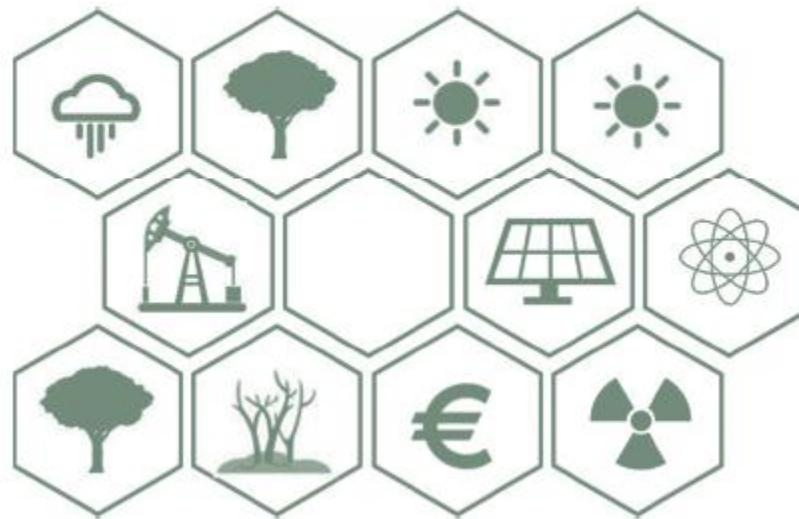




ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΤΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΜΕΙΓΜΑ ΠΗΓΩΝ



Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Προκλήσεις και Προοπτικές

Κωνσταντίνος Μπραϊμάκης

mpraim@central.ntua.gr

Εργαστήριο Ψύξης, Κλιματισμού και Ηλιακής Ενέργειας
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

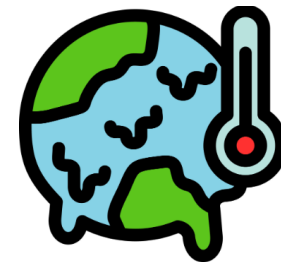
Ιωάννινα, 4 Απριλίου 2023

Εισαγωγή

Γιατί χρειαζόμαστε τις ΑΠΕ?

1) Κλιματική αλλαγή

Οι εκπομπές ορυκτών καυσίμων συνδέονται με εκπομπές αερίων θερμοκηπίου με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και αρνητικές συνέπειες για την ανθρωπότητα



2) Αποθέματα ορυκτών καυσίμων

Τα εύκολα προσβάσιμα και χαμηλού κόστους αποθέματα ορυκτών καυσίμων σταδιακά εξαντλούνται

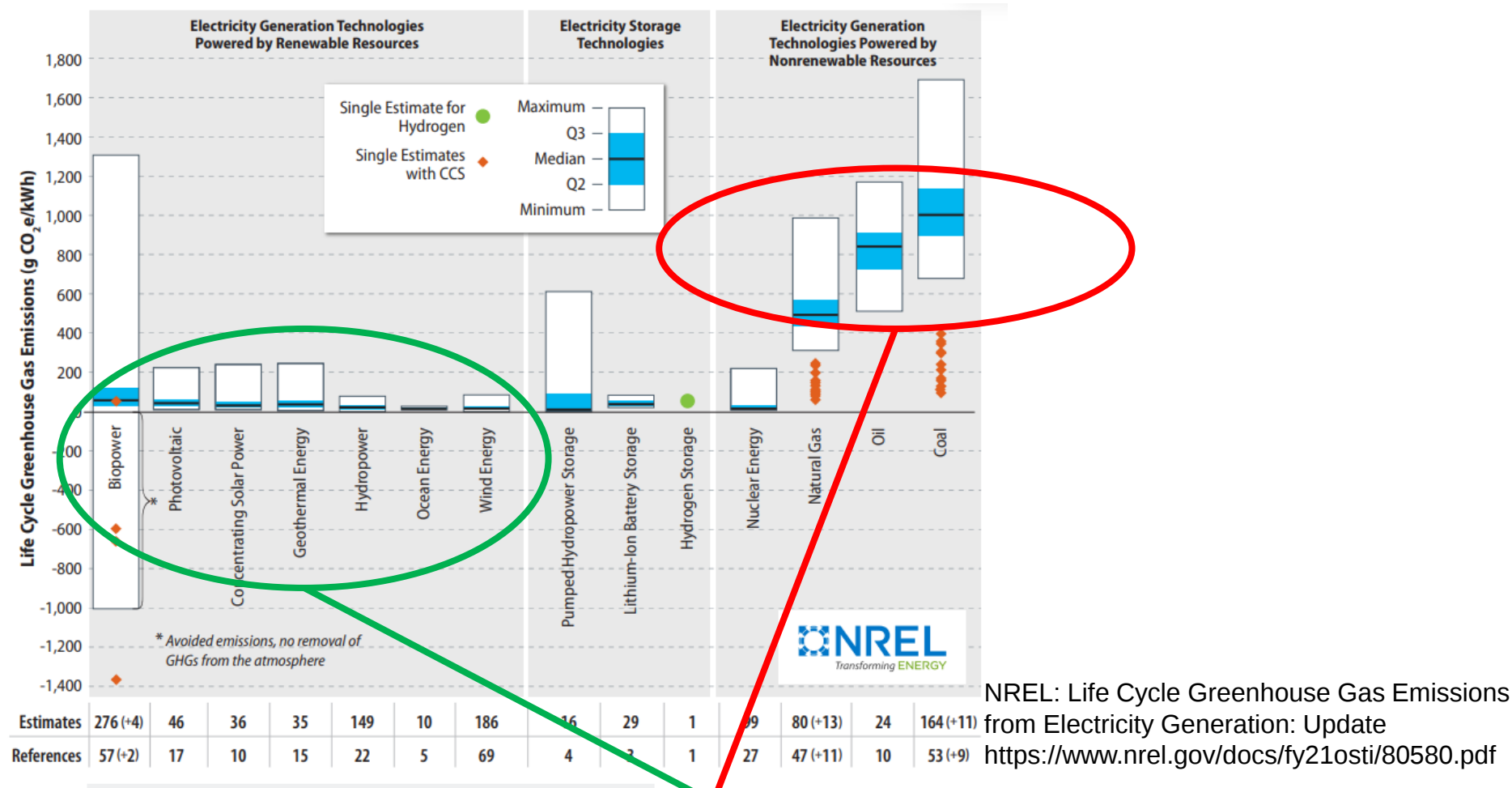


3) Ασφάλεια εφοδιασμού

Η εξάρτηση από εισαγόμενη ενέργεια (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) έχει οικονομικές και πολιτικές συνέπειες

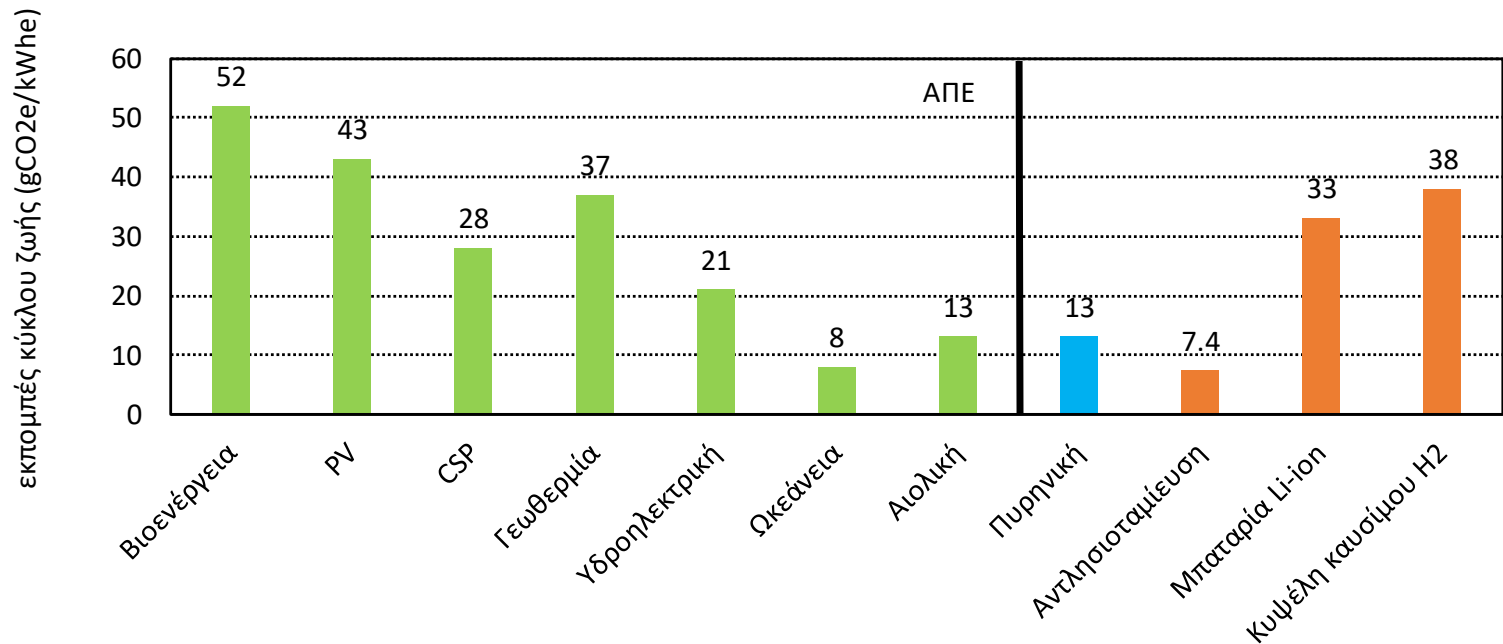


Πόσο πράσινες είναι ο ΑΠΕ? – Εκπομπές CO₂ ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας



- Συχνά αμφισβητείται ο βιώσιμος χαρακτήρας των ΑΠΕ με αναφορά στο αποτύπωμα κύκλου ζωής τους (πχ. κατασκευή και μεταφορά πάνελ PV, ανεμογεννητριών)
- Το ισοδύναμο αποτύπωμα CO₂ κύκλου ζωής των ΑΠΕ είναι σημαντικά χαμηλότερο από των τεχνολογιών ορυκτών καυσίμων

Πόσο πράσινες είναι ο ΑΠΕ? – Εκπομπές CO₂ ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας

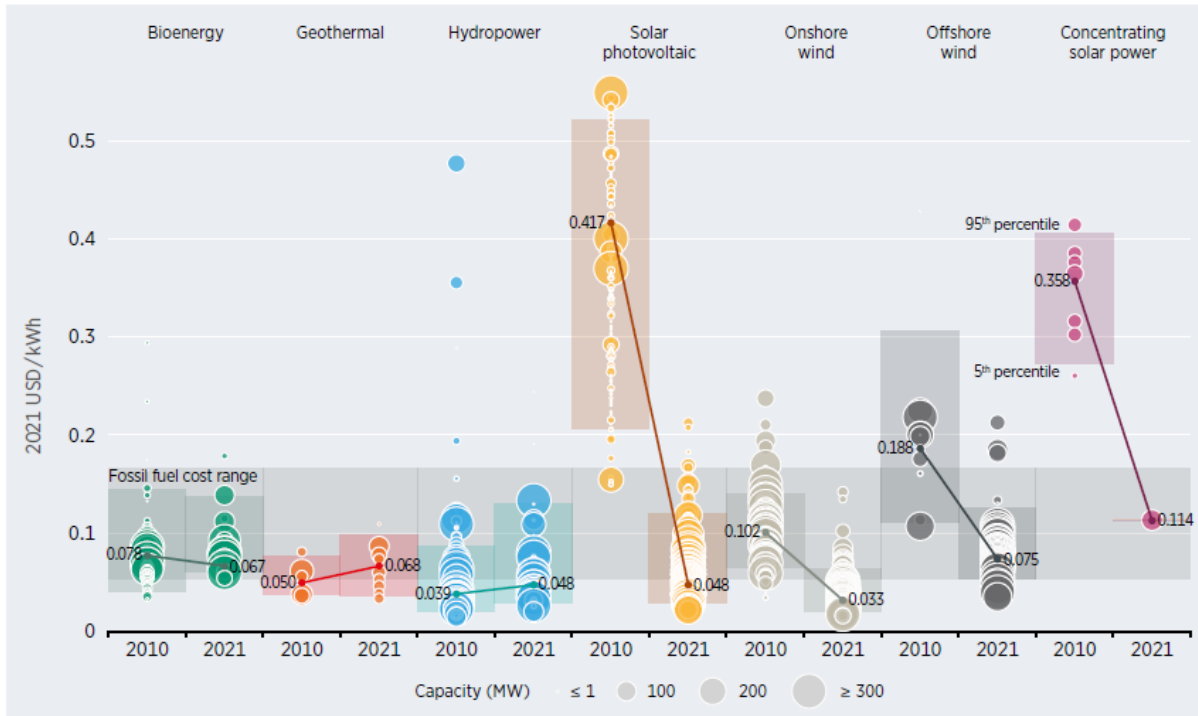


NREL: Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: Update <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80580.pdf>

- Σημαντική εξάρτηση του αποτυπώματος από ειδικούς παράγοντες για κάθε τεχνολογία και εγκατάσταση
- Μεταξύ των ΑΠΕ, το χαμηλότερο αποτύπωμα έχουν η ωκεάνεια και η αιολική
- Το υψηλότερο αποτύπωμα έχουν τα PV και η βιοενέργεια (ενέργεια για καλλιέργεια και μεταφορά βιομάζας)

Εισαγωγή

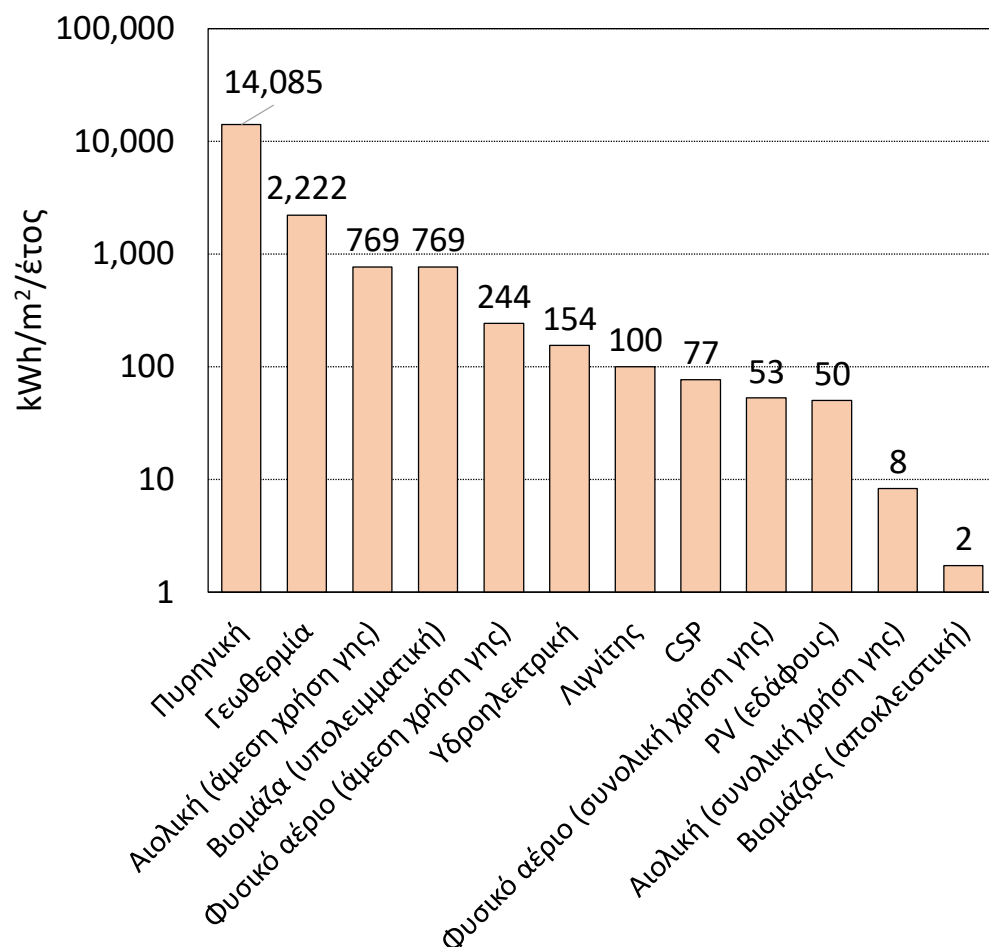
Πόσο φθηνές είναι ο ΑΠΕ? - \$ ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας



IRENA: Renewable Power Generation Costs in 2021

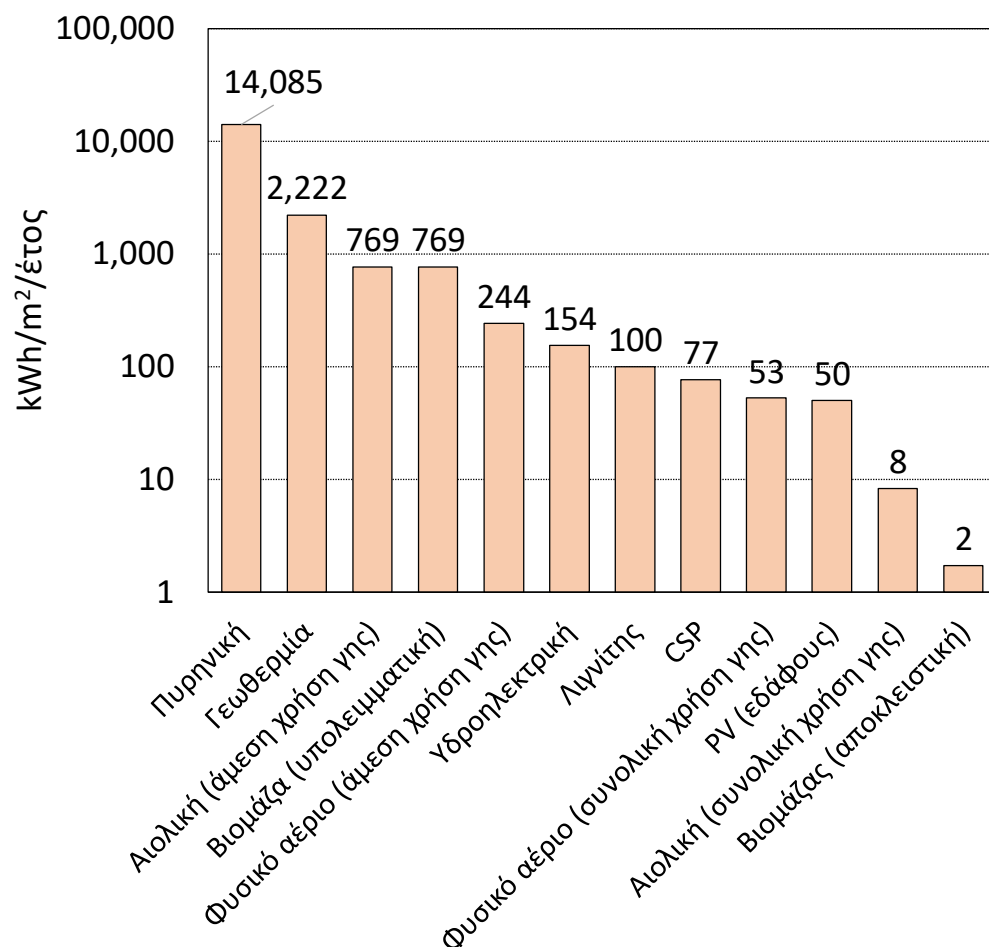
- Πριν 20 χρόνια η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ ήταν ακριβότερη από τα ορυκτά καύσιμα
- **2021: όλες οι ΑΠΕ είναι οικονομικά ανταγωνιστικές προς τις τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων**
- Σημαντική μείωση κόστους PV, αιολικής και CSP την τελευταία δεκαετία
- Χερσαία αιολική: η πιο φθηνή τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής συνολικά

ΑΠΕ και χρήση γης – Πόσες kWh το χρόνο μας δίνει 1 m² σταθμού ΑΠΕ



- ΑΠΕ: πολύ χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από πυρηνική/μονάδες φυσικού αερίου
- Περιορισμοί γεωμορφολογίας (βουνά, λίμνες, δάση, περιοχές φυσικής αξίας) και χωροταξίας (εγγύτητα σε οικισμούς, ζητήματα ιδιοκτησίας γης)
- Η χωροθέτηση συστημάτων ΑΠΕ είναι πολύ σύνθετο πρόβλημα-εξαρτάται σημαντικά από τοπικές ιδιαιτερότητες

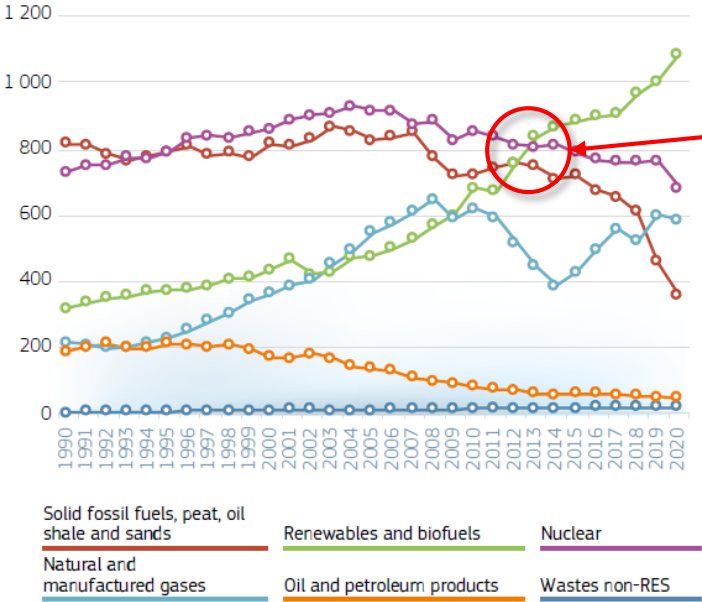
ΑΠΕ και χρήση γης – Πόσες kWh το χρόνο μας δίνει 1 m² σταθμού ΑΠΕ



- Γεωθερμία: μικρότερη χρήση γης
- Βιομάζα: σημαντική εξάρτηση χρήσης γης από προέλευση του καυσίμου
- Αιολική: διαφορά άμεσης και συνολικής χρήσης γης
- PV εδάφους: υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από αιολική εάν ληφθεί υπόψιν η απόσταση μεταξύ ανεμογεννητριών

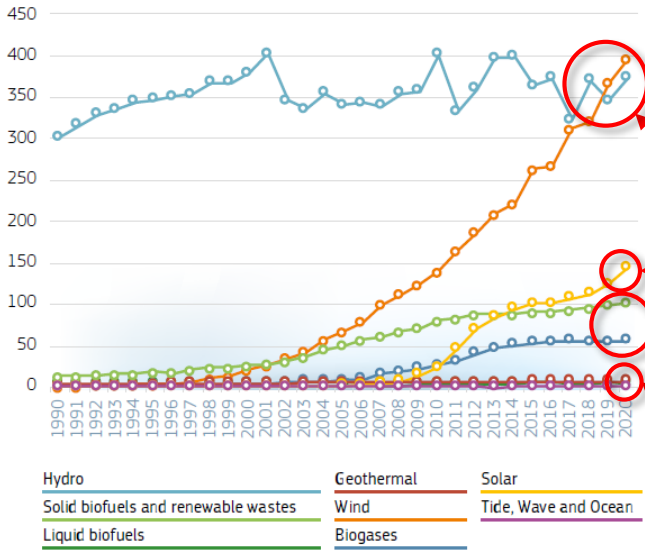
Συνεισφορά των ΑΠΕ στο μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (TWh)



Από το 2014 το μεγαλύτερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ παράγεται από ΑΠΕ (39%)

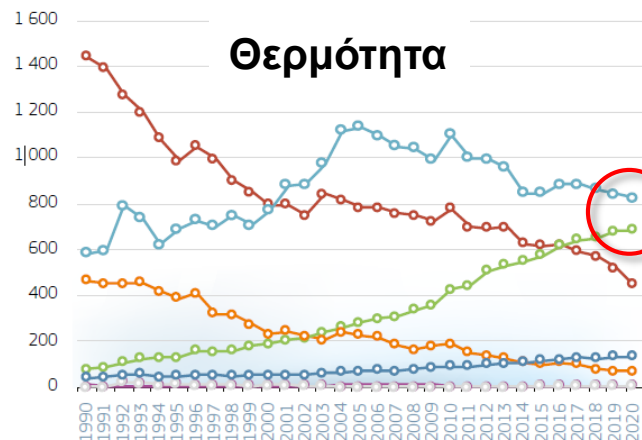
Αύξηση ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή:
οφείλεται κυρίως στην αιολική και δευτερευόντως στην ηλιακή (κυρίως PV)



- Υδροηλεκτρική: υψηλότερο ποσοστό ΑΠΕ μέχρι το 2019 (34.9%)
- Η αιολική κυριαρχεί από το 2019 (36.6%)
- Ηλιακή: 13.3% (1/3 της αιολικής)
- Βιοενέργεια (στερεή βιομάζα και βιοαέριο) 13.9%
- Γεωθερμία, κυματική, παλιρροϊκή: <1%

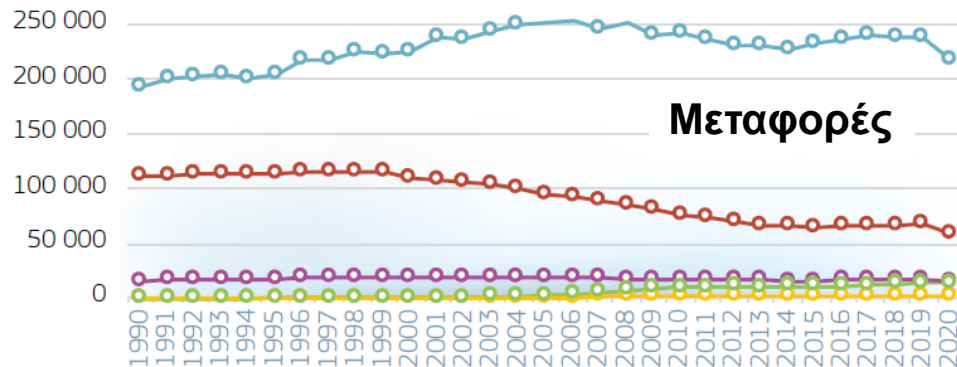
Εισαγωγή

Συνεισφορά των ΑΠΕ στην κατανάλωση θερμότητας και στις μεταφορές στην ΕΕ



- Οι ΑΠΕ αποτελούν τη δεύτερη κυριότερη πηγή θερμότητας στην ΕΕ μετά τα αέρια καύσιμα (31.6%)
- Τα επόμενα χρόνια αναμένεται οι ΑΠΕ να αποτελέσουν την κύρια πηγή θερμότητας καθώς μειώνεται η χρήση του φυσικού αερίου

Solid fossil fuels, peat, oil shale and sands
Oil and petroleum products
Natural gas and manufactured gases
Nuclear
Renewables and biofuels
Wastes non-RES
Others

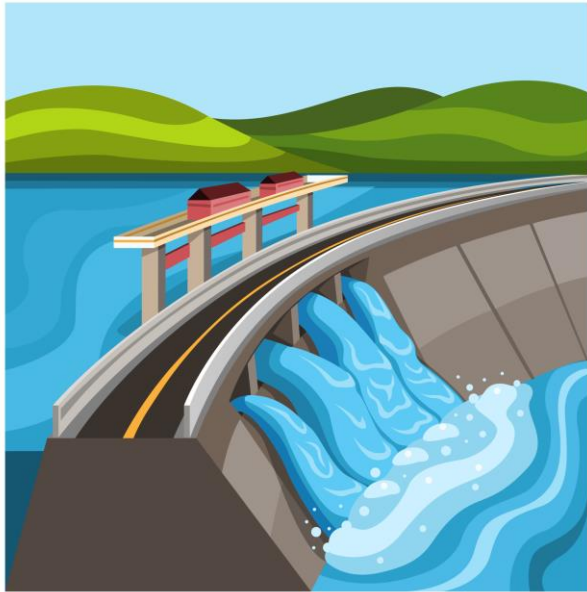


LPG
Motor Gasoline
Gas/Diesel oil
Biogasoline
Biodiesel

- Οι ΑΠΕ δεν έχουν εισχωρήσει ακόμα στις μεταφορές
- Ο ρόλος τους αναμένεται να ενισχυθεί με την διάδοση ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Υδροηλεκτρική ενέργεια

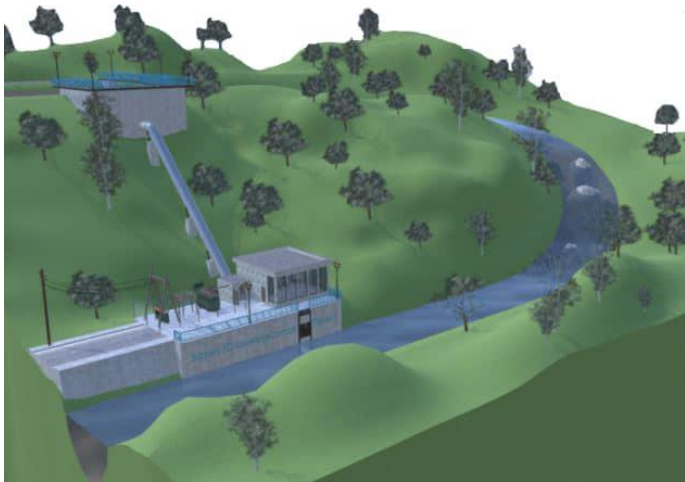
Μεγάλα υδροηλεκτρικά (με φράγμα-ταμιευτήρα) >10 MW



Πλεονεκτήματα:

- Ώριμη, αξιόπιστη τεχνολογία
- Ευελιξία (ρύθμιση ηλεκτροπαραγωγής μέσω ελέγχου παροχής σε φράγματα)
- Πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος
- Δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας με αντιστροφή της λειτουργίας μεγάλων υδροηλεκτρικών (αντλησιοταμίευση)

Μικρά υδροηλεκτρικά <1-10MW



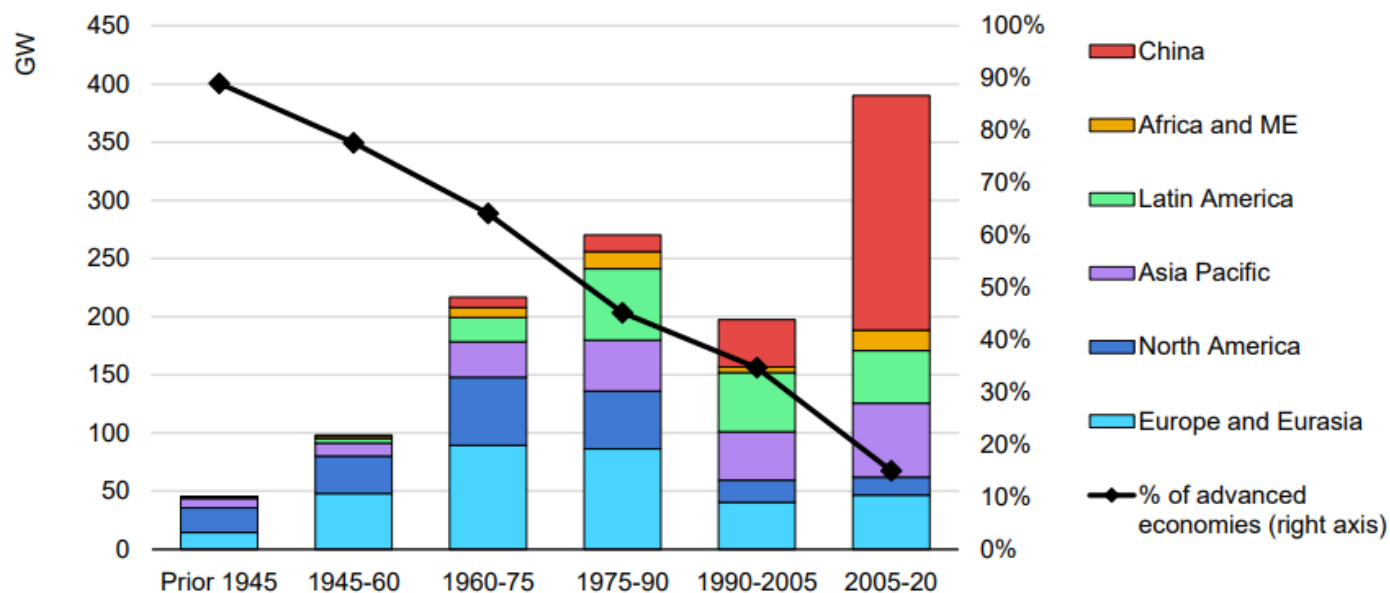
Μειονεκτήματα:

- Υψηλά κόστη επένδυσης (ταμιευτήρας)
- Μακρά διάρκεια υλοποίησης
- Διατάραξη οικοσυστημάτων ή/και οικισμών
- Περιορισμός διαθεσιμότητας υδάτινων πόρων
- Αναγκαία η ύπαρξη ποταμών με σημαντική παροχή νερού για τα μικρά και κατάλληλης γεωμορφολογίας (υψομετρική διαφορά) για τα μεγάλα έργα

Υδροηλεκτρική ενέργεια

Προοπτικές

Προσθήκη εγκατεστημένης ισχύος υδροηλεκτρικών σταθμών



IEA: Hydropower Special Market Report Analysis and forecast to 2030

- Σημαντικό μέρος του δυναμικού υδροηλεκτρικής παραγωγής χαμηλότερου κόστους επένδυσης έχει ήδη αξιοποιηθεί στην ΕΕ και στις ανεπτυγμένες χώρες (>50%)
- Η εγκατεστημένη ισχύς υδροηλεκτρικών έργων αυξάνεται με πολύ χαμηλό ρυθμό και το μερίδιο ηλεκτροπαραγωγής μειώνεται αργά στην ΕΕ
- **Ο ρόλος της υδροηλεκτρικής θα είναι περισσότερο η αποθήκευση ενέργειας παρά η ηλεκτροπαραγωγή**

Αιολική ενέργεια

Χερσαία αιολικά

93% αιολικής ηλεκτροπαραγωγής



Πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα μικρής και μεγάλης κλίμακας ισχύος (scalability)
- Μικρές ανεμογεννήτριες παρέχουν δυνατότητα αποκεντρωμένης παραγωγής
- Επιτρέπουν εναλλακτικές χρήσεις γης (αγροτική παραγωγή)

Θαλάσσια/πλωτά αιολικά

7% αιολικής ηλεκτροπαραγωγής



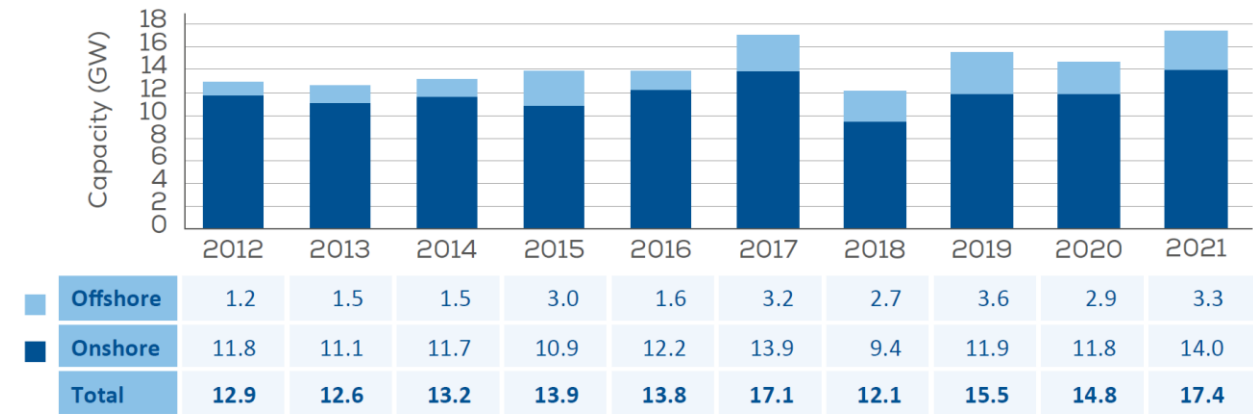
Μειονεκτήματα:

- Διακοπτόμενη/απρόβλεπτη παραγωγή
- Υψηλά κόστη επένδυσης για μεγάλες ανεμογεννήτριες υψηλής απόδοσης (κόστος μεταφοράς)
- Δυσκολίες αδειοδότησης
- Διατάραξη οικοσυστημάτων
- Οπτική/ηχητική όχληση, αναγκαιότητα τοποθέτησης μακριά από οικισμούς και εκτός περιοχών φυσικής αξίας

Αιολική ενέργεια

Προοπτικές

Annual new wind installations in Europe, 2012-21



Wind energy in Europe: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026 Source: WindEurope

- Οι αποδοτικότερες τοποθεσίες χερσαίων αιολικών σταδιακά εξαντλούνται
- Οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες αναμένεται να έχουν αυξανόμενο μερίδιο παραγωγής

Πλεονεκτήματα θαλάσσιων αιολικών:

- Μεγαλύτερη διαθεσιμότητα – αυξημένη ηλεκτροπαραγωγή
- Μειωμένη όχληση

Όμως...

- Υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης (υγρασία, άλατα, καταπόνηση από κύματα και άνεμο, θεμελίωση, διασύνδεση)
- 2023: LCOE είναι υπερδιπλάσιο των χερσαίων αιολικών

Ηλιακή ενέργεια - PV



Πλεονεκτήματα:

- Ώριμη τεχνολογία με χαμηλό κόστος επένδυσης και ηλεκτροπαραγωγής
- Μικρής κλίμακας συστήματα με δυνατότητες αποκεντρωμένης παραγωγής
- Εύκολη ενσωμάτωση εντός αστικών περιοχών (τοποθέτηση οροφές/δώματα κτηρίων)
- Εξυπηρέτηση περιοχών εκτός δικτύου (νησιά, απομακρυσμένες περιοχές)

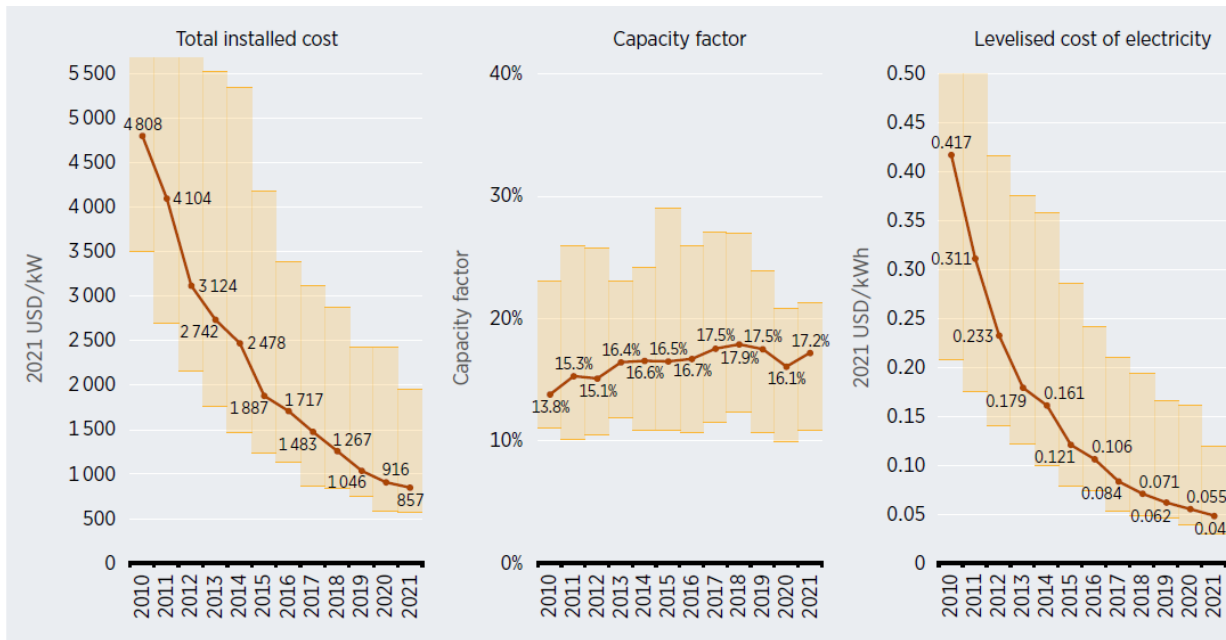
Μειονεκτήματα:

- Διακοπτόμενη παραγωγή – ετεροχρονισμός παραγωγής-ζήτησης
- PV εδάφους: αποκλεισμός εναλλακτικών χρήσεων γης (αγροτική παραγωγή) σε αντίθεση με αιολική
- Δυνητικά οπτική όχληση σε περιπτώσεις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων

Ηλιακή ενέργεια - PV

Προοπτικές

- Τα PV (μαζί με υδροηλεκτρικά) είναι η 2η φθηνότερη τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής με τη μεγαλύτερη μείωση LCOE μέσα σε 10 χρόνια



IRENA: Renewable Power Generation Costs in 2021

- Μείωση του κόστους εγκατάστασης: βελτιστοποίηση μεθόδων κατασκευής και αύξηση βαθμού απόδοσης
- Στο μέλλον αναμένεται βελτίωση της απόδοσής τους στο 22% και περαιτέρω μείωσης του κόστους

- Κρίσιμη η επιβράδυνση υποβάθμισης της απόδοσης των πάνελ και της ανακύκλωσής τους στο τέλος ζωής τους ώστε η τεχνολογία να έχει θετικό πρόσημο βιωσιμότητας

Ηλιακή ενέργεια - PV

Προοπτικές

Πλωτά PV



PV σε οροφές



Ηλιακά δέντρα



Ηλιακά parking



Ηλιακή ενέργεια - PV

Προοπτικές

Αγροφωτοβολταϊκά

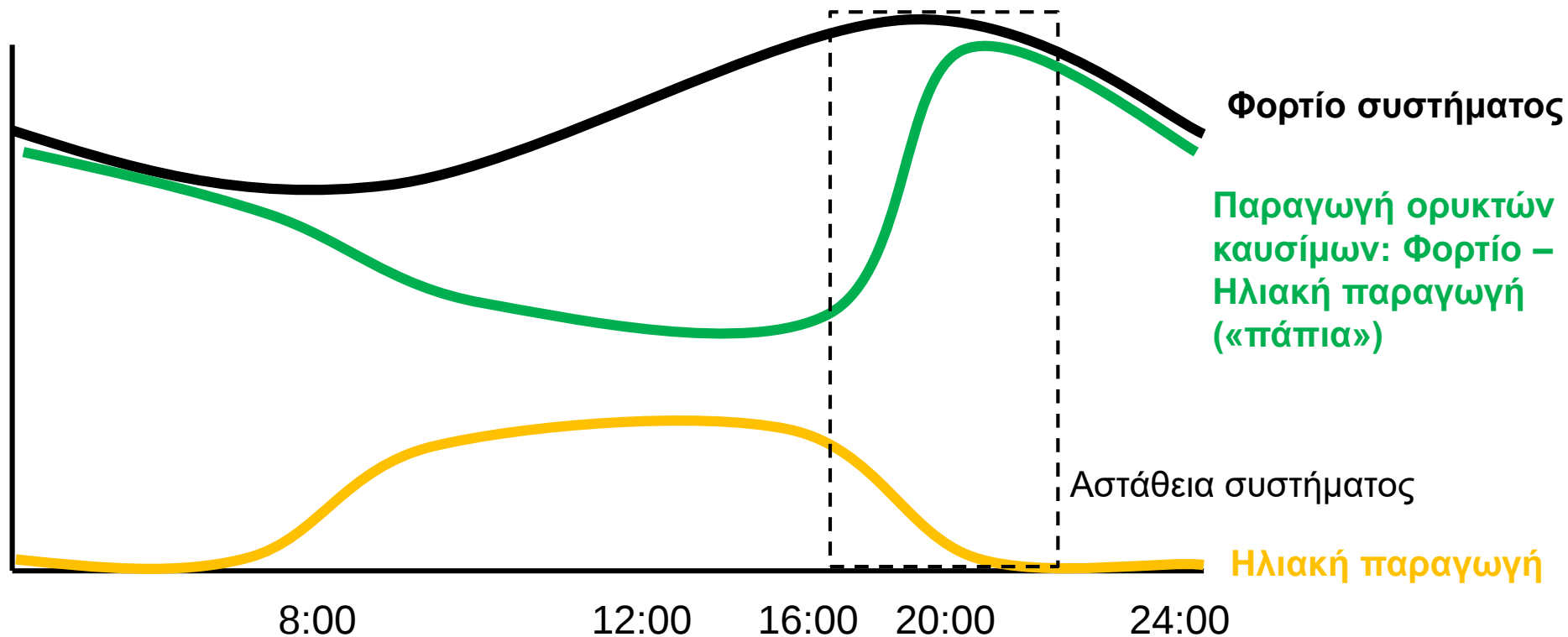


PV-T



Ηλιακή ενέργεια - PV

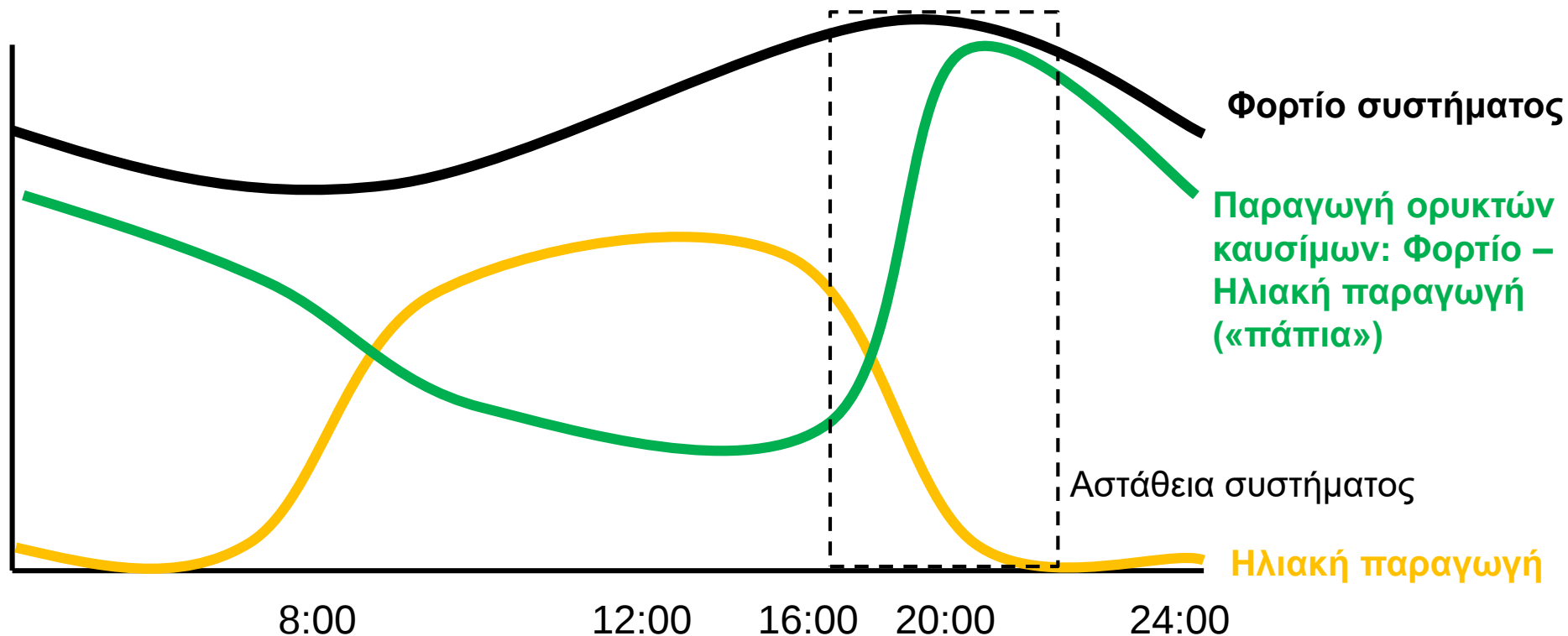
Ημερήσιος ετεροχρονισμός ηλιακής παραγωγής και φορτίου-
Η καμπύλη της πάπιας



- Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας μεγιστοποιείται τις μεσημβρινές ώρες και μειώνεται τις απογευματινές όταν το φορτίο του συστήματος μεγιστοποιείται
- Χωρίς αποθήκευση ενέργειας, η διαφορά φορτίου-ηλιακής παραγωγής πρέπει να καλυφθεί από μονάδες ορυκτών καυσίμου (πχ. φυσικού αερίου) που πρέπει να αυξήσουν σε μικρό χρονικό διάστημα την ηλεκτροπαραγωγή τους

Ηλιακή ενέργεια - PV

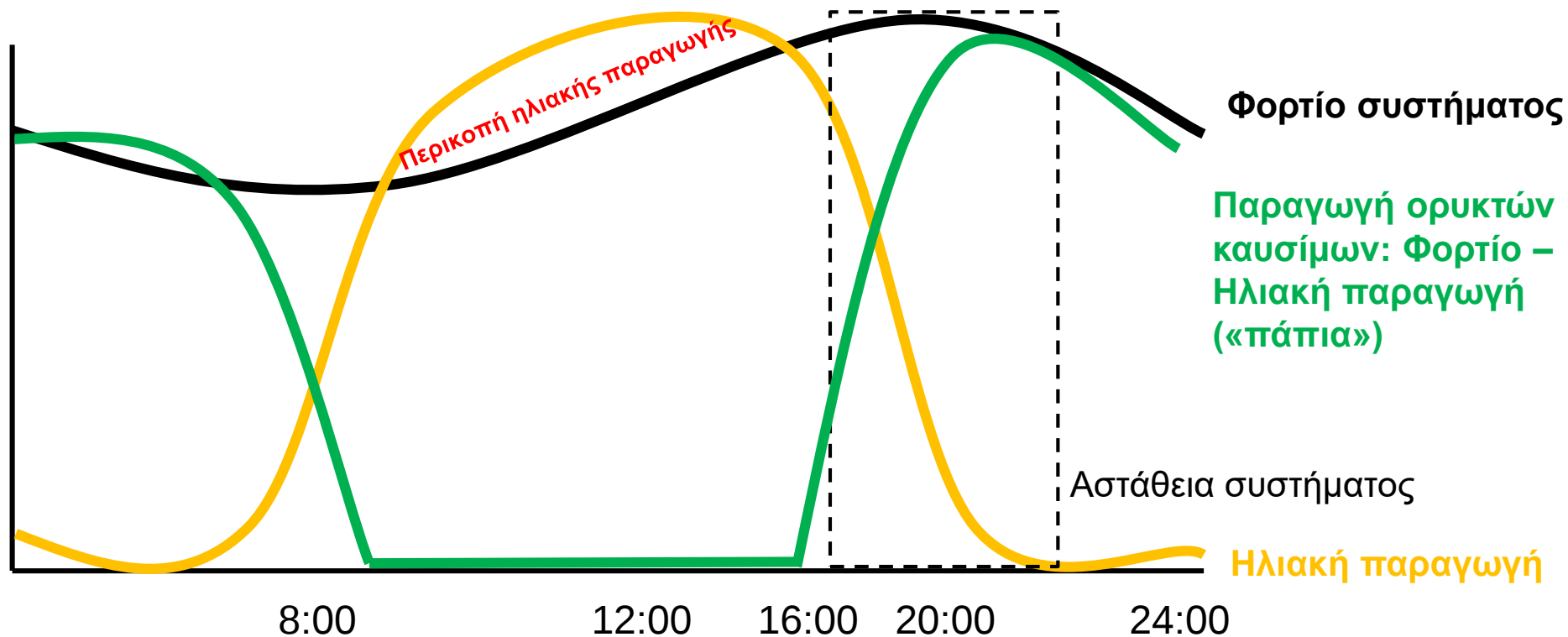
Ημερήσιος ετεροχρονισμός ηλιακής παραγωγής και φορτίου-
Η καμπύλη της πάπιας



- Το πρόβλημα επιδεινώνεται με αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος PV που είναι απαραίτητη για την επίτευξη υψηλού μεριδίου ΑΠΕ

Ηλιακή ενέργεια - PV

Ημερήσιος ετεροχρονισμός ηλιακής παραγωγής και φορτίου-
Η καμπύλη της πάπιας



- Εάν αυξηθεί η εγκατεστημένη ισχύς ηλιακών άνω ενός ορίου, τότε θα πρέπει να σταματά τελείως η λειτουργία μονάδων ορυκτών καυσίμου εντός της ημέρας και να περικόπτεται μέρος της ηλιακής παραγωγής (curtailment) με αποτέλεσμα την σπατάλη ηλιακής ενέργειας
- Είναι αδύνατη η υψηλή συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας χωρίς μεγάλες επενδύσεις σε συστήματα αποθήκευσης (μπαταρίες)

Ηλιακή ενέργεια - CSP

Σταθμός παραβολικών συλλεκτών



Πλεονεκτήματα:

- Ενσωματωμένη αποθήκευση θερμότητας/ενέργειας, μεγαλύτερη ευελιξία σχέση με PV
- Καλύτερη απόδοση, διαθεσιμότητα, υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με PV
- Δυνατότητα συμπαραγωγής
- Υβριδοποίηση με θερμικές ΑΠΕ (βιομάζα, γεωθερμία)

Σταθμός ηλιακού πύργου



Μειονεκτήματα:

- Διακοπτόμενη παραγωγή, ετεροχρονισμός παραγωγής/ζήτησης
- Βιωσιμότητα μόνο σε μεγάλες κλίμακες ισχύος: υψηλό κόστος επένδυσης & απαίτηση γης
- Προβληματική εγκατάσταση σε πυκνοκατοικημένες περιοχές με ανταγωνιστικές χρήσεις γης
- Κατανάλωση νερού για καθαρισμό συλλεκτών

Ηλιακή ενέργεια - CSP

Προοπτικές

Η τεχνολογία CSP μπορεί να γίνει ανταγωνιστική υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

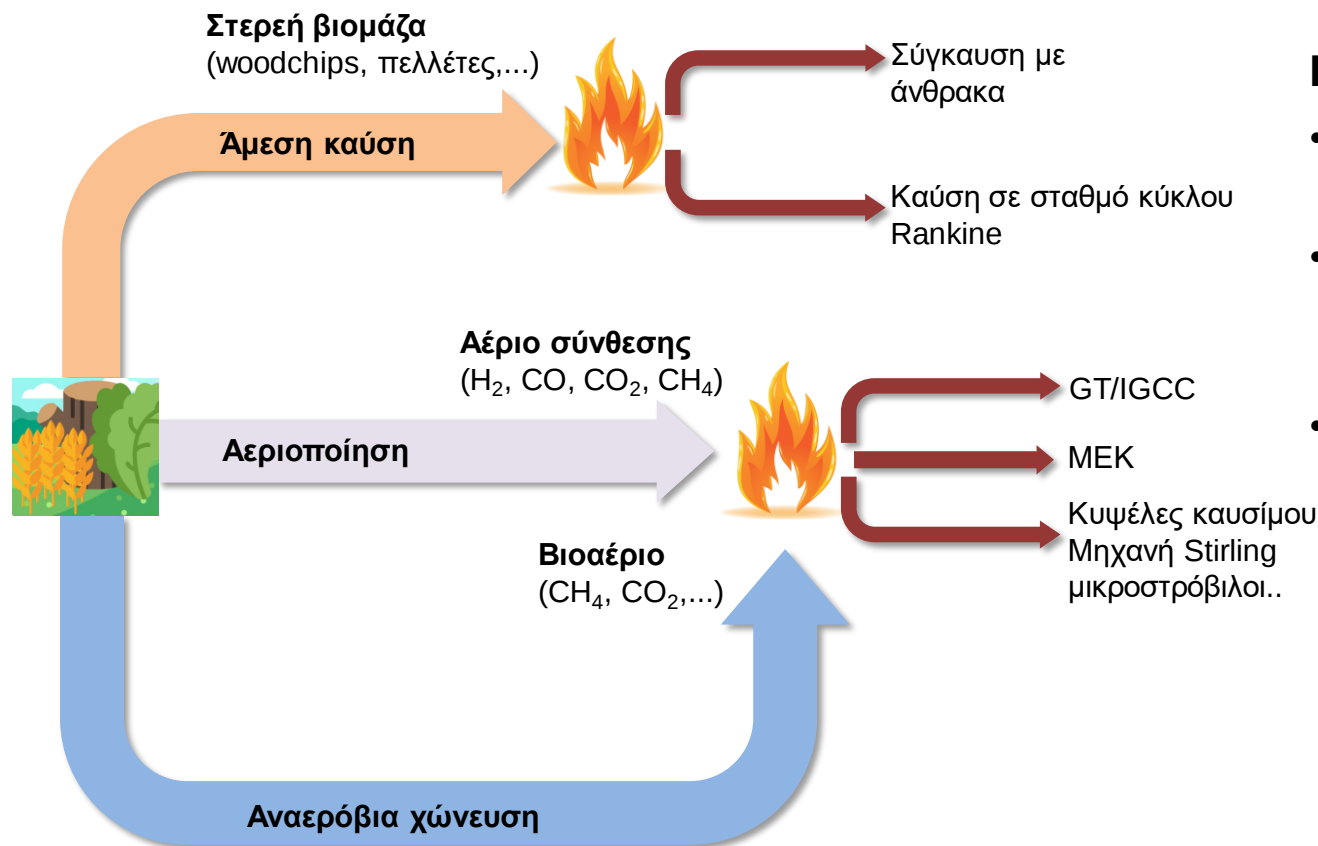
- Περιοχές με πολύ υψηλό ηλιακό δυναμικό (κυρίως Βόρεια Αφρική, Μέση Ανατολή) με μεγάλες εκτάσεις διαθέσιμης γης
- Ενσωμάτωση μακροχρόνιας αποθήκευσης θερμότητας για αύξηση ηλεκτροπαραγωγής και παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης δικτύου
- Εφαρμογές συμπαραγωγής/πολυπαραγωγής (πχ θερμοκήπια, αφαλάτωση) με επιπλέον χρηματορροές (που όμως είναι περιορισμένες)



Διασύνδεση σταθμών CSP με την Ευρώπη?

- Απαιτούνται μεγάλες επενδύσεις σε διασυνδέσεις (επίγειες και θαλάσσιες)
- Η πολιτική αστάθεια στις χώρες τις Β. Αφρικής αποτρέπει επενδύσεις
- Στο μέλλον οι χώρες Β. Αφρικής θα χρειάζονται την παραγόμενη ενέργεια για κάλυψη δικών τους αναγκών

Βιοενέργεια



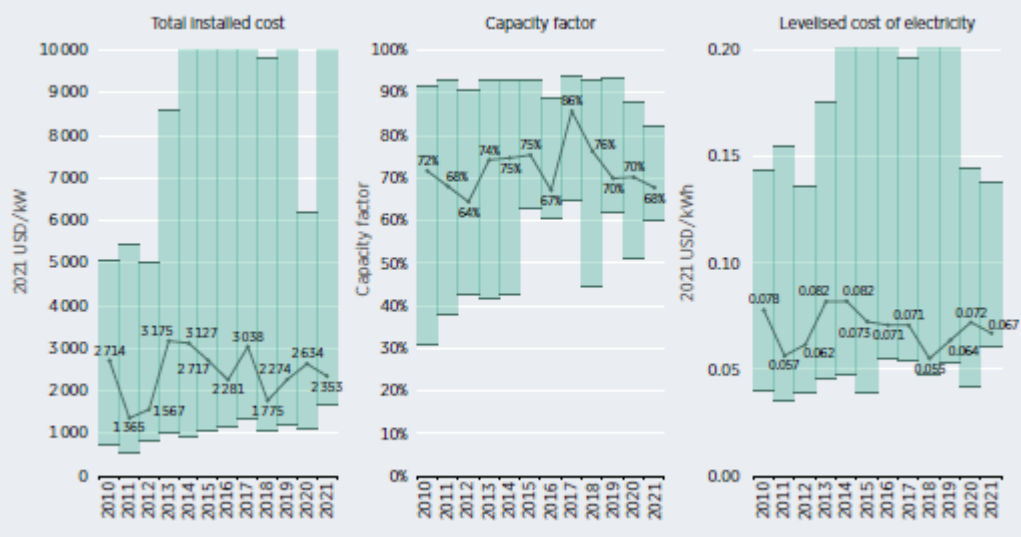
Πλεονεκτήματα:

- On-demand πηγή ενέργειας
- Πληθώρα διαφορετικών καυσίμων και μεθόδων αξιοποίησης
- Υβριδοποίηση με θερμικές ΑΠΕ (ηλιοθερμία, γεωθερμία)

Μειονεκτήματα:

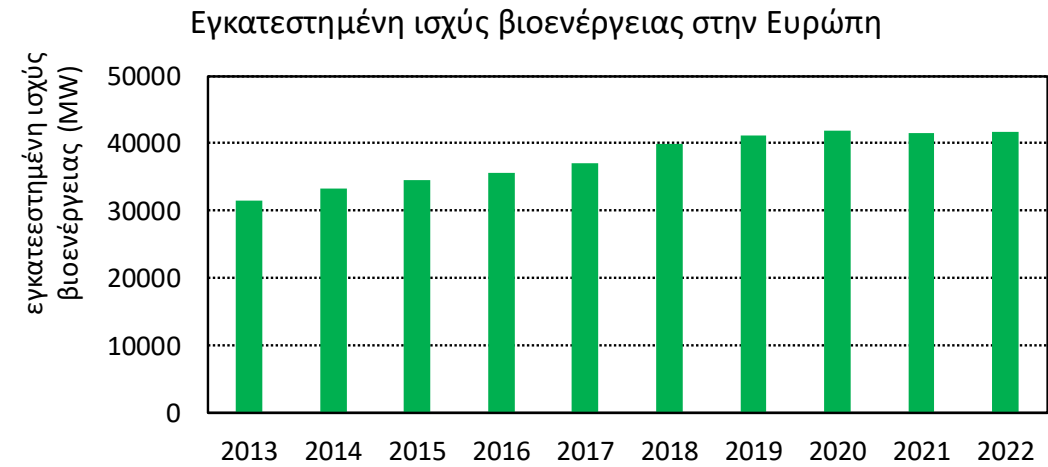
- Διαθεσιμότητα/μεταφορά/διαχείριση/κόστος καυσίμου
- Πολύ μεγάλη χρήση γης (αποκλειστικής χρήση για παραγωγή βιοκαυσίμου)
- Δεν είναι πάντα ανανεώσιμη (εξάρτηση από απόσταση και τρόπο επεξεργασίας/μεταφοράς)
- Δεν είναι 100% καθαρή (PM, NO_x, SO_x)

Προοπτικές



- Ώριμη τεχνολογία: δύσκολη περαιτέρω μείωση κόστους
- Υψηλά κόστη επένδυσης/καυσίμου
- Διαθεσιμότητα//μεταφορά/διαχείριση βιομάζας: εμπόδια στην υλοποίηση σταθμών υψηλής κλίμακας ισχύος

IRENA: Renewable Power Generation Costs in 2021

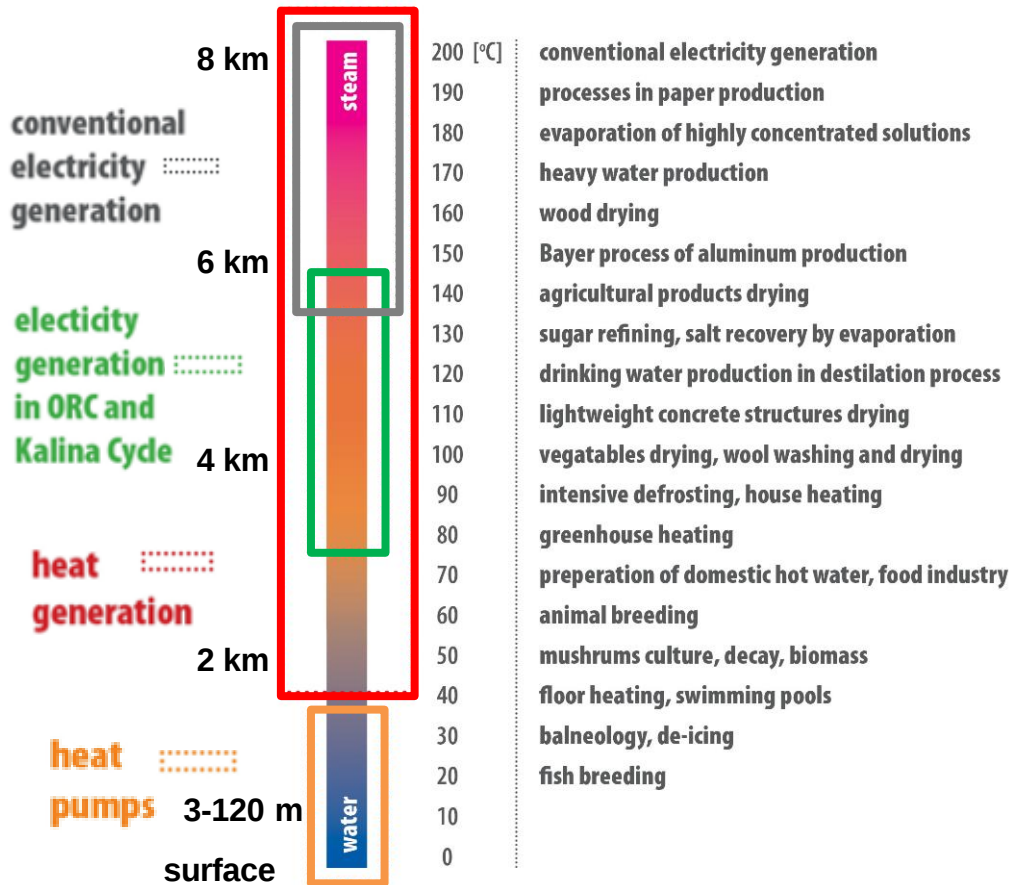


IRENA: Renewable Energy Capacity Statistics

- 2013-2018: σταθερή ανάπτυξη
- 2018-2023: στασιμότητα

Γεωθερμία

Lindal diagram



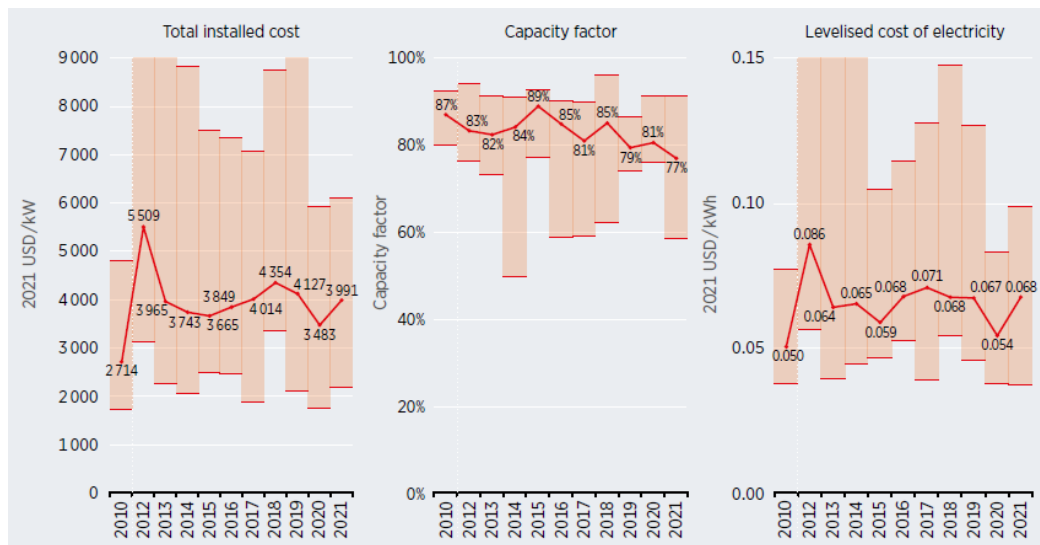
Πλεονεκτήματα:

- Υψηλό δυναμικό (200 GW παγκοσμίως)
- Υψηλή διαθεσιμότητα (24/7)
- Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα
- Κάλυψη αναγκών θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας

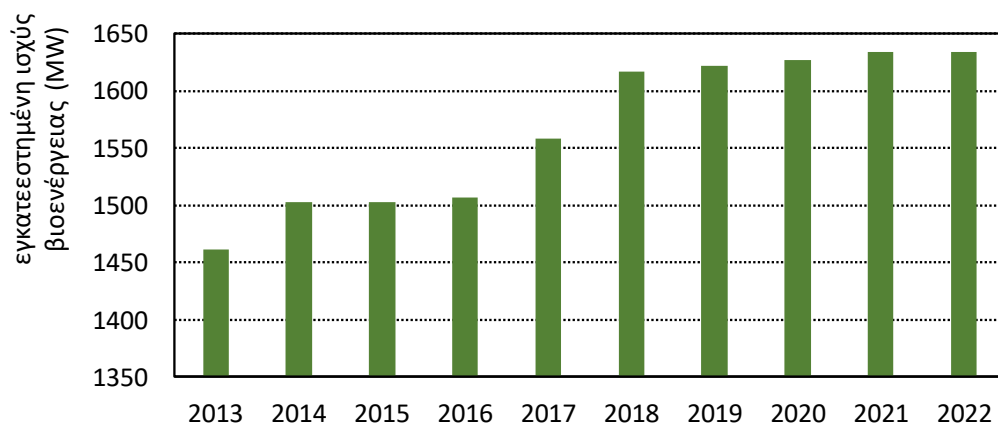
Μειονεκτήματα:

- Οι περιοχές εύκολα αξιοποιήσιμου υψηλού δυναμικού (υψηλή θερμοκρασία σε χαμηλό βάθος) είναι περιορισμένες
- Υψηλό και απρόβλεπτο κόστος επένδυσης (τεχνικές δυσκολίες και μακρά διάρκεια γεωτρήσεων/έρευνας)

Προοπτικές



Εγκατεστημένη ισχύς γεωθερμίας στην Ευρώπη



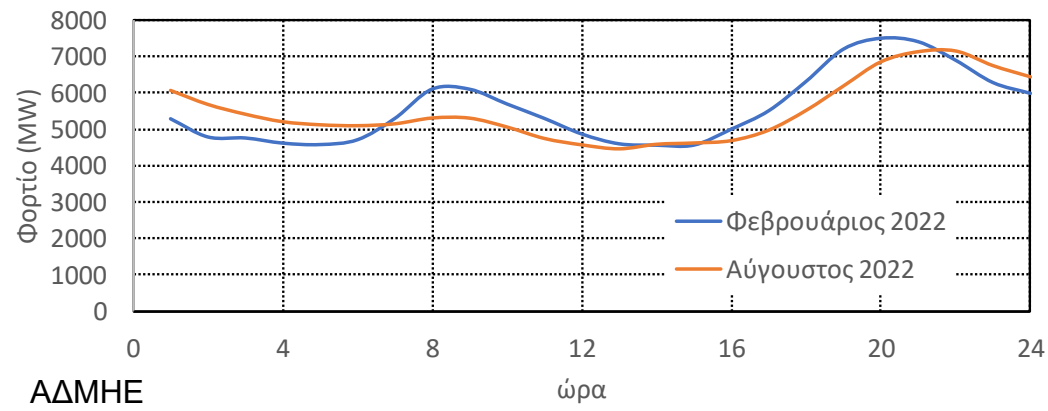
- Τα οικονομικά της τεχνολογίας είναι αμετάβλητα
- Το κόστος παραγωγής το 2023 είναι υψηλότερο από αυτό PV και ηλιακής
- Πολύ χαμηλοί ρυθμοί ανάπτυξης στην Ευρώπη αλλά και παγκόσμια
- Ανασταλτικός παράγοντας: υψηλό αρχικό κόστος για εξερεύνηση πεδίου με αντίστοιχο ρίσκο
- Περιβαλλοντικοί, κοινωνικοί και ρυθμιστικοί περιορισμοί
- **Παρά το τεράστιο δυναμικό, η γεωθερμία είναι μια «δύσκολη» ΑΠΕ**

Ελλάδα και ΑΠΕ

	2000	2005	2010	2015	2019	2020
Installed Electricity Capacity [GW]	10,9	13,3	15,3	18,9	20,5	20,8
Combustible Fuels	7,6	9,7	10,6	10,9	10,6	10,0
Nuclear	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Hydro	3,1	3,1	3,2	3,4	3,4	3,4
Wind	0,2	0,5	1,3	2,1	3,6	4,1
Solar	0,0	0,0	0,2	2,6	2,8	3,3
Geothermal	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tide, Wave and Ocean	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gross Electricity Generation, by Fuel [TWh]	53,8	60,0	57,4	51,9	48,6	48,3
Solid fossil fuels, peat and products, oil shale	34,3	35,5	30,8	22,1	12,1	6,6
Oil and petroleum products	8,9	9,2	6,1	5,7	5,6	4,7
Natural gas	5,9	8,2	9,8	9,1	14,5	19,2
Nuclear	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Renewables and biofuels	4,6	7,0	10,6	14,9	16,1	17,7
Wastes non-RES	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0

EU energy in figures Statistical Pocketbook 2022

Ωριαίο φορτίο



- Εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα: >10.8 GW
- Ωριαίο φορτίο <8 GW
- Μεριδίο ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή 17.7%

Για την αύξηση του μεριδίου ΑΠΕ απαιτείται:

- 1) Η εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ να είναι πολλαπλάσια του μέγιστου φορτίου
- 2) Αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα

Συμπεράσματα και προοπτικές

Τι μπορούμε να κάνουμε?

- Αξιοποίηση ΑΠΕ με τοπικά υψηλό δυναμικό και ευνοϊκές συνθήκες υλοποίησης
 - 1) Υδροηλεκτρική ενέργεια/αντλησιοταμίευση στην περίπτωση ευνοϊκής γεωμορφολογίας
 - 2) Υπολειμματική βιομάζα
 - 3) Εύκολα προσβάσιμες πηγές γεωθερμικής ενέργειας υψηλής θερμοκρασίας
- Ηλιοθερμικοί συλλέκτες και PV σε κτίρια και βιομηχανία: αύξηση μεριδίου ΑΠΕ και αποφόρτιση ηλεκτρικού δικτύου με ελαχιστοποίηση χρήσης γης
- Υβριδοποίηση ΑΠΕ: μεγέθυνση των πλεονεκτημάτων και εξομάλυνση των αδυναμιών κάθε μορφής ΑΠΕ (πχ. βιομάζα-ηλιοθερμία)
- **Οι ΑΠΕ από μόνες τους δεν είναι πανάκεια:** η αποκλειστική προσθήκη καινούργιων συστημάτων ΑΠΕ είναι ανεπαρκής για την αύξηση της συνεισφοράς τους στο ενεργειακό μίγμα. Απαιτούνται παράλληλα:
 - Εξοικονόμηση ενέργειας-αύξηση βαθμού απόδοσης
 - Υλοποίηση τεχνολογιών αποθήκευσης σε μεγάλη κλίμακα
 - Επέκταση διασυνδέσεων
 - Έξυπνη διαχείριση δικτύου