών:** Οι μπαταρίες έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.
- **Εφαρμογές Ισχύος:** Συστήματα αποθήκευσης στο κάτω μέρος του σχήματος χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές ισχύος με **ταχεία απόκριση και μικρή διάρκεια εκφόρτισης**.
- **Εφαρμογές Ενέργειας:** Συστήματα στο ανώτερο τμήμα προτιμώνται για εφαρμογές ενέργειας, με δυνατότητα **μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας** σε διάφορα χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 6: Σύνοψη παραδοσιακών εφαρμογών που σχετίζονται με το δίκτυο (χωρίς τις επιλογές των καταναλωτών) και τα συστήματα αποθήκευσης που μπορούν να εξυπηρετήσουν αυτές τις εφαρμογές



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

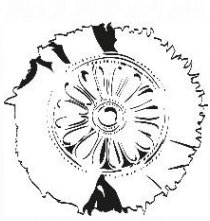


Εξέλιξη της αντλησιοταμίευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας (PHES):

- Ιστορική αναδρομή:
 - Εμφανίστηκε στην Ιταλία και την Ελβετία τη δεκαετία του 1890.
- Αναστρέψιμες υδροστροβίλοι:
 - Αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1930, καθοριστική για την εξέλιξη της τεχνολογίας PHES.
- Παγκόσμια παρουσία:
 - 325 συστήματα PHES παγκοσμίως, συνολικής ισχύος 167,8 GW.
- Παγκόσμια κυριαρχία:
 - Η PHES αποτελεί το 97% της παγκόσμιας συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας.
- Τρεις κορυφαίες χώρες:
 - Η Κίνα, η Ιαπωνία και οι ΗΠΑ κατέχουν το 48,5% της παγκόσμιας δυναμικότητας PHES.
- Μεγάλοι συνεισφέροντες στην ΕΕ-27:
 - Η Ισπανία προηγείται με 8GW, ακολουθούμενη από την Ιταλία (7,1GW) και τη Γερμανία (6,5GW).
- Το μεγαλύτερο σύστημα PHES στον κόσμο:
 - Bath County, ΗΠΑ, με δυναμικότητα που υπερβαίνει τα 3GW.
- Επερχόμενο σύστημα μεγάλης κλίμακας:
 - Ο Καναδάς σχεδιάζει ένα σύστημα PHES 4GW.
- Ηγέτης στην ΕΕ-27:
 - Η Ισπανία φιλοξενεί το μεγαλύτερο σύστημα PHES στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με δυναμικότητα 2GW.



The Cortes La Muela Pumped Storage Hydropower Plant



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

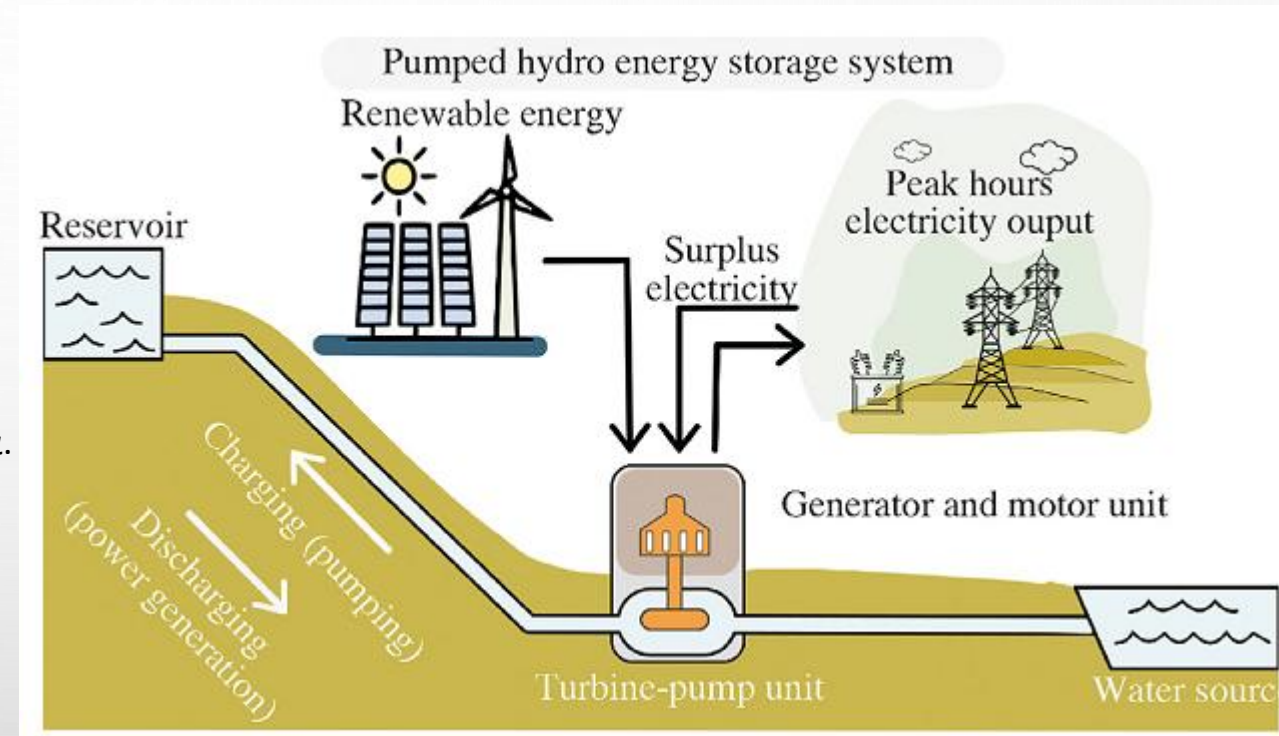


Η αρχή λειτουργίας του PHES

Λειτουργία αντλησιοταμίευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας (PHES):

- **Φάση φόρτισης:**
 - Η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε **δυνητική ενέργεια**.
 - Το νερό αντλείται στον **άνωτερο ταμιευτήρα**.
- **Φάση εκφόρτισης:**
 - Η δυνητική ενέργεια μετατρέπεται **ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια**.
 - Το νερό απελευθερώνεται σε **μονάδες στροβίλου**.
- Στοιχεία του συστήματος:
 - **Δύο ταμιευτήρες** (άνω και κάτω) με σημαντική υψομετρική διαφορά.
 - **Κύκλωμα σωλήνων** για την κυκλοφορία του νερού.
- Πολύμορφες διαμορφώσεις:
 - Ενιαίος αγωγός με αναστρέψιμο υδροστρόβιλο.
 - Βοηθητικό αντλιοστάσιο με δεύτερο αγωγό.
- Καινοτόμος χρήση της θάλασσας:
 - Η θάλασσα χρησιμοποιείται ως κατώτερη δεξαμενή σε ορισμένα συστήματα.
 - Αξιοσημείωτο παράδειγμα: Rance Tidal PHES στη Γαλλία.⁷

⁷ La Rance Barrage, <http://web.archive.org/web/20150204062904/http://www.wyretidalenergy.com/tidal-barrage/la-rance-barrage>



Σχήμα 7: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με αντλησιοταμίευση υδροηλεκτρικής ενέργειας

Πηγή: Mitali, J., S. Dhinakaran, and A. A. Mohamad. "Energy storage systems: A review." *Energy Storage and Saving* 1.3 (2022): 166-216.



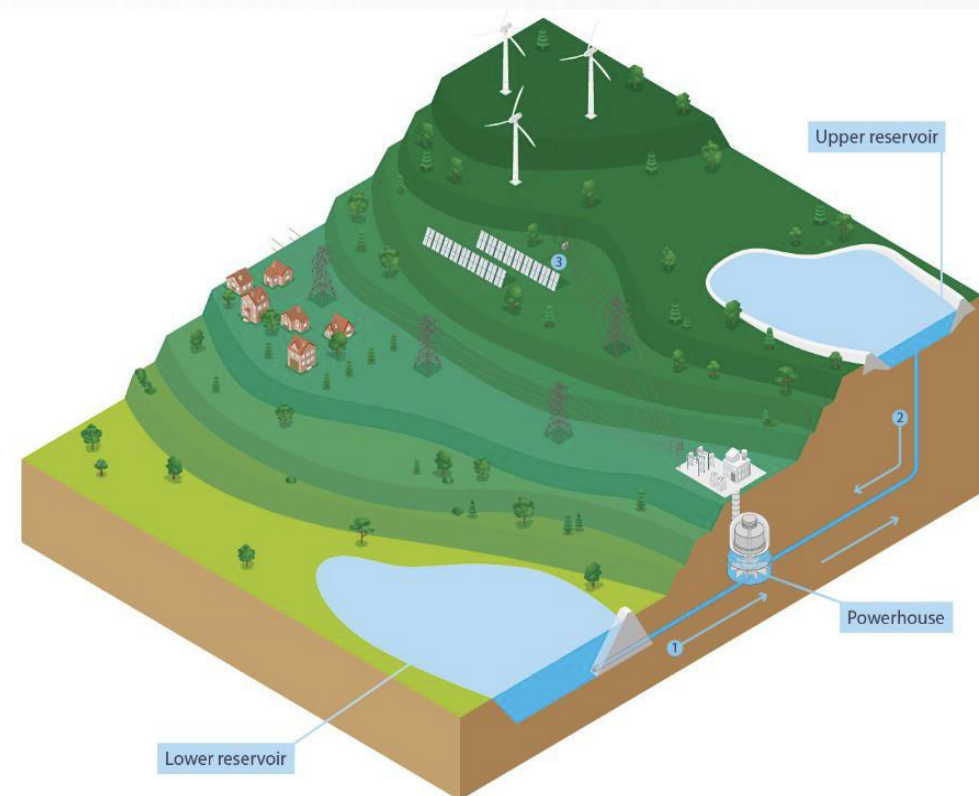
Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Pumped Hydro Energy Storage (PHES)



Μειονεκτήματα και Πλεονεκτήματα PHES

Πλεονεκτήματα του PHES:

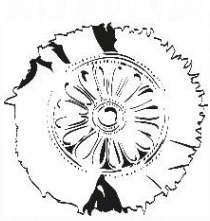
- **Γρήγορη ανταπόκριση:**
 - Άμεση προσαρμογή στις μεταβολές του φορτίου.
 - Ο σταθμός Dinorwig διαχειρίζεται φορτίο ~1.7GW σε <16 δευτερόλεπτα.
- **Ευελιξία** έναντι συμβατικών σταθμών:
 - Σε αντίθεση με τους βραδύτερους χρόνους απόκρισης των πυρηνικών και λιγνιτικών σταθμών.



Σχήμα 8: Σχήμα: Ένα υδροηλεκτρικό έργο αντλιοσταμείωσης κλειστού βρόχου ή εκτός ποταμού

Πηγή: International Hydropower Association

<https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage>



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Pumped Hydro Energy Storage (PHES)



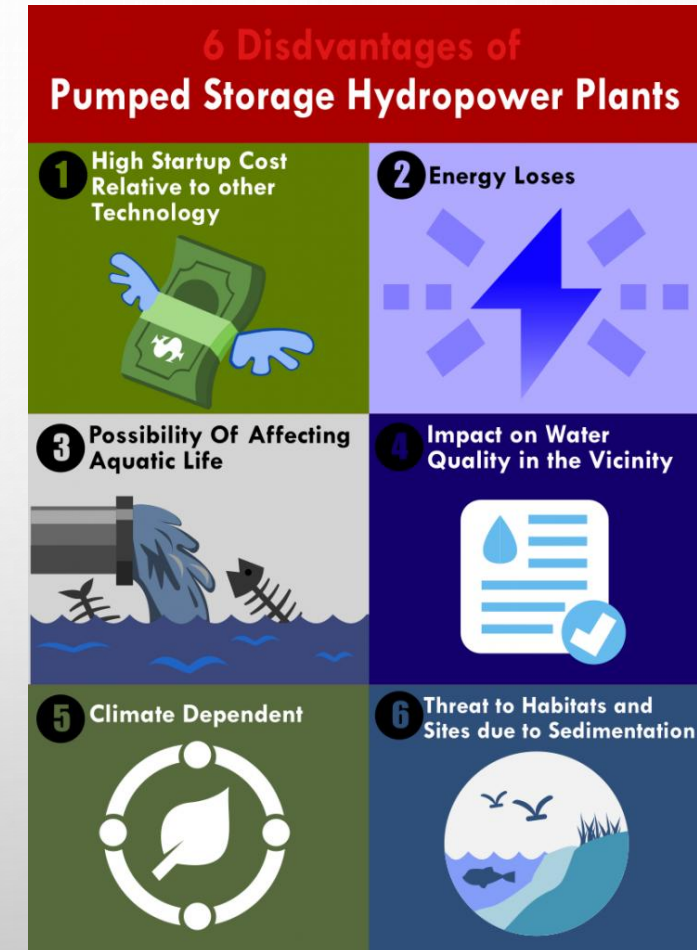
Μειονεκτήματα και Πλεονεκτήματα PHES

Μειονεκτήματα του PHES:

- Προβληματισμός στην εύρεση **κατάλληλων περιοχών**:
 - Δυσκολία στον εντοπισμό περιοχών για ταμιευτήρες και φράγματα.
- **Χρονοβόρα και δαπανηρή** κατασκευή:
 - Η διαδικασία κατασκευής διαρκεί έως και 10 έτη.
 - Υψηλό κόστος και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στρατηγικές αντιμετώπισης:

- Αξιοποίηση **υφιστάμενων υδροηλεκτρικών φραγμάτων**:
 - Η μετατροπή μειώνει το κόστος, επιταχύνει την κατασκευή και ελαχιστοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



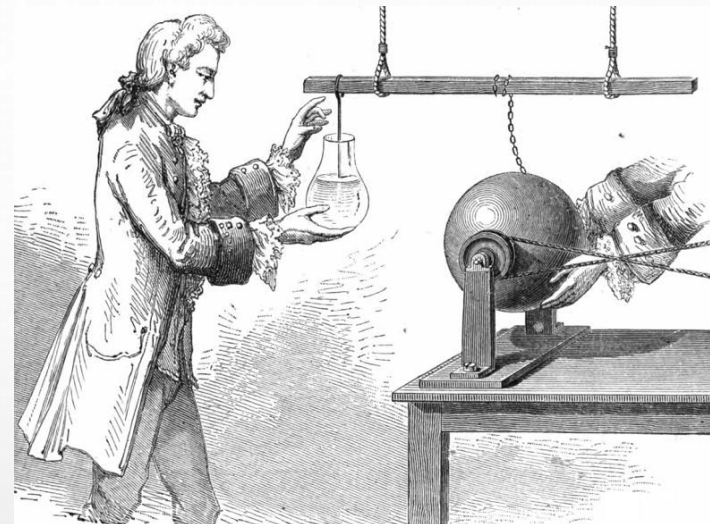


Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Συστήματα Αποθήκευσης με μπαταρίες



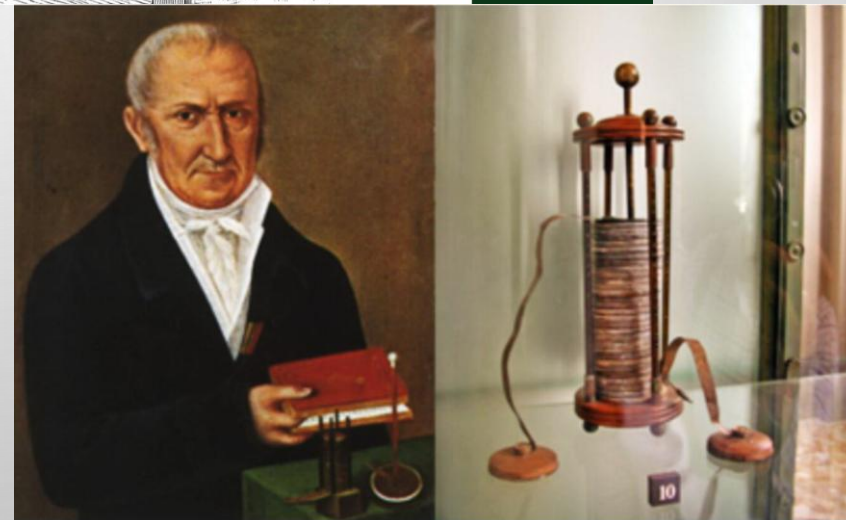
Κύρια χαρακτηριστικά και Metrics

- Βάζο Leyden (1745): Πρώτο είδος "μπαταρίας" που αποθήκευε ηλεκτρικό φορτίο υψηλής τάσης.
- Μπαταρία του Αλεσάντρο Βόλτα (1800): Πρώτη πραγματική μπαταρία με δίσκους χαλκού και ψευδαργύρου, που παρήγαγε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα.⁸
- Κυψέλη Daniell (1836): Σημαντικό άλμα με τη δημιουργία της κυψέλης Daniell.
- Εξέλιξη της Τεχνολογίας: Από το 1836, η τεχνολογία των μπαταριών έχει σημειώσει τεράστια πρόοδο.
- Λειτουργία Μπαταριών: Βασίζονται στη δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίων σε διάλυμα ηλεκτρολύτη.
- Μετασχηματιστική Εξέλιξη: Ιστορική διαδρομή αναδεικνύει τη μετασχηματιστική εξέλιξη των μπαταριών.
- Αναπόσπαστο Μέρος της Σύγχρονης Κοινωνίας: Απαραίτητες στη σύγχρονη κοινωνία, υπηρετώντας ποικίλες εφαρμογές.⁹



Η ανακάλυψη του βάζου Leyden, ήταν θεμελιώδους σημασίας για τη μελέτη της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς πριν από την εφεύρεση του, οι ερευνητές έπρεπε να καταφύγουν σε μονωμένους αγωγούς μεγάλων διαστάσεων για να αποθηκεύσουν ένα φορτίο και το βάζο Leyden παρείχε μια πολύ πιο συμπαγή εναλλακτική λύση.

Βάζο Leyden



Μπαταρία του Αλεσάντρο Βόλτα

⁸ "Biography of Alessandro Volta, Inventor of the Battery" <https://www.thoughtco.com/alessandro-volta-1992584>
⁹ Krivik, P. and Baca, P. (2013) Electrochemical Energy Storage, Energy Storage—Technologies and Applications, Ahmed Faheem Zobaa, IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/42271>



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Συστήματα Αποθήκευσης με μπαταρίες



Κύρια χαρακτηριστικά και Metrics

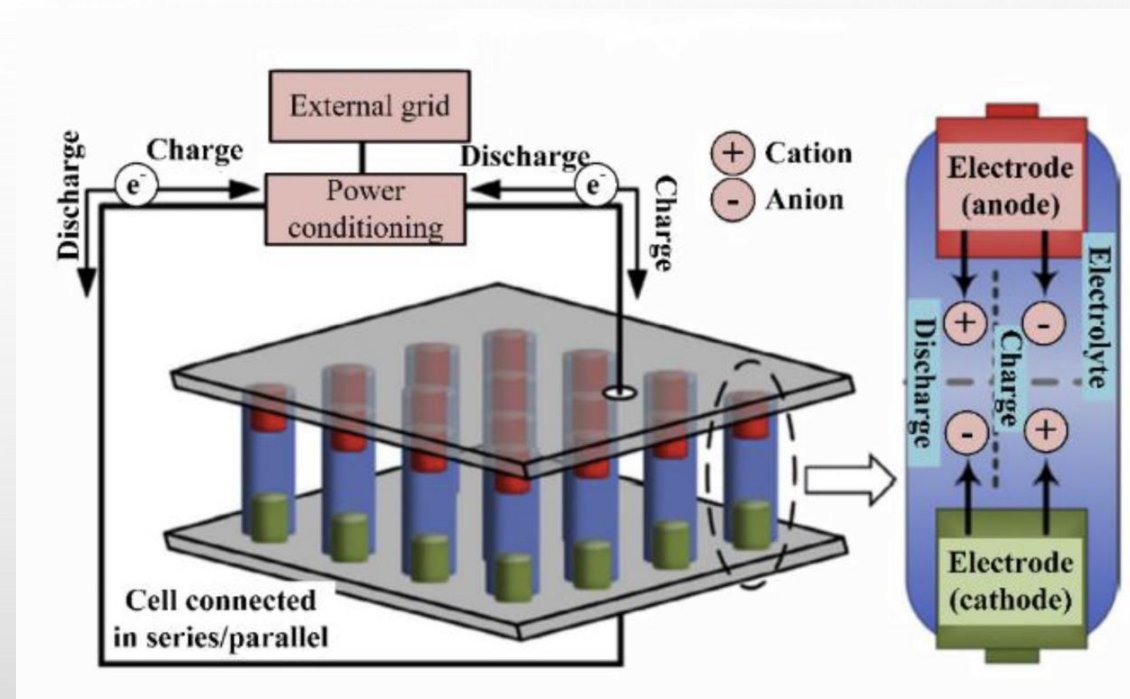
Βασικά χαρακτηριστικά κατηγοριών μπαταριών:

- Ενεργειακή πυκνότητα
- Τάση κυψέλης
- Ρεύμα αιχμής
- Ρυθμός αυτοεκφόρτισης
- Χρόνος φόρτισης
- Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας
- Διάρκεια κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης

Το Σχήμα 9 απεικονίζει τη λειτουργία μιας κυψέλης μπαταρίας με άνοδο, κάθοδο και ηλεκτρολύτη:

- **Άνοδος - εκφόρτιση:** Διάλυση μετάλλου, δημιουργία ηλεκτρονίων
- **Κάθοδος:** Ροή ηλεκτρονίων προς την κάθοδο δημιουργώντας ρεύμα
- **Ηλεκτρολύτης:** Μέσον μεταφοράς ηλεκτρονίων

Η φόρτιση αντιστρέφει αυτή τη διαδικασία. Η τάση του μεμονωμένου στοιχείου μπορεί να είναι ανεπαρκής, καθιστώντας αναγκαία τη σύνδεση σειράς για την επιθυμητή έξοδο.



Σχήμα 9: Αρχή λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης μπαταριών

Πηγή: Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clarke, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Appl. Energy **2015**, 137, 511–536

10 Hossain, E. et al., Energies (2020) "A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects", <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/14/3651/html>



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Συστήματα Αποθήκευσης με μπαταρίες

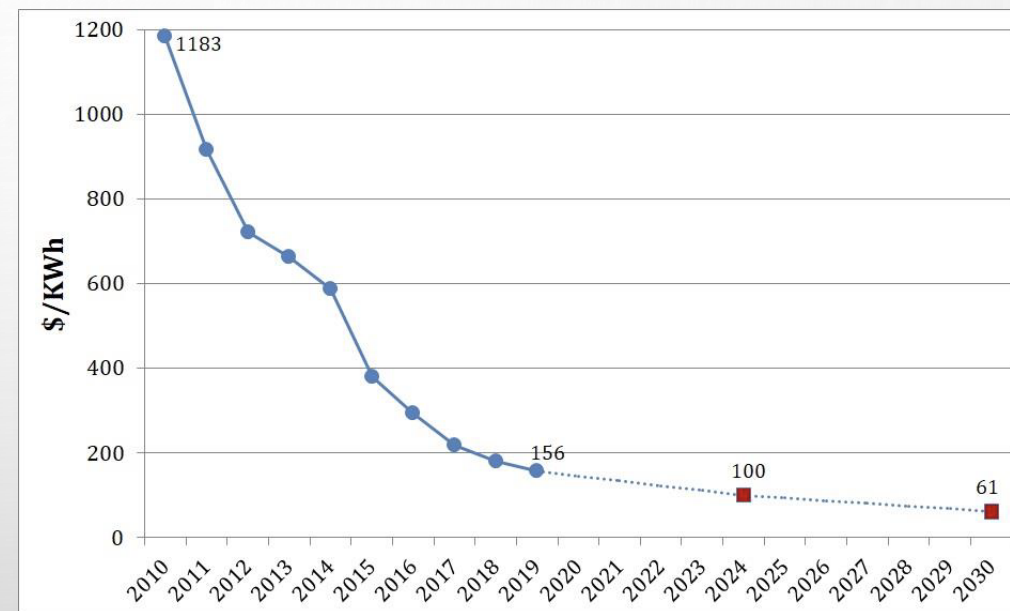


Κύρια χαρακτηριστικά και Metrics

Τρέχουσα κατάσταση

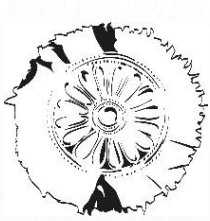
- Συστήματα μπαταριών μεγάλης κλίμακα: 768 συστήματα, αποθηκευτική ικανότητα **1,79 GW**
- Τρίτη θέση στις τεχνολογίες αποθήκευσης παγκοσμίως
- Κυριαρχία **μπαταριών ιόντων λιθίου: 74%**
- Μπαταρίες **νατρίου: 8,5%**
- Hornsdale Power Reserve στην Αυστραλία (έργο Tesla): Μεγαλύτερο σύστημα μπαταριών παγκοσμίως (100MW, 129MWh)
- Ελπιδοφόρες προοπτικές λόγω τεχνολογικής προόδου και μείωσης κόστους.

Το Bloomberg New Energy Foundation ¹¹ αναφέρει μείωση του κόστους κατά 86,8% από 1183 \$/KWh το 2010 σε 156 \$/KWh το 2019. Οι προβλέψεις αναφέρουν ότι το κόστος θα πέσει κάτω από 100 \$/KWh (2024) και 61 \$/KWh (2030), προωθώντας τον πενταπλασιασμό της αγοράς μπαταριών, φτάνοντας τα 116 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως μέχρι το 2030, και την εκτίναξη της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος από 9GW το 2018 σε 1095GW το 2040. Η συνεχής μείωση του κόστους και η αυξημένη διείσδυση εξαρτώνται από τη βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας, την πρόοδο στις τεχνολογίες ανόδου και καθόδου και την ανάπτυξη νέων υλικών.



Σχήμα 10: Κόστος μπαταριών για την περίοδο 2010-2019 και προβλέψεις για το 2024 και το 2030.

11 Bloomberg NEF (July 2019) "Energy Storage Investments Boom As Battery Costs Halve in the Next Decade", https://about.bnef.com/blog/energy-storage-investments-boom-battery-costs-halve-next-decade/#_ftn1



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Συστήματα Αποθήκευσης με μπαταρίες



Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα της αποθήκευσης μπαταριών

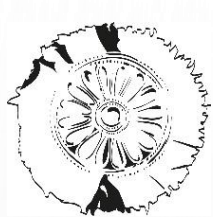
- Γρήγορος χρόνος απόκρισης: Ανταποκρίνεται σε δευτερόλεπτα λόγω της απουσίας μηχανικών μερών.
- Υψηλή απόδοση: Επιτυγχάνεται έως και 96%, ξεπερνώντας τις τεχνολογίες αποθήκευσης με αντλησιοταμίευση.
- Γρήγορη κατασκευή: Αποδεικνύεται από την ταχεία ανάπτυξη της Tesla στην Αυστραλία.
- Ποικίλες υπηρεσίες: Προσφέρει δυνατότητα μαύρης εκκίνησης, εξοικονόμηση αιχμής, ρύθμιση συχνότητας και εξισορρόπηση φορτίου.
- Κυριαρχία των μπαταριών ιόντων λιθίου: Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, χαμηλή αυτοεκφόρτιση και ελάχιστο κόστος συντήρησης.

Μειονεκτήματα της αποθήκευσης μπαταριών:

- Περιορισμένη διάρκεια ζωής: Χάνει σημαντική χωρητικότητα μετά από σχετικά μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης.¹²
- Ελλείψεις πρώτων υλών: Περιορισμένη διαθεσιμότητα πρώτων υλών, γεγονός που επιβάλλει τεχνολογίες ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Προκλήσεις στην ανακύκλωση, με εκτιμήσεις για 2 εκατομμύρια μετρικούς τόνους μπαταριών λιθίου έως το 2030.¹³
- Χαμηλά ποσοστά ανακύκλωσης Τα σημερινά ποσοστά είναι 2-3% στην Αυστραλία και λιγότερο από 5% στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ.
- Τεχνικοί περιορισμοί: Η εξέλιξη των τεχνολογιών ανακύκλωσης αντιμετωπίζει τεχνικά, οικονομικά και κανονιστικά εμπόδια.
- Ανησυχίες για την ασφάλεια: Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ευαίσθητες, επιρρεπείς στη φθορά και απαιτούν προστατευτικά κυκλώματα για τη ρύθμιση της τάσης.
- Ευαισθησία στη θερμοκρασία: Η παρακολούθηση είναι απαραίτητη για την αποφυγή θεμάτων που σχετίζονται με ακραίες θερμοκρασίες.

¹² Zachary Shahan, CleanTechnica (2015). "Tesla Powerwall & Powerpacks Per-kWh Lifetime Prices vs Aquion Energy, Eos Energy, & Imergy", <https://cleantechnica.com/2015/05/09/tesla-powerwall-powerblocks-per-kwh-lifetime-prices-vs-aquion-energy-eos-energy-imergy/>

¹³ Chemical and Engineering News (2019), "It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries", <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας



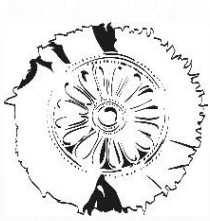
Συνοπτικά:

- Συγκριτική κατάταξη: Δεύτερη στις τεχνολογίες αποθήκευσης, μετά την αποθήκευση ενέργειας με αντλησιοταμίευση (PHES).¹⁴
- Capacity: Συνολική χωρητικότητα 2,3 GW παγκοσμίως, με μερίδιο 81,5% στην τεχνολογία των λιωμένων αλάτων.
- Ιστορική χρήση: Εφαρμόζεται εδώ και χρόνια παράλληλα με τα ηλιοθερμικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.
- Solana Power Plant:
 - Βρίσκεται στην Αριζόνα των ΗΠΑ, με συνολική ισχύ 280 MW και τεχνολογία λιωμένων αλάτων για αποθήκευση ενέργειας 6 ωρών.
 - Απόδοση χρήσης: Το σύστημα αποθήκευσης της Solana της επιτρέπει να τροφοδοτεί το δίκτυο με το 38% της ονομαστικής της ισχύος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.
 - Σύγκριση με άλλες τεχνολογίες:
 - Υψηλότερο ποσοστό αξιοποίησης σε σύγκριση με τα ηλιοθερμικά συστήματα χωρίς θερμική αποθήκευση και τα φωτοβολταϊκά μεγάλης κλίμακας (20-25%).¹⁵



¹⁴ IRENA (2016) "The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025", Bonn, International Renewable Energy Agency, https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf

¹⁵ Power (2014) "Top Plant: Solana Generating Station, Maricopa County, Arizona" <https://www.powermag.com/solana-generating-station-maricopa-county-arizona/>



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας



Μετατροπή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από λιγνίτη και άνθρακα

Επιπτώσεις της μετάβασης στην ανανεώσιμη ενέργεια:

- Κινητήριος παράγοντας: Αύξηση των μεριδίων των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό σύστημα.
- Πρωτοβουλίες μετατροπής: Πρόσφατες προσπάθειες μετατροπής υφιστάμενων μονάδων καύσης λιγνίτη ή άνθρακα σε συστήματα θερμικής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.

Μετάβαση του ευρωπαϊκού ενεργειακού μείγματος:

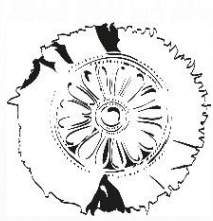
- Μείωση του λιγνίτη και του άνθρακα: Η ανάλυση της Ember αναφέρει μείωση κατά 32% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη και άνθρακα στην ΕΕ-27 κατά το πρώτο εξάμηνο του 2020.
- Δέσμευση για σταδιακή κατάργηση: Τα κράτη μέλη της ΕΕ δεσμεύτηκαν να καταργήσουν σταδιακά τα στερεά ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στην απόσυρση 71,2 GW από την ακαθάριστη ονομαστική ισχύ των 136,5 GW των υφιστάμενων λιγνιτικών και ανθρακικών μονάδων.

Μελλοντικές προοπτικές δυναμικότητας:

- Προβλεπόμενη δυναμικότητα το 2030: Η ανάλυση των CAN Europe και Ember υποδηλώνει πτώση της καθαρής δυναμικότητας των λιγνιτικών και ανθρακικών μονάδων καύσης σε 52,2 GW το 2030.
- Πιθανά υψηλότερα ποσοστά απόσυρσης: Πρόβλεψη ακόμη υψηλότερων ποσοστών απόσυρσης για τις λιγνιτικές και ανθρακικές μονάδες.

Επαναχρησιμοποίηση υποδομών δικτύου:

- Ανάγκη για βιώσιμη επαναχρησιμοποίηση: Με ένα σημαντικό τμήμα του δικτύου να καθίσταται απαρχαιωμένο, η επαναχρησιμοποίηση είναι ζωτικής σημασίας.
- Μετατροπή σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης: Μεγάλες ευρωπαϊκές εταιρείες ενέργειας διερευνούν τη μετατροπή μονάδων καύσης λιγνίτη και άνθρακα σε εγκαταστάσεις θερμικής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ.



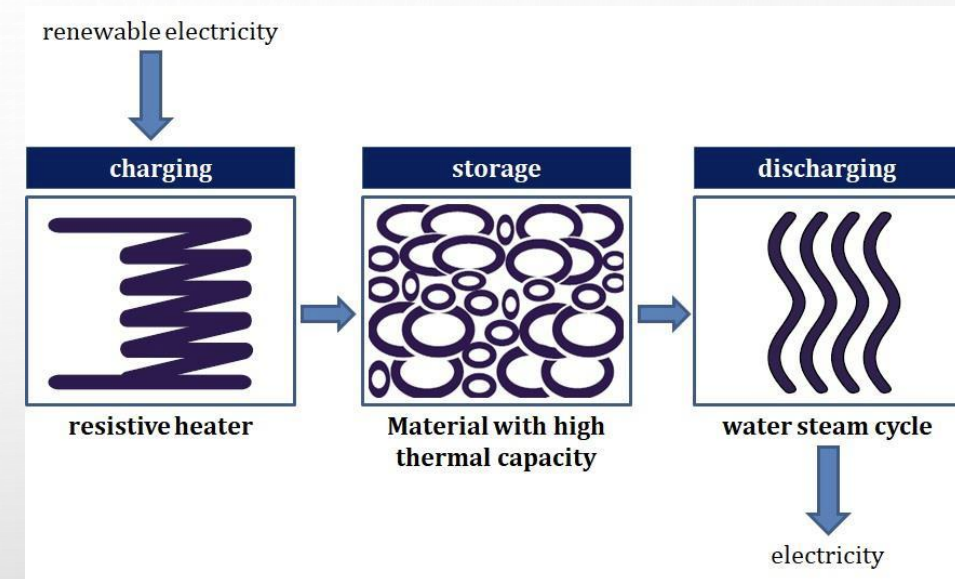
Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας



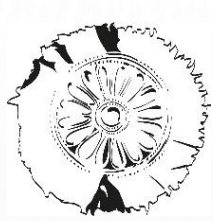
Εναλλακτικές Μέθοδοι Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας

Μετασχηματισμός καθαρής ενέργειας:

1. Η ηλεκτρική **ενέργεια από ΑΠΕ** μετατρέπεται σε **θερμότητα**.
2. Αποθήκευση θερμότητας σε **υλικό υψηλής χωρητικότητας**.
3. Η αποθηκευμένη θερμότητα **παράγει ατμό** για ηλεκτρική ενέργεια **χωρίς εκπομπές**, επαναχρησιμοποιώντας μονάδες άνθρακα για ένα καθαρό ενεργειακό σύστημα.



Σχήμα 11: Μετασχηματισμός καθαρής ενέργειας
Πηγή: Green Tank



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας



Εναλλακτικές Μέθοδοι Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας

Ηφαιστειακά πετρώματα

Έργο ETES της Siemens-Gamesa: ¹⁶ ¹⁷ ¹⁸

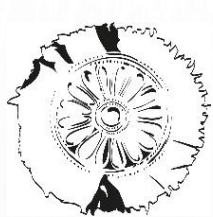
- Χρησιμοποιεί **ηφαιστειακά πετρώματα για θερμική αποθήκευση χαμηλού κόστους.**
- Πιλοτικό σύστημα (5MWh) σε λειτουργία το 2014-σύστημα του Αμβούργου (130MWh) το 2019.
- Χρησιμοποιεί 1000 τόνους ηφαιστειακών πετρωμάτων για εβδομαδιαία αποθήκευση ενέργειας.
- Αποδοτική **μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα (απόδοση 99%).**
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αποθηκευμένη θερμότητα αναμένεται με απόδοση 45%.
- Το κόστος εγκατάστασης υποστηρίζεται ότι είναι 10 φορές χαμηλότερο από τις μπαταρίες μεγάλης κλίμακας.
- Η ETES στοχεύει σε εμπορική λειτουργία έως το 2022, επεκτάσιμη σε επίπεδα GWh, συμβατή με τις υπάρχουσες μονάδες άνθρακα.



16 NS Energy (2019) "Electric Thermal Energy Storage (ETES) System, Hamburg"
<https://www.nsenenergybusiness.com/projects/electric-thermal-energy-storage-etes-system-hamburg/>

17 Siemens-Gamesa (July 2018) "ETES-Energy storage to the next level", Presentation in the Working Group meeting of the Coal Regions in Transition Platform.
https://energy.ec.europa.eu/index_en

18 Siemens-Gamesa (2020) <https://cutt.ly/7hdJTyT>



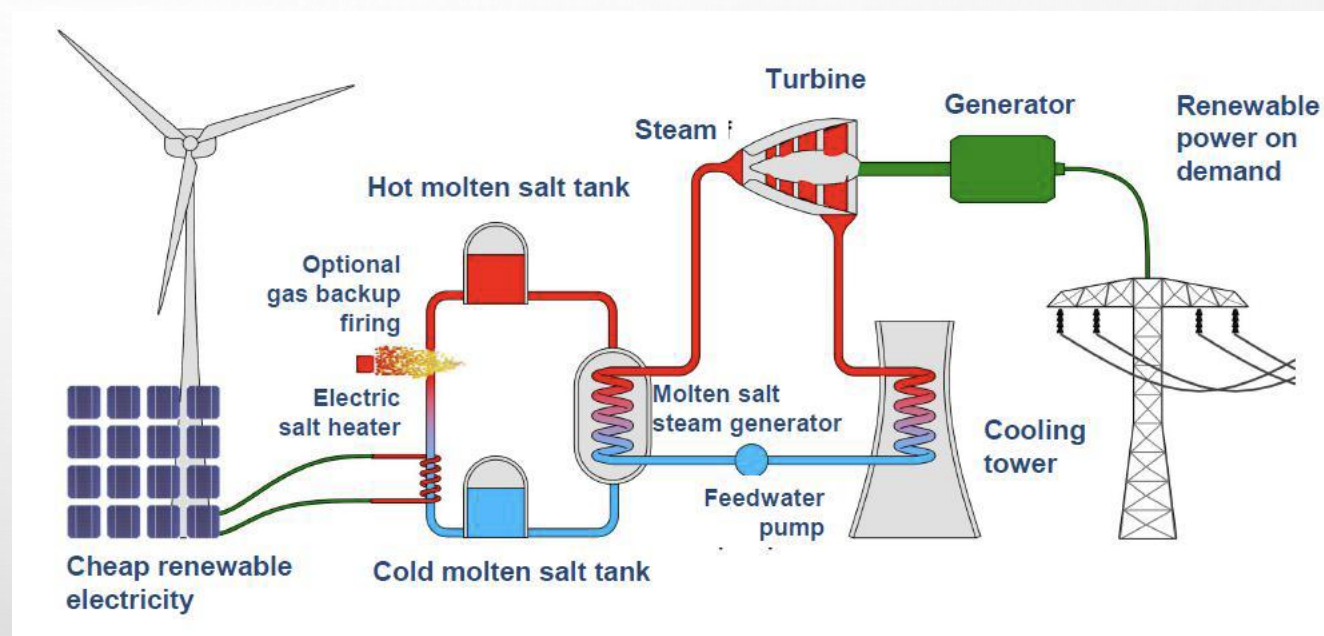
Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας



Εναλλακτικές Μέθοδοι Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας

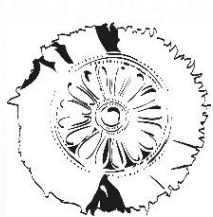
Molten Salts Thermal Storage:

- Αποδεδειγμένη τεχνολογία στα ηλιοθερμικά συστήματα.
- Συνήθως χρησιμοποιείται νιτρικό νάτριο και νιτρικό κάλιο.
- Η ενσωμάτωση με μονάδες λιγνίτη ή άνθρακα περιλαμβάνει την αντικατάσταση του λέβητα με εναλλάκτη θερμότητας.
- Η ηλεκτρική αντίσταση μετατρέπει την αιολική/φωτοβολταϊκή ενέργεια σε θερμότητα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία των αλάτων στους 600°C.
- Τα άλατα υψηλής θερμοκρασίας διέρχονται από τον εναλλάκτη θερμότητας, παράγοντας ατμό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ο ατμός παράγεται από την αποθηκευμένη αιολική/ηλιακή ενέργεια, μεταβάλλοντας την πηγή ατμού της μονάδας καύσης.
- Μια βιώσιμη λύση που επαναχρησιμοποιεί την υπάρχουσα υποδομή άνθρακα για την παραγωγή καθαρής ενέργειας.



Σχήμα 12: Αρχή λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε λιωμένα άλατα σε συνδυασμό με υφιστάμενη μονάδα καύσης λιγνίτη ή άνθρακα

Πηγή: Michael Geyer, German Aerospace Center (DLR) (2019) "From Coal Age to StorAge", Webinar on Carnot Batteries



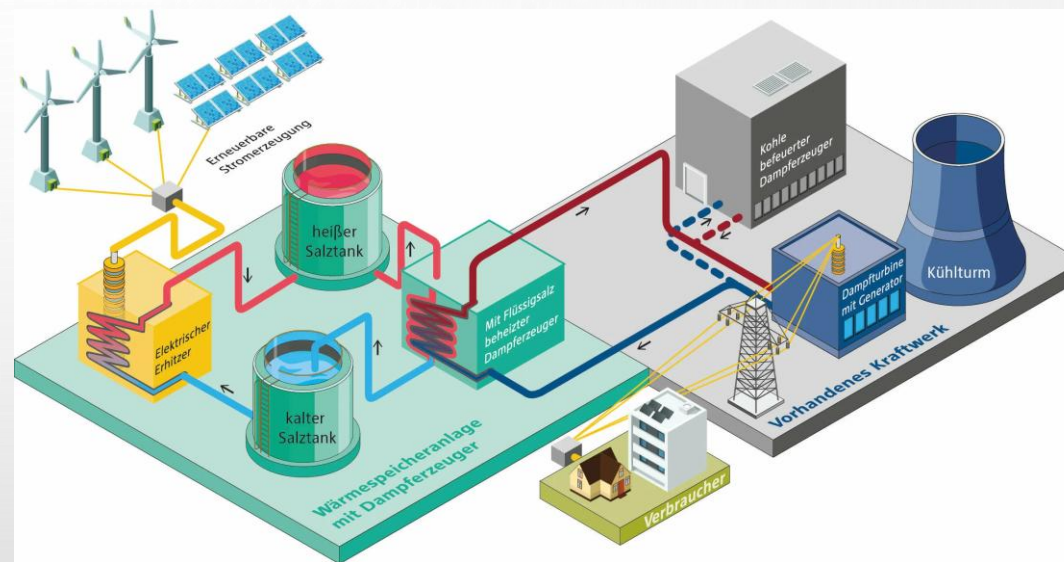
Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας



Εναλλακτικές Μέθοδοι Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας

Έργο "Store 2 Power": ¹⁹

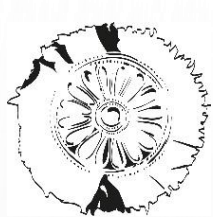
- Πρωτοβουλία της Γερμανίας για τη μετατροπή των λιγνιτικών μονάδων της RWE σε μονάδες αποθήκευσης ενέργειας με τηγμένα άλατα.
- Συνεργασία μεταξύ της RWE, του Γερμανικού Κέντρου Αεροδιαστημικής (DLR) και του Πανεπιστημίου του Άαχεν.
- Στοχεύει στην επίτευξη συνολικής απόδοσης περίπου 40%.
- Πολιτική υποστήριξη από μεγάλα γερμανικά κόμματα, ευθυγραμμισμένη με την κυβερνητική συμφωνία του 2018.
- Μέρος των προτάσεων της Γερμανικής Επιτροπής Άνθρακα για τη σταδιακή κατάργηση του λιγνίτη και του άνθρακα έως το 2038.
- Επιλέχθηκε από το γερμανικό Υπουργείο Οικονομικών Υποθέσεων και Ενέργειας ως έργο-κλειδί για την ενεργειακή μετάβαση.
- Ευθυγραμμίζεται με τον πρόσφατο γερμανικό νόμο που διοχετεύει 40 δισ. ευρώ για τη στήριξη των λιγνιτικών περιοχών σε μετάβαση.
- Παρόμοιες πρωτοβουλίες συζητούνται σε παγκόσμιο επίπεδο- π.χ. συνεργασία στη Χιλή για την απαλλαγή από τον άνθρακα στον ενεργειακό τομέα.



Σχήμα 13: Σχηματική αναπαράσταση της μετατροπής ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα σε σταθμό αποθήκευσης θερμότητας

Πηγή: RWE

¹⁹ En:former – RWE's energy blog, (2019) "Coal-fired power plant to be converted into heat storage facility" <https://www.en-former.com/en/coal-fired-power-plant-as-large-heat-storage-facility/>



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας



Πλεονεκτήματα της μετατροπής μονάδων λιγνίτη και άνθρακα:

- Περιβαλλοντικός μετασχηματισμός:
 - Οι μονάδες καύσης που έχουν αποσυρθεί μετατρέπονται σε μονάδες θερμικής αποθήκευσης χωρίς εκπομπές.
- Διατήρηση θέσεων εργασίας:
 - Διατήρηση της απασχόλησης στις λιγνιτικές περιοχές κατά τη διάρκεια της μετάβασης.
- Αξιοποίηση της υποδομής:
 - Εκτεταμένη υφιστάμενη υποδομή επαναχρησιμοποιείται για υπηρεσίες αποθήκευσης.
- Μέσα αποθήκευσης χαμηλού κόστους:
 - Λιωμένα άλατα και ηφαιστειακές πέτρες ως ανθεκτικά, οικονομικά αποδοτικά μέσα αποθήκευσης.
- Εναλλακτικές χρήσεις:
 - Τα λιωμένα άλατα έχουν διττό σκοπό ως συστατικά λιπασμάτων.
- Μικρός χρόνος εγκατάστασης:
 - Ταχεία μετατροπή, π.χ., μια μονάδα 300MW σε περίπου 18 μήνες.

Μειονεκτήματα της μετατροπής μονάδων λιγνίτη και άνθρακα:

- Τεχνικές προκλήσεις:
 - Η νέα προσέγγιση θέτει προκλήσεις που σχετίζονται με την κλίμακα των υφιστάμενων εγκαταστάσεων καύσης.
- Μέτρια απόδοση:
 - Συνολική απόδοση περίπου 40%-45%, χαμηλότερη από την αντλησιοταμίευση και τις μπαταρίες.
- Κόστος:
 - Εκτίμηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο με βάση την τιμολόγηση των φωτοβολταϊκών και την απόδοση του συστήματος.

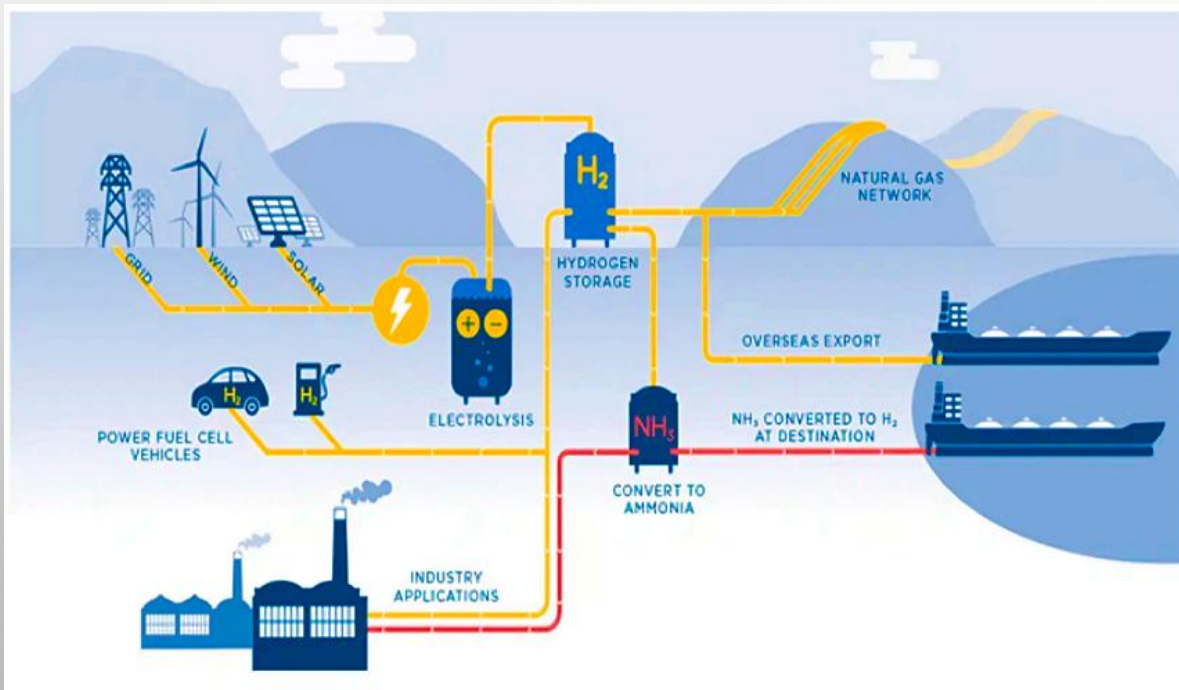


Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Υδρογόνου



Εισαγωγή στην ενέργεια υδρογόνου:

- **Ενεργειακός φορέας υψηλής πυκνότητας:** Αποθηκεύει ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια για παρατεταμένες περιόδους.
- **Πολύπλευρες εφαρμογές:** Διοχετεύει την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια στις μεταφορές, τα κτίρια, τη βιομηχανία, τα χημικά και την παραγωγή ηλεκτρικής



Σχήμα 14: Ολοκληρωμένη Παραγωγή Υδρογόνου και Παγκόσμιο Δίκτυο Διανομής
Πηγή: Jayabal, Ravikummar. "Hydrogen energy storage in maritime operations: A pathway to decarbonization and sustainability." *International Journal of Hydrogen Energy* 109 (2025): 1133-1144.

Εισαγωγή στην Αποθήκευση Ενέργειας

Τρέχον τοπίο του υδρογόνου :

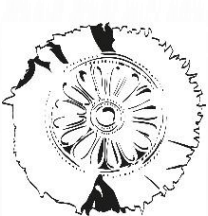
- Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου:
 - 117 εκατομμύρια τόνοι ετησίως
 - 69 εκατ. τόνοι σε καθαρή μορφή, 48 εκατ. τόνοι ως παραπροϊόντα.
- Κύρια χρήση:
 - **Διυλιστήρια πετρελαίου, παραγωγή αμμωνίας, θερμότητα, μεθανόλη και χάλυβας.**
 - Κυριαρχία των ορυκτών καυσίμων:
 - 99% καθαρό υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα.
 - Συμβάλλει σε σημαντικές εκπομπές CO₂ (830 MtCO₂ ετησίως).

Ρόλος του υδρογόνου στην Ελλάδα:

- Εθνική μακροπρόθεσμη ενεργειακή στρατηγική (2050):
 - 15,7-33,1 TW ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύονται ως υδρογόνο.
 - 70%-78% της συνολικής αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Ισχύς ηλεκτρολυτών: 4,3 GW έως 23,5 GW, με συνεισφορά 51% έως 84% της συνολικής αποθήκευσης.

Πράσινη πρωτοβουλία για το υδρογόνο:

- Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής:
 - Στοχεύει σε 40 GW ηλεκτρολυτών έως το 2030.
 - Στοχεύει σε τουλάχιστον 10 εκατ. τόνους παραγωγής πράσινου υδρογόνου.
- Το μερίδιο του υδρογόνου στο ενεργειακό μείγμα της ΕΕ να αυξηθεί από 2% σε 13-14% έως το 2050.

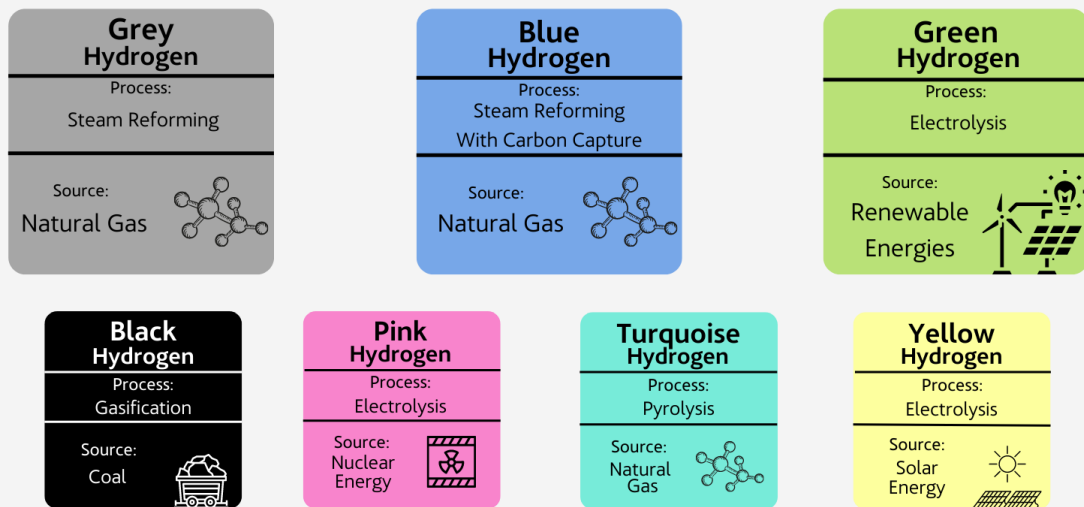


Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Υδρογόνου

Μέθοδοι παραγωγής Υδρογόνου

Ταξινόμηση χρωμάτων:

- "Μαύρο" ή "καφέ": Αεριοποίηση άνθρακα/λιγνίτη.
- "Γκρίζο": SMR με βάση το ορυκτό αέριο.
- "Μπλε": SMR με δέσμευση και αποθήκευση CO₂.
- "Τυρκουάζ": Πυρόλυση μεθανίου.
- "Πράσινο": Ηλεκτρόλυση νερού με ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ.



Σχήμα 16: Ταξινόμηση χρώματος, τεχνολογίας και πηγής Υδρογόνου

Πηγή: <https://www.accion.com.au/updates/stories/what-are-the-colours-of-hydrogen-and-what-do-they-mean>

Εισαγωγή στην Αποθήκευση Ενέργειας

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

* GHG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.

Σχήμα 15: Ταξινόμηση χρώματος και τεχνολογίας Υδρογόνου

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/The-hydrogen-color-spectrum-and-indications-for-carbon-emissions-11_fig1_358515834

Αναδυόμενες τεχνολογίες:

- Ηλιακή θερμοχημική διάσπαση νερού.
- Τεχνητή φωτοσύνθεση.

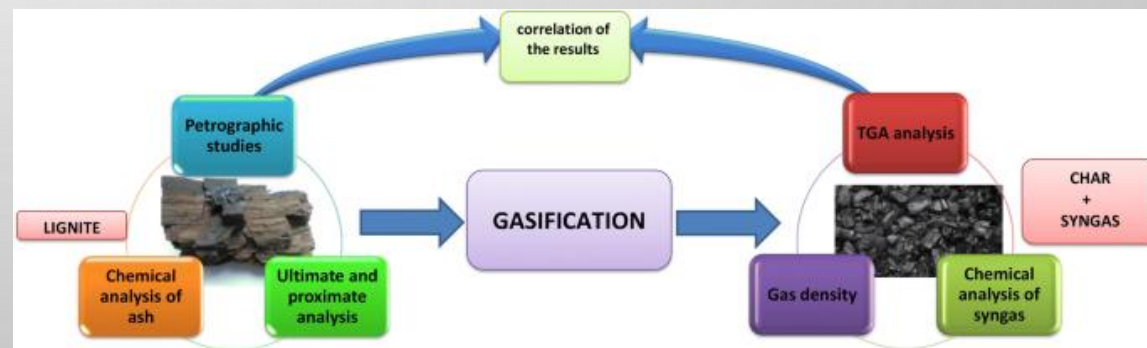


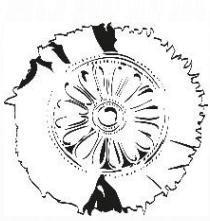
Αεριοποίηση λιγνίτη και άνθρακα για υδρογόνο:

- Ωριμη τεχνολογία:
 - Δεκαετίες χρήσης, κυρίως στην Κίνα.
 - Κυρίως στη χημική βιομηχανία και τη βιομηχανία λιπασμάτων για την παραγωγή αμμωνίας.
- Ανασκόπηση της διαδικασίας:
 - **Παραγωγή υδρογόνου με αντίδραση λιγνίτη ή άνθρακα με οξυγόνο και ατμό.**
 - Σχηματισμός συνθετικού αερίου: **CO, CO₂, H₂** και άλλα παραπροϊόντα.
 - Η αντίδραση μετατόπισης νερού ενισχύει την παραγωγή H₂.
- Παγκόσμια παρουσία:
 - 130 μονάδες παγκοσμίως- 80% στην Κίνα.
- Αποδοτικότητα κόστους:
 - Χαμηλό κόστος παραγωγής: 1,2-\$2,2 ανά κιλό υδρογόνου.
 - Ανταγωνιστική τιμολόγηση, ιδίως σε ορισμένες περιοχές.

- Επιπτώσεις στο περιβάλλον:
 - Εκπομπή 19 kg CO₂ ανά kg υδρογόνου.
 - Υψηλότερη από την αναμόρφωση μεθανίου με ατμό με ορυκτό αέριο.
- Εφαρμογές:
 - Χρησιμοποιείται συνήθως για την **παραγωγή αμμωνίας**.
- Συμπεράσματα:
 - **Μακροχρόνια αξιοπιστία.**
 - **Οικονομική αποδοτικότητα** αλλά περιβαλλοντικές ανησυχίες.

****Σημείωση:**Τα υποκείμενα περιβαλλοντικά ζητήματα δικαιολογούν τη διερεύνηση οικολογικότερων εναλλακτικών λύσεων.





Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Υδρογόνου - Steam Methane Reform (SMR)

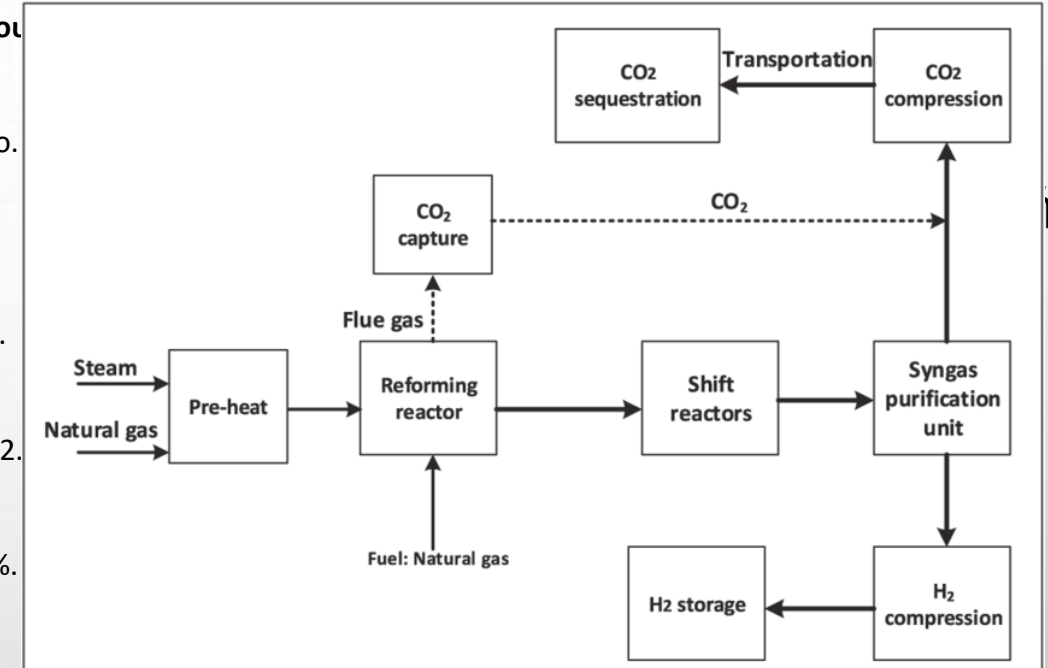


- Ανασκόπηση της διαδικασίας:
 - Χρησιμοποιεί ατμό **υψηλής θερμοκρασίας** για να αντιδράσει με το **μεθάνιο του ορυκτού αερίου**.
 - Παράγει **συνθετικό αέριο (syngas): H₂, CO και μικρή ποσότητα CO₂**.
 - Η αντίδραση μετατόπισης νερού ενισχύει την παραγωγή H₂.
 - Το τελικό στάδιο απομακρύνει το CO₂ και την περίσσεια ουσιών, αποδίδοντας καθαρό υδρογόνο.

Αποδοτικότητα κόστους:

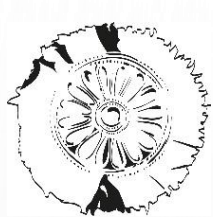
- Χαμηλότερο κόστος παραγωγής** επί του παρόντος.
 - Σημαντικός ρόλος του κόστους καυσίμου: 45%-75% του συνολικού κόστους.
 - Κόστος περίπου \$1/KgH₂ σε περιοχές με χαμηλό κόστος καυσίμου (Μέση Ανατολή, ΗΠΑ, Ρωσία).
- Παγκόσμια διακύμανση κόστους:
 - Υψηλότερο κόστος σε περιοχές που εισάγουν ορυκτό αέριο (Ευρώπη, Κίνα), περίπου \$1,75/KgH₂.
- Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS):
 - Ο συνδυασμός με CCS αυξάνει το κόστος εγκατάστασης κατά 50%, το κόστος καυσίμου κατά 10%.
 - Το λειτουργικό κόστος διπλασιάζεται λόγω των αναγκών μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:
 - Κάθε τόνος υδρογόνου που παράγεται μέσω SMR απελευθερώνει 9 τόνους CO₂.
 - Προκλήσεις για την επίτευξη σημαντικής μείωσης των εκπομπών (90%) με συστήματα SMR-CCS.
- Δυνατότητα κλιματικής ουδετερότητας:
 - Το "γκρίζο" υδρογόνο (χωρίς CCS) δεν αναμένεται να συμβάλει στην κλιματική ουδετερότητα.
 - Αβέβαιη συμβολή του "μπλε" υδρογόνου (SMR με CCS) λόγω των προκλήσεων και των πρόσθετων εκπομπών.

****Σημείωση:** Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες και οι τεχνολογικοί περιορισμοί εγείρουν ερωτήματα σχετικά με το ρόλο του "μπλε" υδρογόνου στις προσπάθειες για κλιματική ουδετερότητα.



Σχήμα 17: Σχηματική απεικόνιση μεθόδου SMR

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Simplified-process-flow-diagram-of-steam-methane-reforming-with-carbon-capture-and_fig2_358087280



Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Υδρογόνου - Παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης



- Επισκόπηση:

- Άμεση ηλεκτρόλυση νερού για την παραγωγή υδρογόνου.
- Αυξανόμενο ενδιαφέρον λόγω της πτώσης του κόστους των ΑΠΕ και της δυνατότητας απεξάρτησης από τον άνθρακα.

- Διαδικασία ηλεκτρόλυσης:

- Εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος στο νερό.
- Διάσπαση σε αέριο υδρογόνο και οξυγόνο.
- Αντίδραση: $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2 \text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$.

- Τύποι ηλεκτρολυτών:

- **Αλκαλικοί ηλεκτρολύτες**

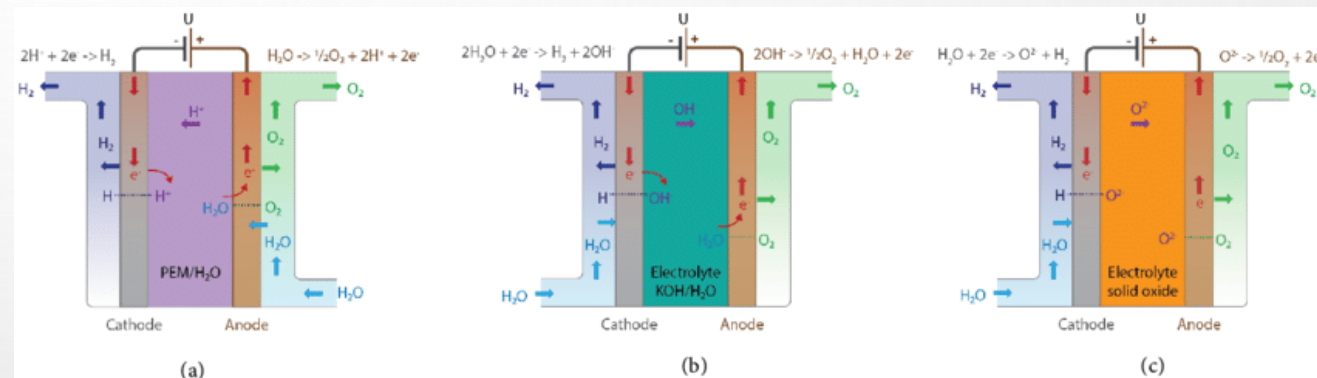
- Ώριμη τεχνολογία από τη δεκαετία του 1920.
- Χρησιμοποιεί υγρό αλκαλικό διάλυμα (NaOH ή KOH) ως ηλεκτρολύτη.
- Σχετικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης.

- **Μεμβράνες πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEM):**

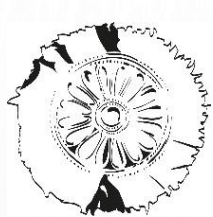
- Αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1960 ως βελτίωση των αλκαλικών ηλεκτρολυτών.
- Χρησιμοποιεί καθαρό νερό, αποφεύγοντας την ανάγκη ανάκτησης αλκαλίων.
- Μικρότερο μέγεθος, κατάλληλο για πυκνοκατοικημένες περιοχές.
- Μικρότερη διάρκεια ζωής και υψηλότερο κόστος από τους αλκαλικούς ηλεκτρολύτες.

- **Κυψέλες ηλεκτρολύτη στερεών οξειδίων (SOEC):**

- Λιγότερο ανεπτυγμένη τεχνολογία, δεν είναι διαθέσιμη στο εμπόριο.
- Στερεό κεραμικό υλικό ως ηλεκτρολύτης.
- Λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες (700°-800°C).
- Δυνατότητα συν-ηλεκτρόλυσης και αντίστροφης λειτουργίας ως κυψέλες καυσίμου.
- Μικρή διάρκεια ζωής λόγω φθοράς του υλικού, μια βασική πρόκληση.



Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση παραγωγής μέσω ηλεκτρόλυσης
Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/The-three-types-of-electrolysis-a-Acidic-PEM-Polymer-Electrolyte-Membrane-b_fig3_320669694



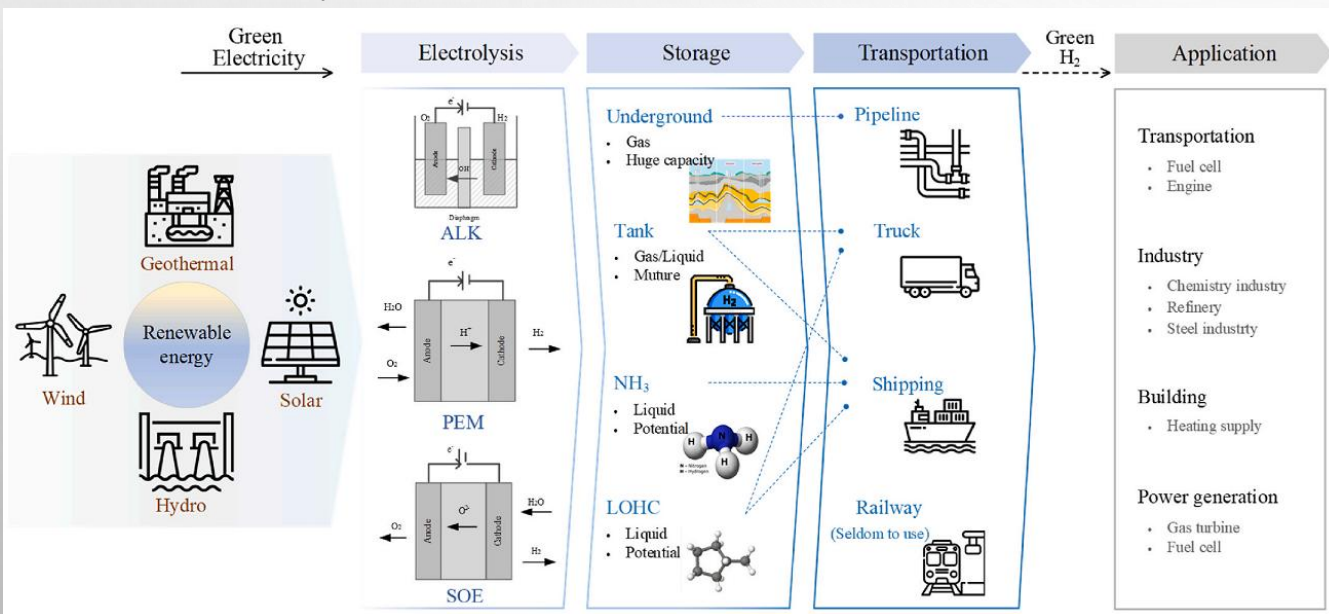
Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Υδρογόνου - Παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης

• Κόστος:

- Εκτιμώμενο κόστος πράσινου υδρογόνου: **3-7,5 δολάρια ανά κιλό.**
- Σύγκριση με το κόστος υδρογόνου SMR: 0,9-3,2 \$ ανά kg.
- Αναδύεται ανταγωνισμός σε εξειδικευμένες εφαρμογές και αναμένεται ευρύτερη βιομηχανική χρήση εντός δεκαετίας.

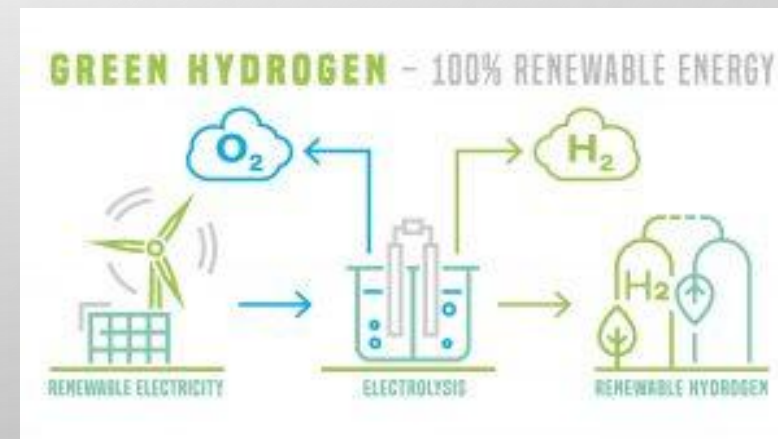
• Προοπτικές της αγοράς:

- Προβλεπόμενη **κυριαρχία των PEM** έναντι των αλκαλικών ηλεκτρολυτών.
- Μεγάλη **αβεβαιότητα στην εξέλιξη των SOECs.**
- Επέκταση της αγοράς υδρογόνου ζωτικής σημασίας για τη μείωση του κόστους.



Σχήμα 19: Σχηματικό διάγραμμα ολόκληρης της αλυσίδας εφοδιασμού πράσινου υδρογόνου

Πηγή: Yang, Jingze, et al. "Renewable energy driven electrolysis of water for hydrogen production, storage, and transportation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 218 (2025): 115804.



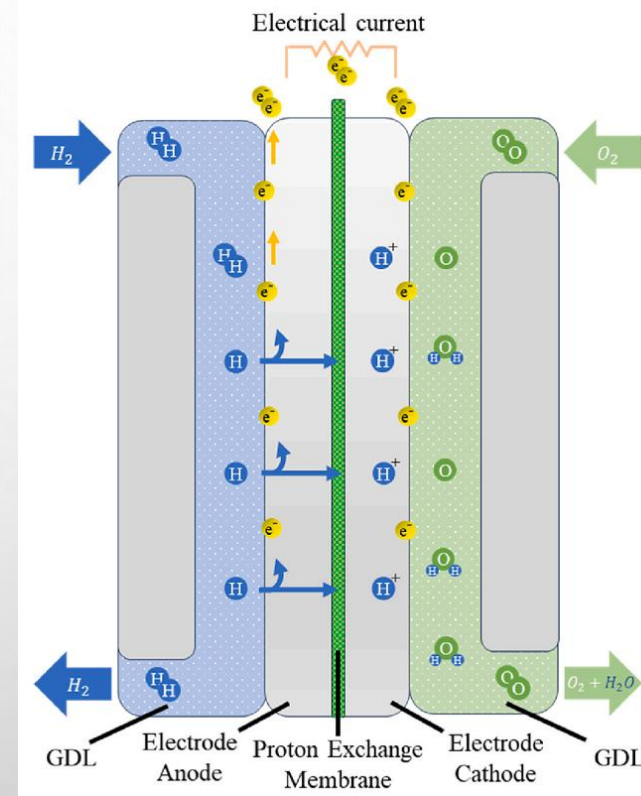


Ανάλυση Μεθόδων Αποθήκευσης Υδρογόνου - Παραγωγή Ενέργειας



Υδρογόνο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:

- Τρέχουσα κατάσταση:
 - Το υδρογόνο συμβάλλει μόνο **κατά 0,2% στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**.
 - Χρησιμοποιείται κυρίως σε διυλιστήρια, χαλυβουργία και πετροχημικά εργοστάσια.
- Μελλοντικές προοπτικές:
 - Πιθανή στροφή λόγω της συνεχούς και φιλικής προς το κλίμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Υδρογόνο σε αεριοστρόβιλους:**
 - Αντικατάσταση του ορυκτού αερίου σε συμβατικούς αεριοστρόβιλους ή σε αεριοστρόβιλους συνδυασμένου κύκλου (CCGT).
 - Οι υπάρχοντες στρόβιλοι συνήθως διαχειρίζονται μικρά μερίδια υδρογόνου (3-5%).
 - Η μονάδα Fusina στην Ιταλία αποτελεί εξαίρεση 100% υδρογονοκίνητης μονάδας (δυναμικότητας 16MW).¹⁹
 - Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν διαφορές κόστους σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες.
 - Αισιοδοξία της βιομηχανίας: Μετατροπή των υφιστάμενων στροβίλων ώστε να λειτουργούν με 100% υδρογόνο έως το 2030.
- **Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου:**
 - Δεύτερος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή απόδοση (~60%).
 - Χωρίς άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.
 - Λειτουργία: Υδρογόνο μετατρέπεται σε νερό, ηλεκτρισμό και θερμότητα.
 - Μικρότερο μέγεθος σε σύγκριση με τα συστήματα στροβίλων που λειτουργούν με υδρογόνο.
 - Τα παγκόσμια συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου ανέρχονται σε 70MW, μέρος των 1,6GW όλων των κυψελών καυσίμου παγκοσμίως.
 - Οι κυψέλες υδρογόνου έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής (10.000-40.000 ώρες λειτουργίας) και υψηλότερο κόστος.
 - Αναμενόμενη μείωση του κόστους σε 425 \$/KW μέχρι το 2030, από τα σημερινά 1600 \$/KW.



Σχήμα 20: Αρχή λειτουργίας PEMFC
Πηγή: Günaydin, Ömer Faruk, Salih Topçu, and Aslı Aksoy. "Hydrogen fuel cell vehicles: Overview and current status of hydrogen mobility." *International Journal of Hydrogen Energy* (2025).

****Σημείωση:** Ο ρόλος του υδρογόνου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξελίσσεται, με πιθανές εξελίξεις στους αεριοστρόβιλους και τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, που υποστηρίζονται από φιλόδοξους στόχους στην Ιαπωνία και την Κορέα.

Αντί επιλόγου:

πώς θα καλύψει η Ελλάδα τις ανάγκες της για αποθήκευση ενέργειας το 2030;

0.7 GW

- 4 εγκαταστάσεις αποθήκευσης.
- 2 σταθμοί αποθήκευσης αντλησιοταμίευσης ανοικτού βρόχου (PHS).
- 2 μικρούς υβριδικούς σταθμούς αποθήκευσης ΑΠΕ.



700 MW



3 MW



2022



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS

Οι προκλήσεις

- Νομικό πλαίσιο
- Διευκόλυνση της αδειοδότησης και της χρηματοδότησης σχετικά με την τεχνολογία/υποδομή



Δυνατότητες στις περιοχές υπό μετάβαση

- Αξιοποίηση της εκτεταμένης υποδομής δικτύου υψηλής τάσης και της υπάρχουσας τεχνογνωσίας.
- Ενσωμάτωση αποθήκευσης σε προγραμματισμένα φωτοβολταϊκά πάρκα σε πρώην περιοχές εξόρυξης άνθρακα.



Αποθήκευση ενέργειας Το μέλλον φαίνεται λαμπρό, αλλά...

- Οι τεχνικές προκλήσεις πρέπει να αντιμετωπιστούν → ουσιαστική στήριξη σε καινοτομίες, έρευνα, περαιτέρω ανάπτυξη και υιοθέτηση από την αγορά.
- Η ενσωμάτωση στο δίκτυο και η βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας παραμένουν σημαντικά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν.



2030	2050
~6 GW	~17,5 GW
25 GWh	98 GWh

Μπαταρίες



4,3 GW	12,2 GW
11 GWh	31,2 GWh

Αντλησιοταμίευση



1,7 GW	5,5 GW
14 GWh	66,8 GWh

Ισχύς Συστήματος Αποθήκευσης (GW)
Χωρητικότητα Συστήματος Αποθήκευσης (GWh)

Αποθήκευση Ενέργειας
Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)

2030 2050



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας!



CPERI

Chemical
Process and
Energy
Resources
Institute