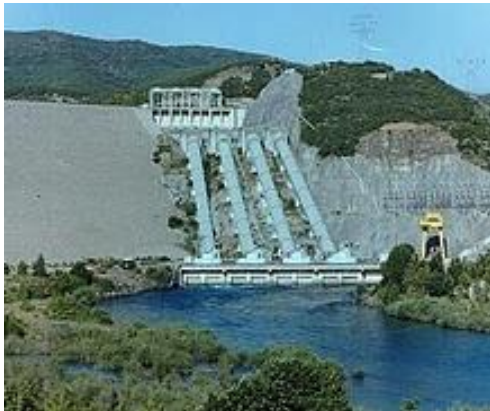


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1^ο και 5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Ηλεκτρική ενέργεια: παραγωγή, μεταφορά, κατανάλωση



Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2024-25

Βασικές αρχές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

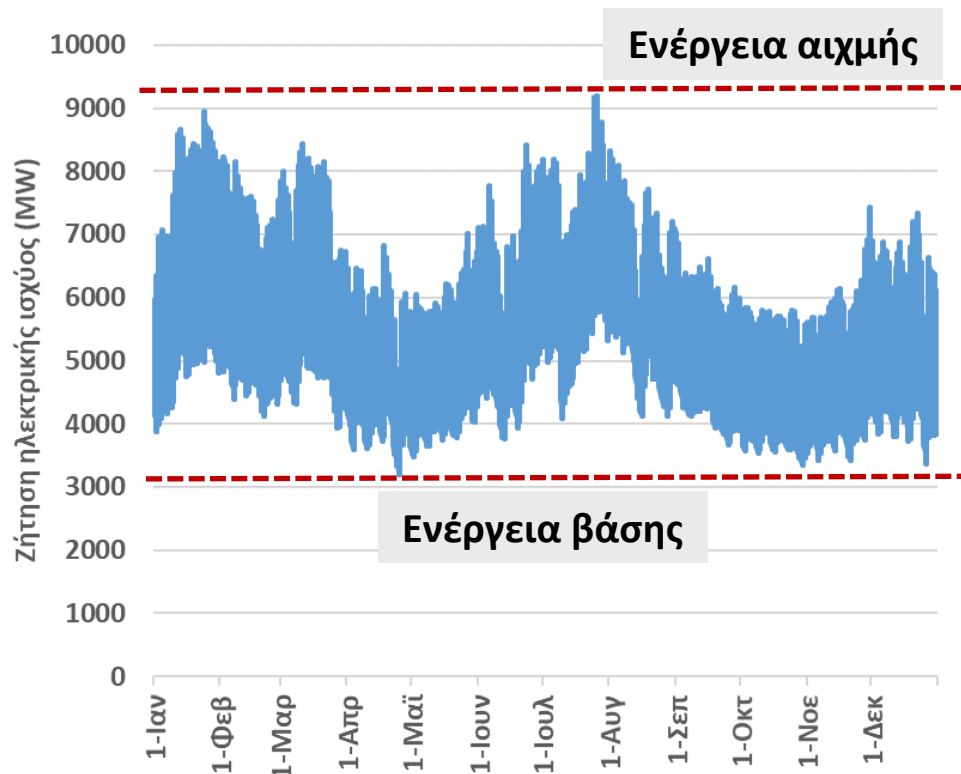
- Μια από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις της ύλης είναι η **ηλεκτρομαγνητική**, μέσω του **ηλεκτρικού φορτίου** (ιδιότητα υποατομικών σωματιδίων).
- Μια ροή ηλεκτρικού φορτίου αποτελεί το **ηλεκτρικό ρεύμα**, που διακρίνεται σε:
 - **συνεχές (D/C)**, το οποίο έχει σταθερή κατεύθυνση
 - **εναλλασσόμενο (A/C)**, το οποίο αλλάζει συνεχώς κατεύθυνση.
- Η συνήθης διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος βασίζεται στο φαινόμενο της **ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής** (νόμος Faraday, 1831) → περιστροφή πηνίου εντός μαγνητικού πεδίου
- Περιστροφή πηνίου → **μηχανικό έργο από εξωτερική πηγή ενέργειας**:
 - Συστήματα **καύσης**: παραγωγή ατμού, ο οποίος κινεί ατμοστρόβιλο (π.χ., ορυκτά καύσιμα, βιομάζα, γεωθερμία)
 - Συστήματα αξιοποίησης **ρευμάτων νερού και ανέμου**: μετατροπή κινητικής ενέργειας ρευστού (π.χ., αιολική ενέργεια)
 - **Υδροηλεκτρικές μονάδες**: μετατροπή υδροδυναμικής ενέργειας (αποθηκευμένο νερό σε μια υψομετρική διαφορά από τον σταθμό παραγωγής) σε υδραυλική (= κινητική ενέργεια και ενέργεια λόγω πίεσης)
- Εξαιρέσεις: Φ/Β μονάδες, που βασίζονται στο **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**, και διάφορες πειραματικές μορφές θαλάσσιας ενέργειας.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας – Ενεργειακό μίγμα

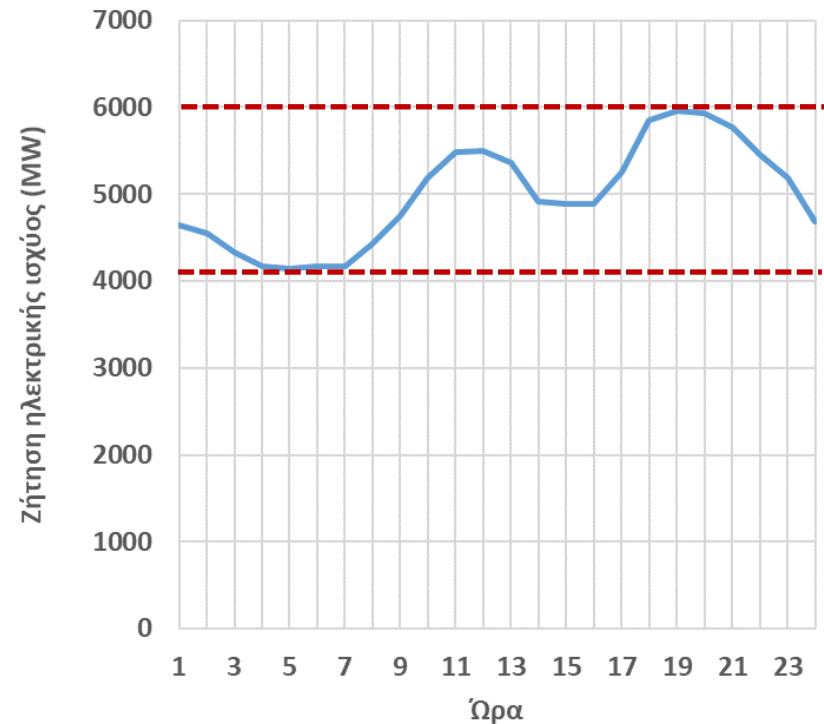
- **Πλεονεκτήματα** ηλεκτρικής ενέργειας:
 - Ευκολία μεταφοράς της από τις πηγές στην κατανάλωση
 - Ευκολία μετατροπής της σε άλλες μορφές ενέργειας (θερμότητα, ακτινοβολία, μηχανική ενέργεια, χημική ενέργεια).
- **Μειονέκτημα:** Μη δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, παρά μόνο σε πολύ μικρή κλίμακα → συγχρονισμός παραγωγής και κατανάλωσης (το δίκτυο μπορεί να απορροφήσει αποκλίσεις της τάξης του 1-2%)
- **Ενεργειακό μίγμα:** Σύνολο μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενταγμένων σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα διαχείρισης, μεταφοράς και διανομής της
- Βασικά στρατηγικά ζητήματα στην κατάρτιση ενός ενεργειακού μίγματος:
 - Χρονική διακύμανση ζήτησης, σε όλες τις χρονικές κλίμακες
 - Ευελιξία προσαρμογής στις μεταβολές των φορτίων
 - Περιορισμοί δικτύου (μεταφορά, διανομή)
 - Ασφάλεια και αξιοπιστία συστήματος
 - Ενεργειακή πολιτική – γεωπολιτική (αυτάρκεια, διακρατικές συμφωνίες)
- Χαρακτηριστικά ενεργειακού μίγματος:
 - Αξιοποίηση πηγών ενέργειας με διαφορετικά χαρακτηριστικά
 - Κατάτμηση της συνολικής ισχύος κάθε μονάδας παραγωγής

Διαμόρφωση ενεργειακού μίγματος

- **Ενέργεια που απαιτείται σε ετήσια βάση** → ελάχιστη απαίτηση σε συνολική παραγωγή ενέργειας από τις διάφορες συνιστώσες του συστήματος
- **Αιχμή ζήτησης φορτίου** → ελάχιστη απαίτηση σε συνολική εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος παραγωγής (μονάδες αιχμής)
- **Κατώφλι ζήτησης φορτίου** → ελάχιστη απαίτηση σε ισχύ που θα πρέπει να παρέχεται αδιάλειπτα από το σύστημα (μονάδες βάσης)



Ωριαία ζήτηση ισχύος στην Ελλάδα το έτος 2022



Ωριαία ζήτηση ισχύος την 1/1/2022

Χαρακτηριστικά διαφόρων πηγών ενέργειας

- **Ελεγχόμενη ή όχι παραγωγή:**
 - Ελεγχόμενη παραγωγή: ορυκτά καύσιμα (συμβατικά και βιομάζα), μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα (μέσω της αποθήκευσης του νερού)
 - Μη ελεγχόμενη παραγωγή: αιολικές και Φ/Β μονάδες, καθώς και υδροηλεκτρικά έργα χωρίς αποθήκευση (άμεση μετατροπή ενέργειας που παρέχεται από τυχαία μεταβαλλόμενες υδρομετεωρολογικές διεργασίες)
- **Χρόνος ενεργοποίησης και μεταβολής του φορτίου ελεγχόμενων πηγών:**
 - Βραδεία απόκριση: λιγνιτικές μονάδες (αρκετές ώρες)
 - Ενδιάμεση απόκριση: φυσικό αέριο
 - Ταχεία απόκριση: υδροηλεκτρικοί σταθμοί (λίγα λεπτά)
- **Διακυμάνσεις παραγωγής ενέργειας σε μη ελεγχόμενες ΑΠΕ:**
 - Αιολική ενέργεια: έντονες διακυμάνσεις ακόμα και σε μικρές χρονικές κλίμακες
 - Λοιπές ΑΠΕ: ηπιότερες διακυμάνσεις
- **Πρακτικός χειρισμός στη διαμόρφωση του ενεργειακού μίγματος:**
 - «Υπερδιαστασιολόγηση», ώστε η συνολική εγκατεστημένη ισχύς να υπερβαίνει εμφανώς την αντίστοιχη απαιτούμενη
 - Χωρική διασπορά πηγών, ώστε να εξομαλύνεται η υδροκλιματική μεταβλητότητα
 - Διασυνδέσεις με άλλα δίκτυα

Η έννοια του συντελεστή δυναμικότητας (capacity factor, αναφέρεται και ως συντελεστής φορτίου)

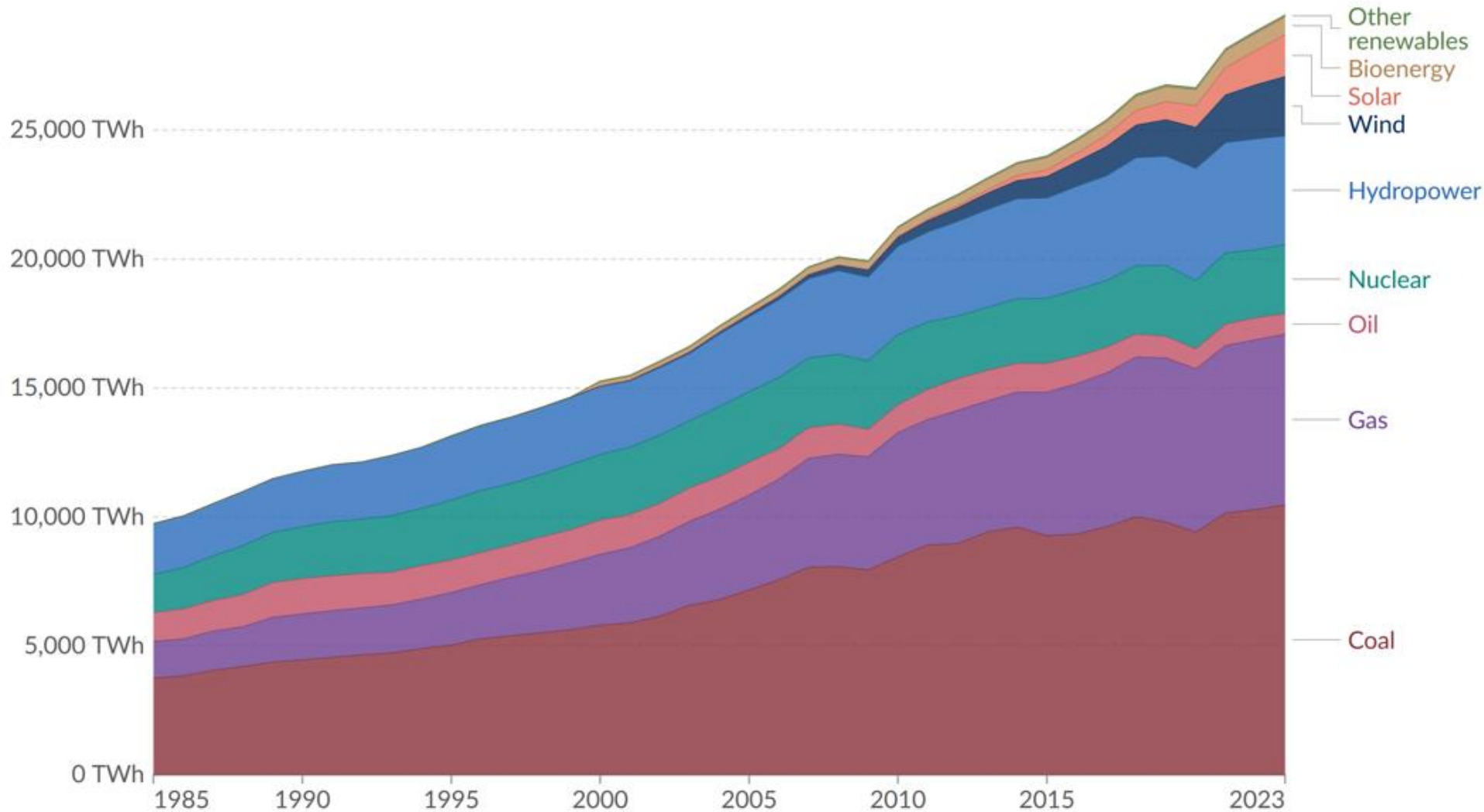
- **Ορισμός:** Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη θεωρητικά μέγιστη που μπορεί να παραχθεί από ένα έργο (ή σύστημα έργων) συνολικής ισχύος P_{max} σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, T :

$$CF = \frac{E}{P_{max} T} = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_{max} T}$$

- Κατά κανόνα αναφέρεται στην **ετήσια κλίμακα**, για την οποία η θεωρητικά μέγιστη παραγωγή ενέργειας είναι ίση με την μέγιστη (ονομαστική) ισχύ του έργου επί τις ώρες του έτους ($T = 8760$ h). Με τον τρόπο αυτό, συνιστά την **ταυτότητα του έργου**.
- Η τιμή του CF αποτελεί συχνά (αλλά όχι πάντα) και έναν μακροσκοπικό δείκτη της **οικονομικής απόδοσης** του έργου, καθώς ο όρος της παραγόμενης ενέργειας και των αντίστοιχων εσόδων από αυτή αντιπαραβάλλεται με την ισχύ του συστήματος και τα σχετικά με αυτή κόστη (κατασκευή υποδομών, αγορά και συντήρηση εξοπλισμού).
- **Παράδειγμα:** Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων της Ελλάδας ανέρχεται σε 3.17 GW, ενώ η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2022 ανήλθε σε 4.0 TWh. Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι:

$$CF = \frac{4.0 \times 1000}{3.17 \times 8760} = 14.4\%$$

Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (1985-2023)

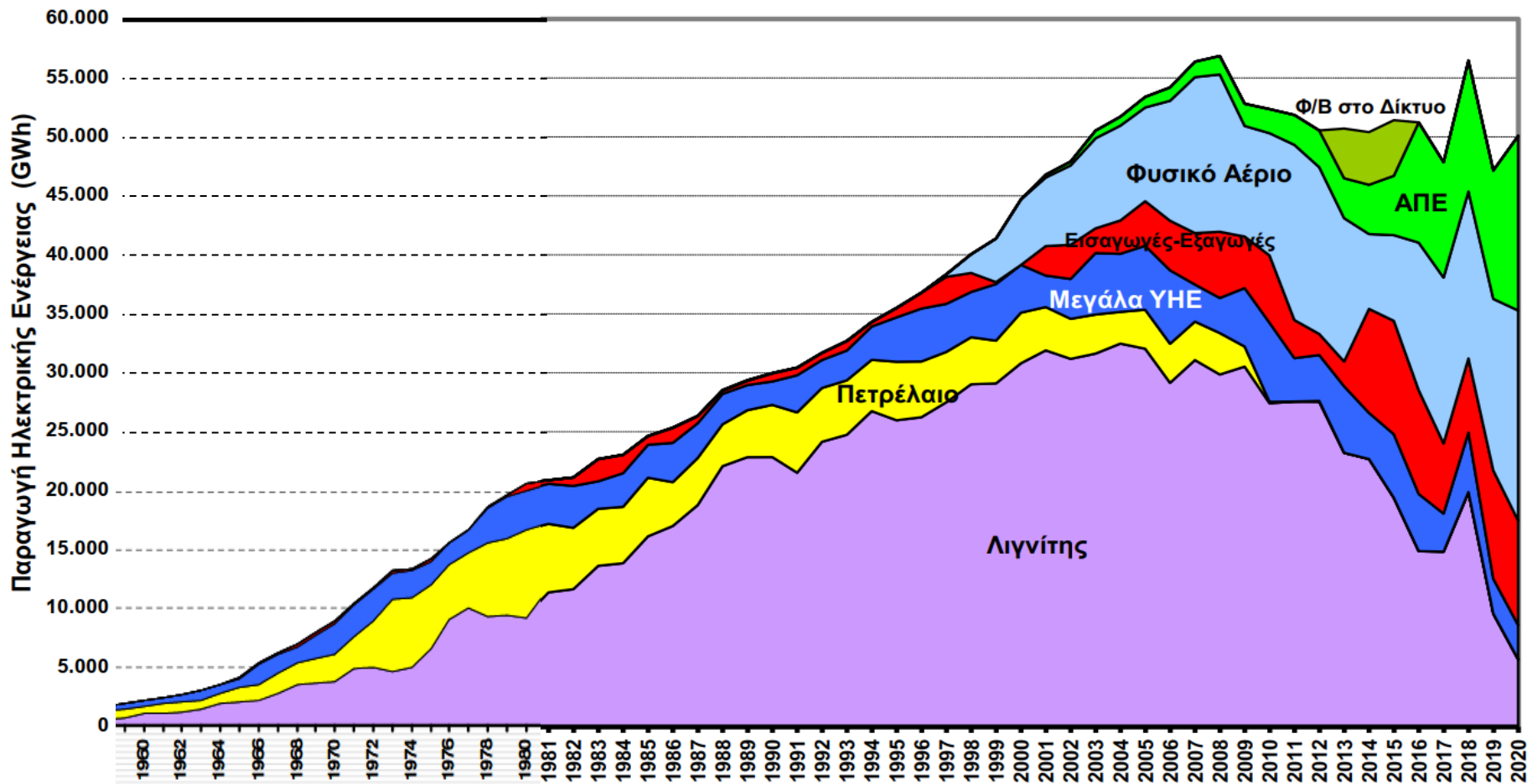


Data source: Ember (2024); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)

Note: "Other renewables" include waste, geothermal, wave, and tidal.

OurWorldinData.org/energy | CC BY

Διαχρονική εξέλιξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα – Διασυνδεδεμένο σύστημα (1957-2020)

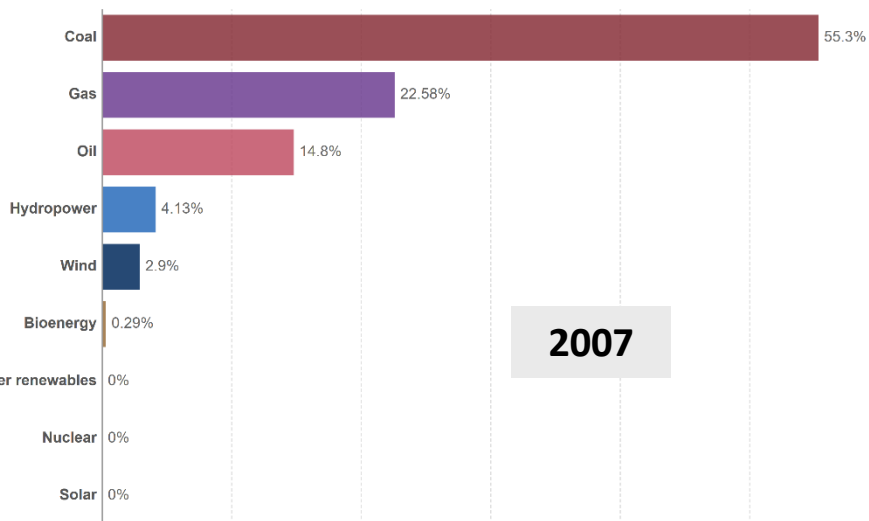


Πηγή: Στεφανάκος, Ι., Ο ρόλος των υδροηλεκτρικών έργων στο ενεργειακό σύστημα της χώρας, Ημερίδα: *Ενεργειακή αυτοδυναμία της Ελλάδας στα πλαίσια της ευρωπαϊκής πολιτικής για την ενέργεια*, Ακαδημία Αθηνών, 2021.

Εξέλιξη ενεργειακού μίγματος Ελλάδας (2007-2022)

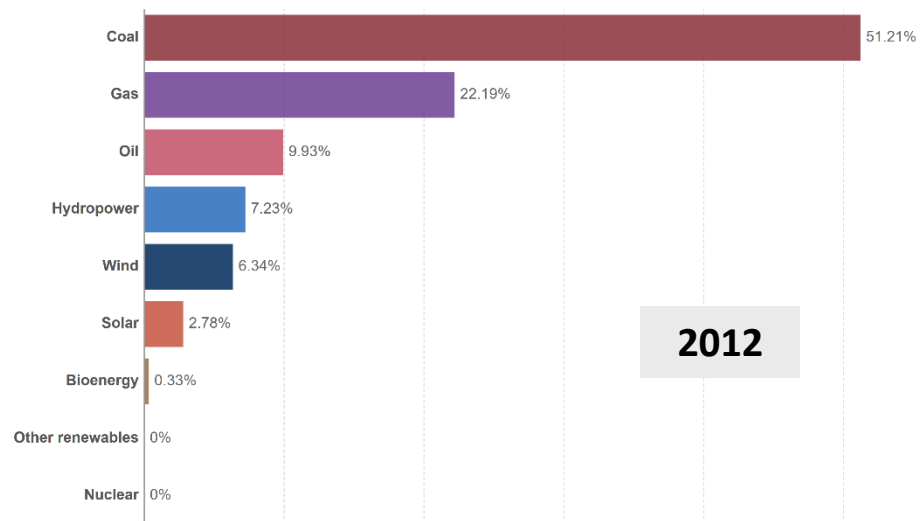
Share of electricity production by source, Greece, 2007

Our World in Data



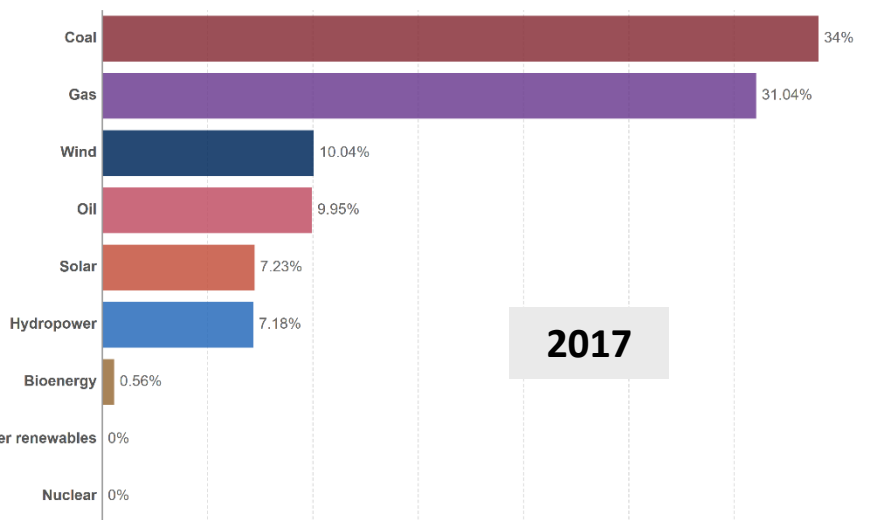
Share of electricity production by source, Greece, 2012

Our World in Data



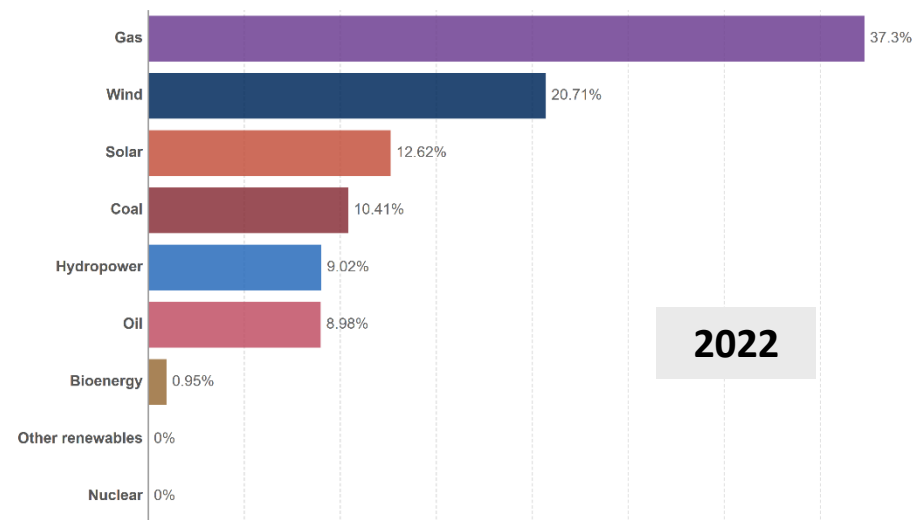
Share of electricity production by source, Greece, 2017

Our World in Data



Share of electricity production by source, Greece, 2022

Our World in Data



Μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (έτος 2023)

- Συνολική εγκατεστημένη ισχύς: 23.15 GW (21.46 GW το 2022)
- Συνολική ζήτηση ενέργειας: 50.69 TWh (52.40 TWh το 2021)
 - Εγχώρια παραγωγή: 44.57 TWh
 - Ισοζύγιο διασυνδέσεων: 4.91 TWh
- Ελάχιστη ζητούμενη ισχύς: 3.37 GW (17/4/2023 21:00)
- Μέγιστη ζητούμενη ισχύς: 10.39 GW (26/7/2023 15:00)
- Ρεκόρ ισχύος: 10.72 GW (5/8/2021 15:00)

	Ισχύς (GW)	Ποσοστό	Παραγωγή (GWh)	Συντ. δυναμ.
Φωτοβολταϊκά (Φ/Β)	7 088	30.6%	10 582	17.0%
Φυσικό αέριο	4 935	21.3%	14 631	33.8%
Αιολικά	5 226	22.6%	9 689	21.2%
Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα (ταμιευτήρες)	3 171	13.7%	4 047	14.6%
Λιγνίτης (απόσυρση έως το 2030)	2 061	8.9%	4 513	25.0%
ΜΥΗΣ (υδροηλεκτρικοί σταθμοί < 15 MW)	281	1.2%	125	5.1%
Συμπ. ηλεκτρισμού-θερμότητας (ΣΗΘΥΑ)	256	1.1%	965	43.1%
Βιομάζα	131	0.6%	0	0.0%
Σύνολο	23 149		44 552	22.0%

Πηγή: ΑΔΜΗΕ, Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας – Ιανουάριος 2024, 2^η έκδοση, μετά από επεξεργασία

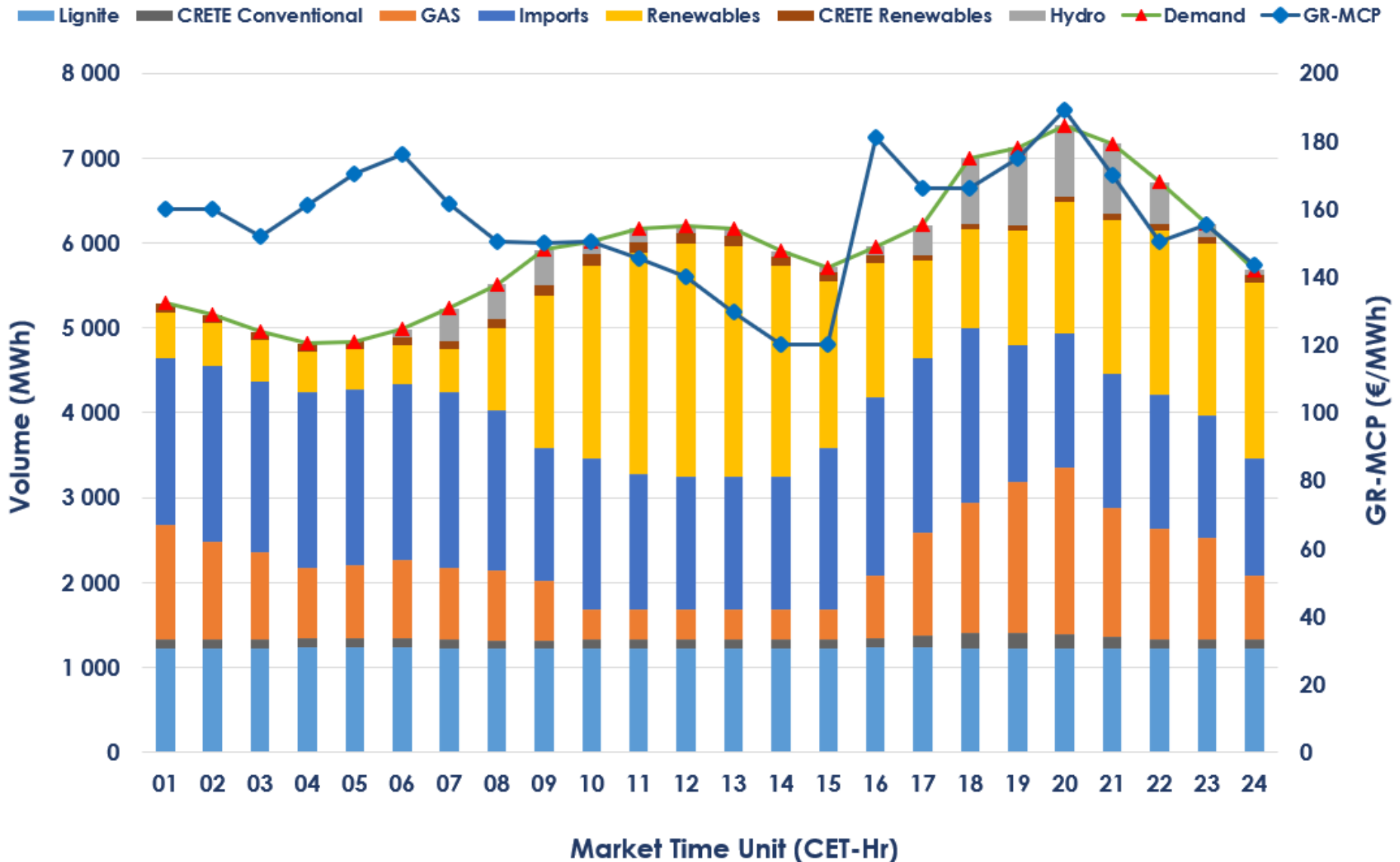
Ανάλυση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (έτος 2023)

	Παραγωγή (GWh)	Ποσοστό	Διαφορά 2022 (GWh)
Λιγνίτης	4 513	8.9%	-1 072
Φυσικό αέριο	14 631	28.9%	-3 318
Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα	4 047	8.0%	42
Λοιπά καύσιμα	16	0.0%	-11
Σύνολο από συμβατικές μονάδες	23 207	45.8%	-4 360
Φωτοβολταϊκά συστήματος	1 055	2.1%	449
Αιολικά συστήματος	9 689	19.1%	185
Μικρά υδροηλεκτρικά έργα	125	0.2%	0
Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού-θερμότητας	965	1.9%	-91
Παραγωγή στο δίκτυο (ΑΠΕ, κυρίως Φ/Β)	9 527	18.8%	1 164
Διασύνδεση Κρήτης (ΑΠΕ)	11	0.0%	-9
Βιοαέριο	2	0.0%	
Σύνολο από ΑΠΕ	21 373	42.2%	1 699
Εισαγωγές	8 152		401
Εξαγωγές	-3 240		1 064
Ισοζύγιο διασυνδέσεων	4 912	9.7%	1 464
Σύνολο	49 492		-1 196

Διαχείριση ηλεκτρικής ενέργειας

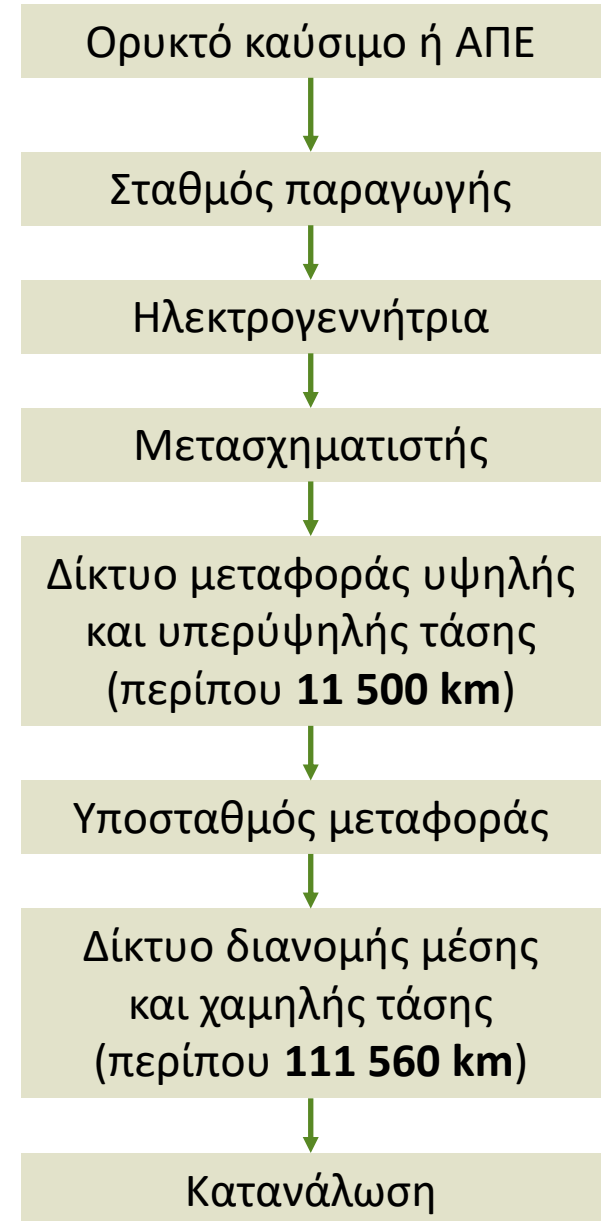
- **Βασική λειτουργική απαίτηση:** Προσαρμογή της παραγωγής ενέργειας από τις διάφορες συνιστώσες του ενεργειακού μίγματος, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, στη ζήτηση
- Η διαχείριση της ηλεκτροπαραγωγής γίνεται σε διάφορες **χρονικές κλίμακες**:
 - Προγραμματισμός επόμενης ημέρας (day-ahead), ανά ώρα (24 προβλέψεις ζήτησης και παραγωγής από τις επιμέρους πηγές)
 - Προσαρμογή σε κλίμακα επόμενης ώρας
 - Προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο
- Χαρακτηριστικά πηγών ενέργειας, που σχετίζονται με την διαχείριση της παραγωγής:
 - Μεταβλητότητα παραγωγής (ΑΠΕ → εξαρτώμενες από στοχαστικές διεργασίες)
 - Χρόνος ενεργοποίησης/απόκρισης
- Διαχείριση **πλεονασμάτων**:
 - Απόρριψη φορτίου – καταστροφή ενέργειας
 - Εξαγωγές
 - Αποθήκευση ενέργειας (μπαταρίες, αντλησιοταμίευση)
- Διαχείριση **ελλειμμάτων**
 - Διατήρηση εφεδρικών πηγών σε λειτουργία
 - Εισαγωγές

Παράδειγμα ωριαίας κατανομής ηλεκτροπαραγωγής και τιμών ενέργειας στο ΕΧΕ (12/2/2023)

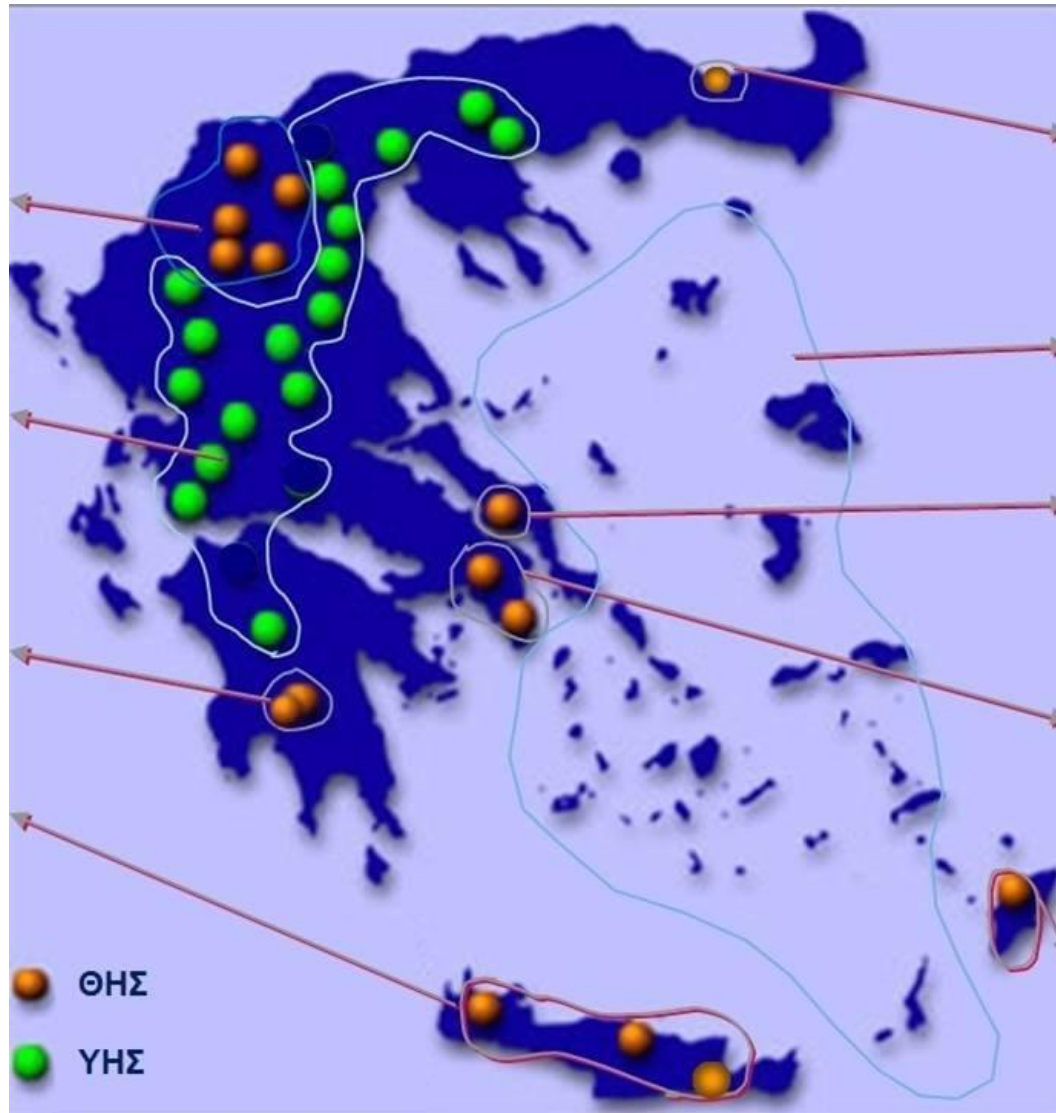


Βασικές αρχές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

- Στους σταθμούς παραγωγής παράγεται ρεύμα από την ηλεκτρογεννήτρια με μια ορισμένη τιμή τάσης (66 kV).
- Μέσω μετασχηματιστών, η τάση ανυψώνεται σε υψηλές (150 kV) και υπερυψηλές τιμές (400 kV), ώστε να **μειωθούν οι απώλειες ισχύος** που αναπτύσσονται όταν οι αποστάσεις μεταφοράς είναι μεγάλες.
- Μέσω του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (υψηλής και υπερυψηλής τάσης), η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται προς τους **υποσταθμούς**.
- Στους υποσταθμούς, η τιμή της τάσης υποβιβάζεται στη ζητούμενη του δικτύου διανομής, που περιλαμβάνει:
 - το **δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20 kV)** που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους διανομής.
 - το **δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380 V)** που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.
- Οι μικρότερης κλίμακες μονάδες ενέργειας (π.χ. Φ/Β) συνδέονται στο δίκτυο μεσαίας ή και χαμηλής τάσης, οπότε έχουν τοπική μόνο εμβέλεια.



Γεωγραφική κατανομή σταθμών παραγωγής της ΔΕΗ ΑΕ



**Κεντρική & Δυτική
Μακεδονία**
12 ΑΗΣ, 3 401 MW

**Υδροηλεκτρικοί
σταθμοί**
16 ΥΗΣ, 3 152 MW

Μεγαλόπολη
2 ΑΗΣ, 511 MW
1 ΘΗΣ, 800 MW

Κρήτη
3 ΘΗΣ, 813 MW

Κομοτηνή
1 ΑΗΣ, 485 MW

**Λοιπά μη Διασυν-
δεδεμένα Νησιά**
13 ΑΣΠ & 19 ΤΣΠ,
714 MW

Εύβοια
1 ΘΗΣ, 420 MW

Αττική
2 ΘΗΣ, 930 MW

Ρόδος
1 ΘΗΣ, 233 MW

Διασυνδεδεμένο σύστημα



Ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

- Κύριο χαρακτηριστικό του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος ήταν η μεγάλη συγκέντρωση σταθμών παραγωγής στο βόρειο και δυτικό τμήμα της χώρας (λιγνιτικές μονάδες και μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα), ενώ το κύριο κέντρο της κατανάλωσης βρίσκεται στο Νότο.
- Δεδομένου ότι και οι διεθνείς διασυνδέσεις με Βουλγαρία και ΠΓΔΜ είναι στο Βορρά, υπήρχε μεγάλη γεωγραφική ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίων.
- Η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ισχύος κατά τον άξονα Βορρά – Νότου εξυπηρετούνταν κυρίως από έναν κεντρικό κορμό ισχύος 400 kV, αποτελούμενο από τρεις γραμμές μεταφοράς, διπλού κυκλώματος.
- Η μεγάλη γεωγραφική ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης είχε οδηγήσει στο παρελθόν σε σημαντικά προβλήματα τάσεων, ωστόσο η κατάσταση βελτιώθηκε σημαντικά με την κατασκευή μεγάλων μονάδων παραγωγής στο νότιο τμήμα της χώρας (κυρίως μονάδες φυσικού αερίου) και την ανάπτυξη ΑΠΕ σε όλη την ελληνική επικράτεια (αιολικά & Φ/Β), που επιτρέπουν την **αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας**.



Πηγή: ΔΕΣΜΗΕ, Μελέτη ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς (2010-2014)

Η περίπτωση των μη διασυνδεδεμένων νησιών (ΜΔΝ)

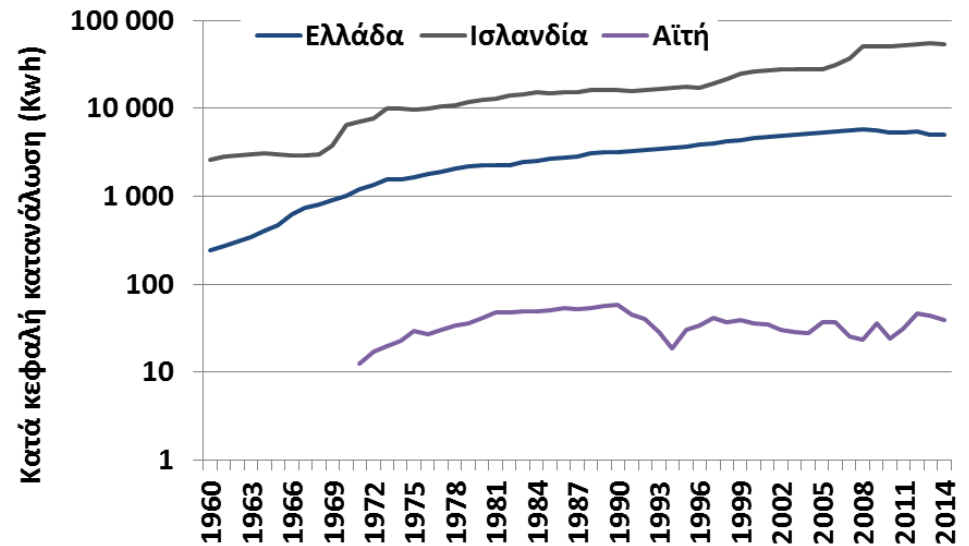
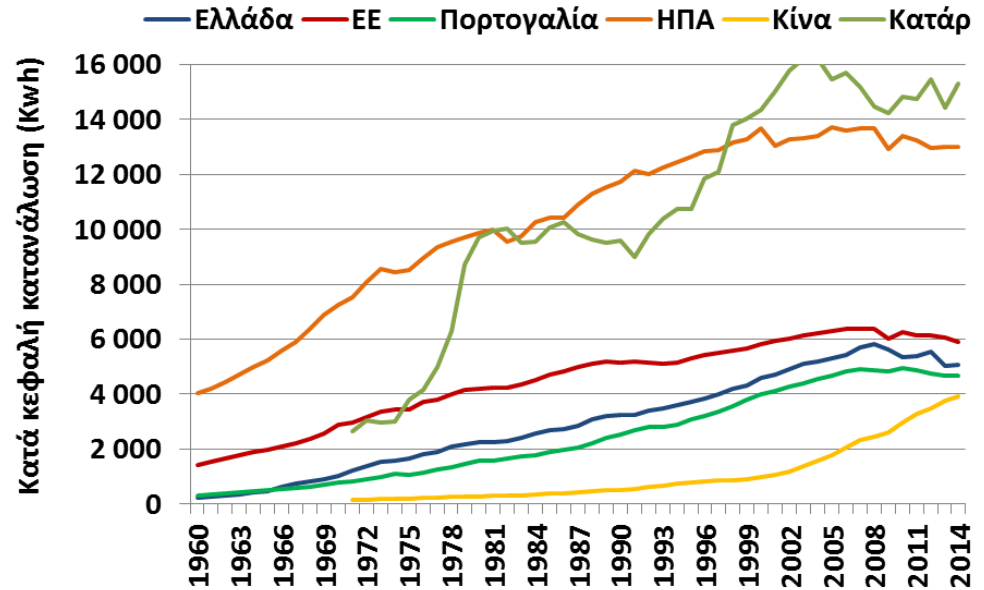
- Μεγάλες διακυμάνσεις της ζήτησης ενέργειας μεταξύ της χειμερινής και θερινής περιόδου (τουρισμός) και μεταξύ ημέρας και νύχτας
- 32 αυτόνομα νησιωτικά ηλεκτρικά συστήματα, που εξυπηρετούνται από τοπικούς πετρελαϊκούς σταθμούς
- Υψηλό κόστος παραγωγής ενέργειας (μεταφορά καυσίμου) και συντήρησης δικτύων (όχι οικονομία κλίμακας)
- Εξάρτηση από την τιμή του πετρελαίου (εισαγόμενο καύσιμο)
- Ανάπτυξη ΑΠΕ – προβλήματα διαχείρισης της μη ελεγχόμενης παραγωγής ενέργειας
- Σταδιακή διασύνδεση των ΜΔ νησιών με υποβρύχια καλώδια (Κρήτη)



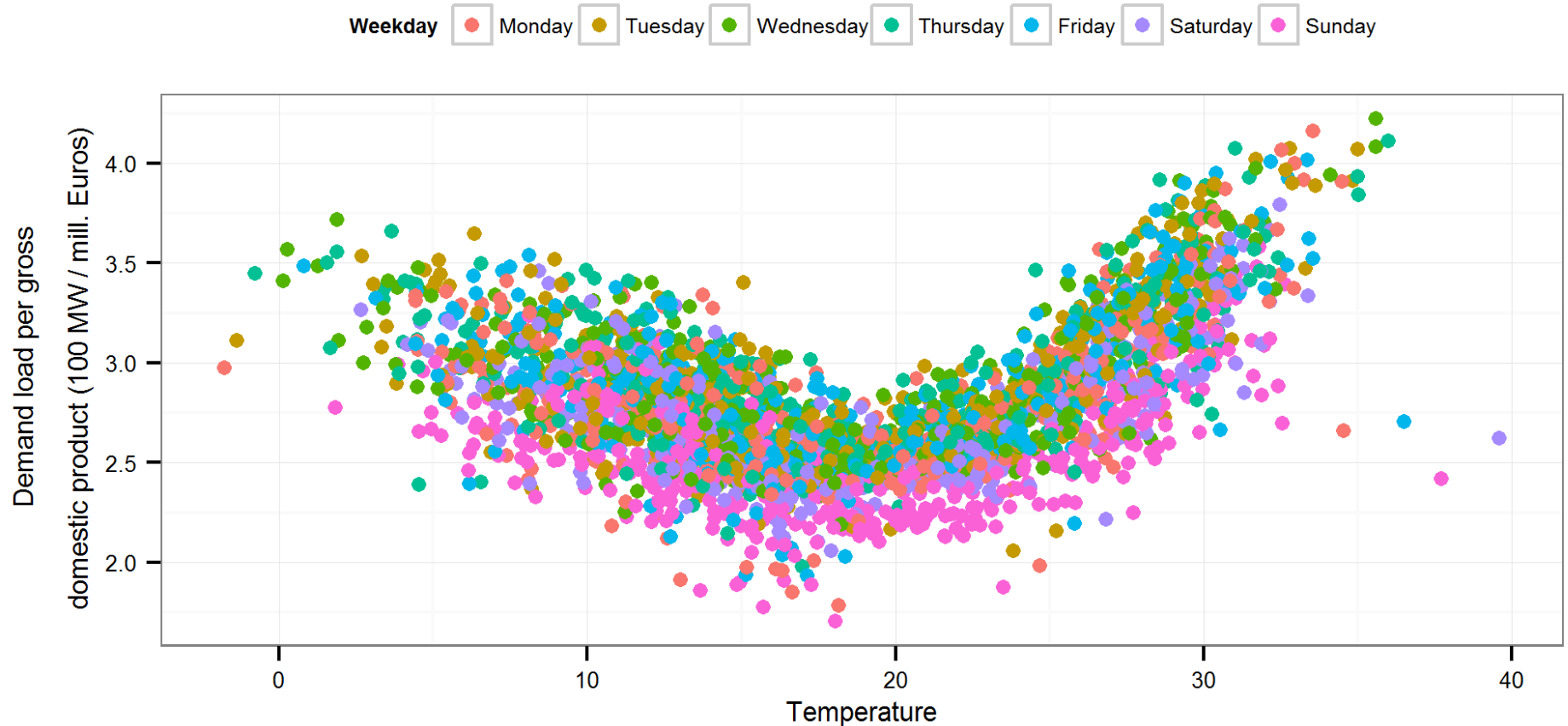
Πηγή: ΡΑΕ (http://www.rae.gr/site/categories_new/electricity/market/mdn.csp)

Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

- Πληθυσμός (μόνιμοι κάτοικοι, επισκέπτες, μετανάστες)
- Οικονομική δραστηριότητα (βιομηχανία, γεωργία, τουρισμός)
- Κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, ηλιοφάνεια)
- Οικονομικά μεγέθη (τιμολόγια ρεύματος, μέσο εισόδημα, ΑΕΠ)
- Υποδομές (δίκτυα μεταφοράς)
- Τεχνολογία (οικιακές συσκευές)
- Κοινωνικές συνθήκες (καταναλωτικές συνήθειες, ημέρες και ώρες που γίνονται διάφορες δραστηριότητες)
- Θεσμικό πλαίσιο (εξοικονόμηση ενέργειας, περιορισμοί)
- Μορφωτικό επίπεδο (περιβαλλοντική συνείδηση)

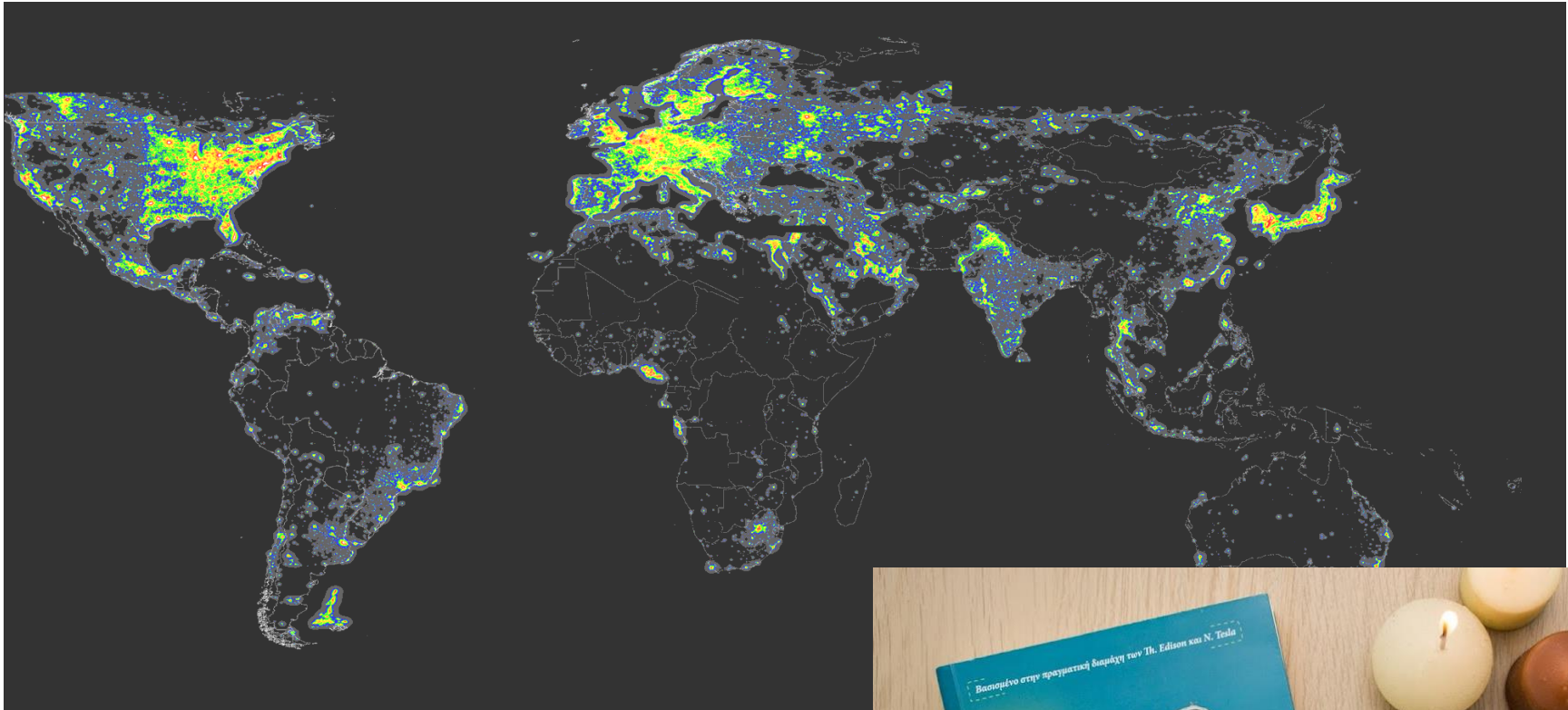


Συσχέτιση μέσης μηνιαίας ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου στην Αθήνα με τη θερμοκρασία (2003-2013)



Πηγή: Tyralis, H., G. Karakatsanis, K. Tzouka, and N. Mamassis, Analysis of the electricity demand of Greece for optimal planning of a large-scale hybrid renewable energy system, *European Geosciences Union General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17*, Vienna, EGU2015-5643, 2015 (<http://www.itia.ntua.gr/1529/>).

Αντί επιλόγου



Παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη νυχτερινή φωτεινότητα

