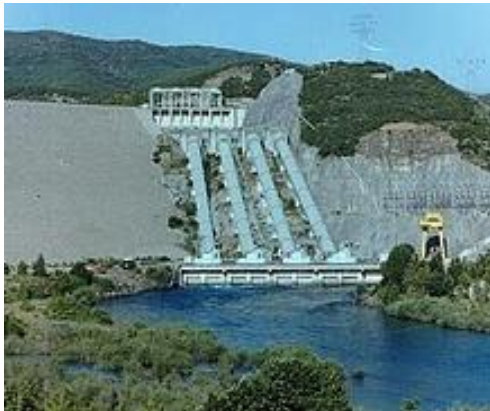


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Ηλεκτρική ενέργεια: παραγωγή, μεταφορά, κατανάλωση



Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2025-26

Βασικές αρχές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

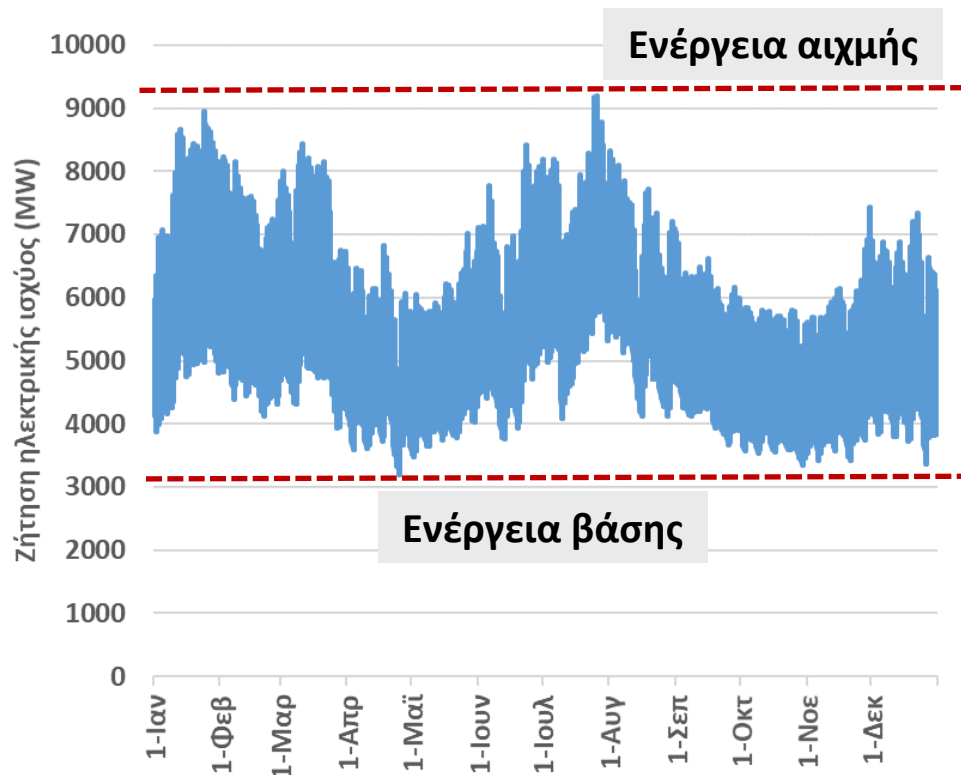
- Μια από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις της ύλης είναι η **ηλεκτρομαγνητική**, μέσω του **ηλεκτρικού φορτίου** (ιδιότητα υποατομικών σωματιδίων).
- Μια ροή ηλεκτρικού φορτίου αποτελεί το **ηλεκτρικό ρεύμα**, που διακρίνεται σε:
 - **συνεχές (D/C)**, το οποίο έχει σταθερή κατεύθυνση
 - **εναλλασσόμενο (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

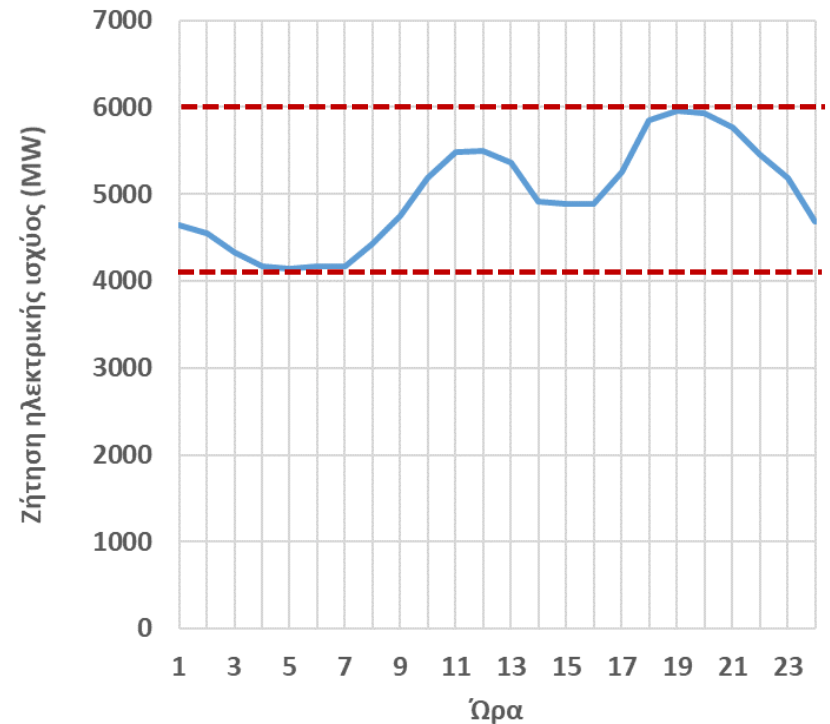
- **Πλεονεκτήματα** ηλεκτρικής ενέργειας:
 - Ευκολία μεταφοράς της από τις πηγές στην κατανάλωση
 - Ευκολία μετατροπής της σε άλλες μορφές ενέργειας (θερμότητα, ακτινοβολία, μηχανική ενέργεια, χημική ενέργεια).
- **Μειονέκτημα:** Μη δυνατότητα αποθήκευσής της ηλεκτρικής ενέργειας, παρά μόνο σε πολύ μικρή 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:

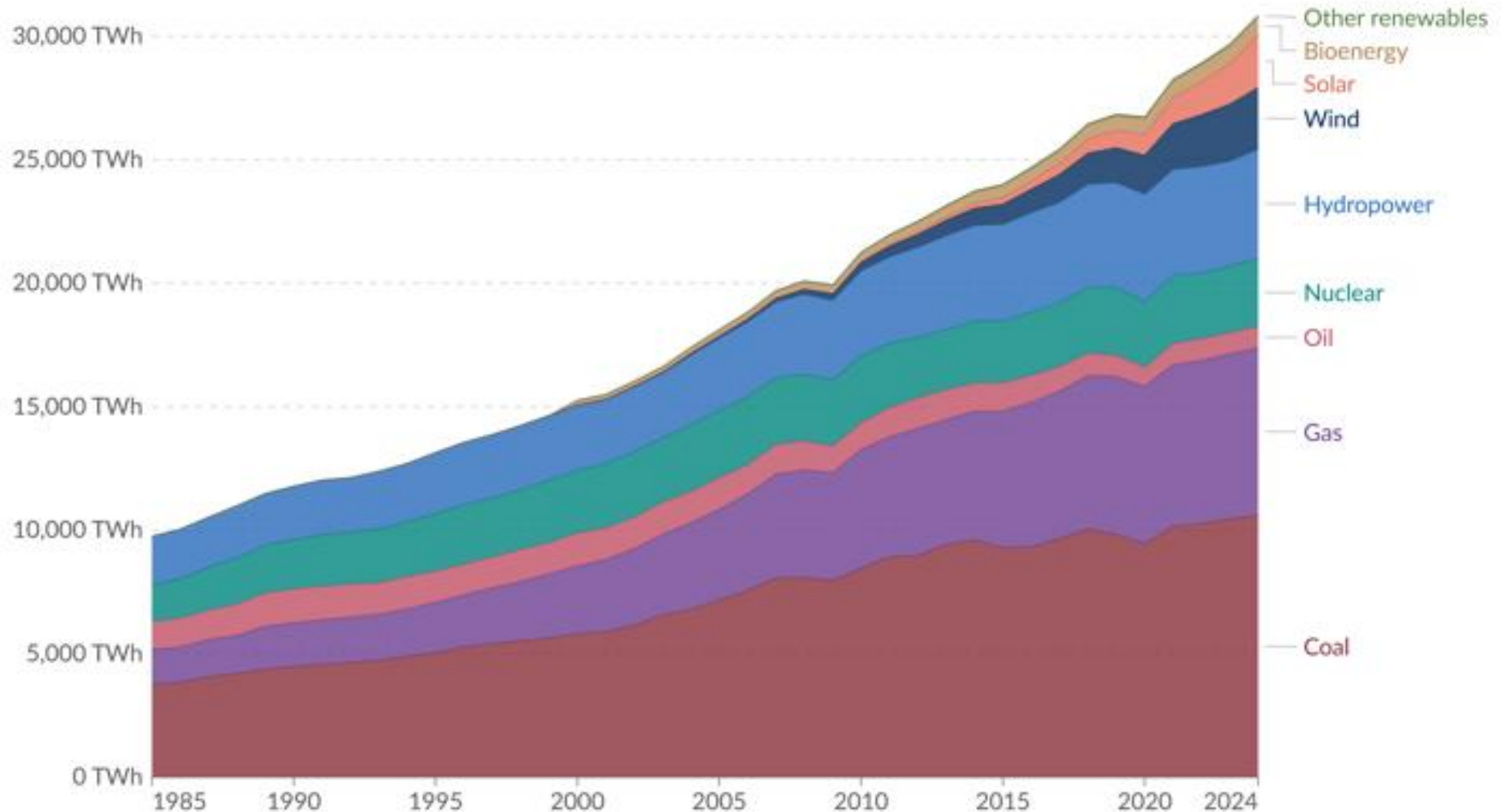
$$CF = \frac{4.0 \times 1000}{3.17 \times 8760} = 14.4\%$$

Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (1985-2024)

Electricity production by source, World

Measured in terawatt-hours¹.

Our World
in Data



Data source: Ember (2025); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025)

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

OurWorldinData.org/energy | CC BY

Σύγκριση 2004-2024

2004

in terawatt-hours

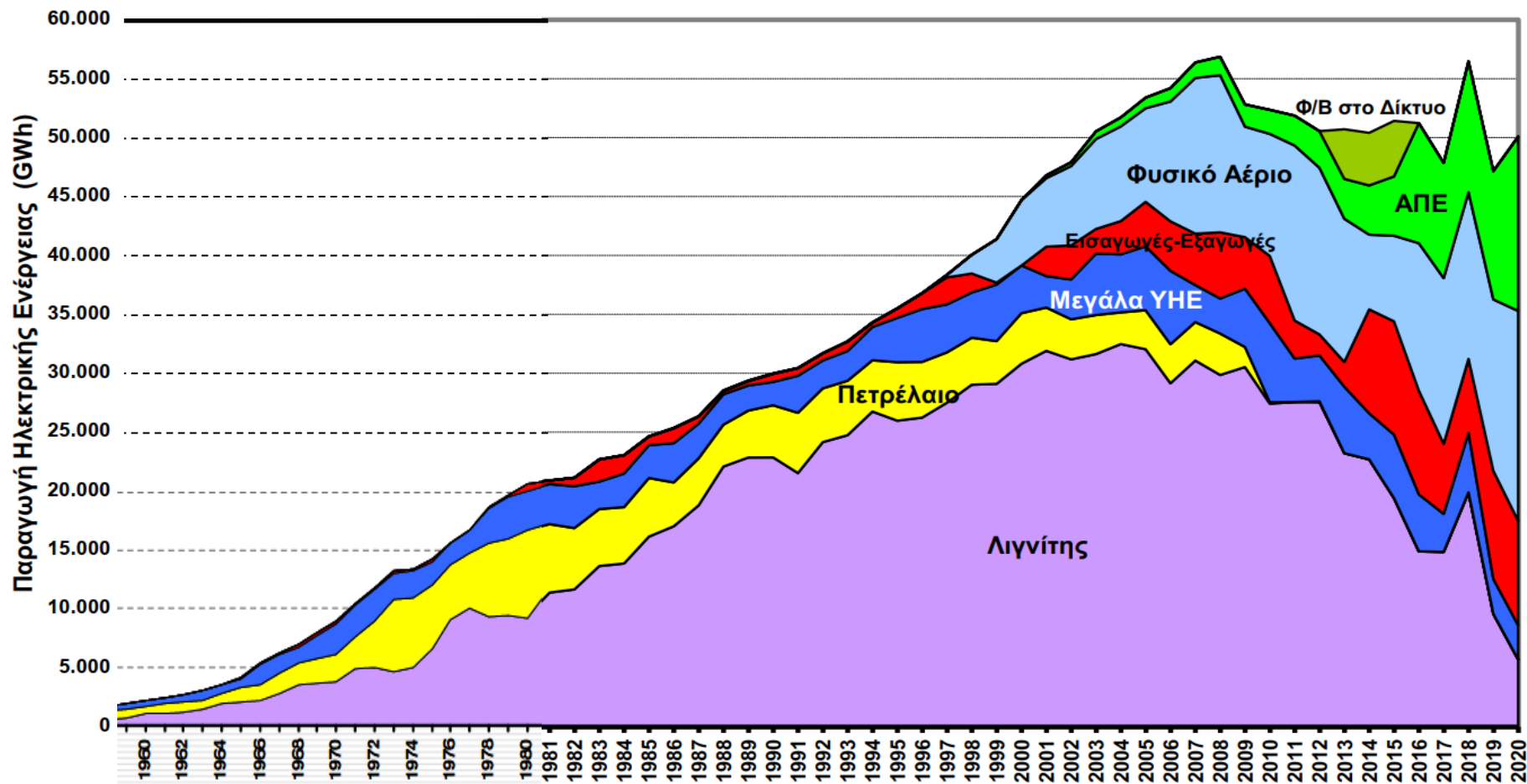
Coal	6,797.30 TWh
Gas	3,503.08 TWh
Hydropower	2,802.55 TWh
Nuclear	2,719.41 TWh
Oil	1,263.28 TWh
Bioenergy	192.54 TWh
Wind	85.46 TWh
Other renewables	48.26 TWh
Solar	2.78 TWh

2024

in terawatt-hours

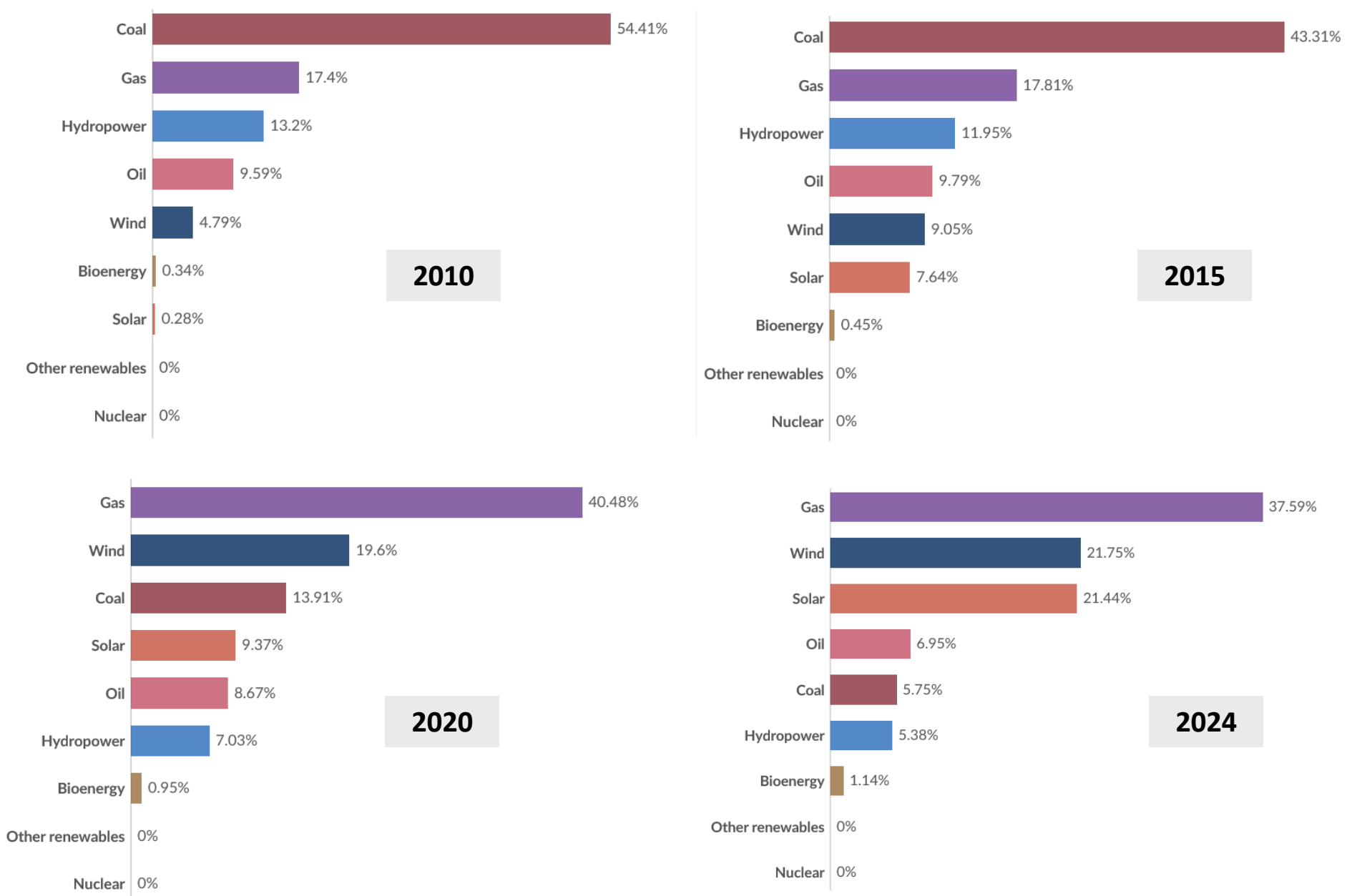
Coal	10,587.47 TWh
Gas	6,795.95 TWh
Hydropower	4,418.96 TWh
Nuclear	2,764.67 TWh
Wind	2,497.25 TWh
Solar	2,130.64 TWh
Oil	857.48 TWh
Bioenergy	712.16 TWh
Other renewables	88.76 TWh

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 (2010-2024)



Μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (έτος 2024)

- Συνολική εγκατεστημένη ισχύς: 26.9 GW (23.2 το 2023, 21.5 GW το 2022)
- Συνολική ζήτηση ενέργειας: 51.8 TWh (50.7 το 2023)
- Ελάχιστη ζητούμενη ισχύς: 3.18 GW (6/5/2024 5:00)
- Μέγιστη ζητούμενη ισχύς: 10.78 GW (18/7/2024 15:00)
- Διαχρονικό ρεκόρ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα : ~55 TWh το 2008, με αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύ ~13 GW

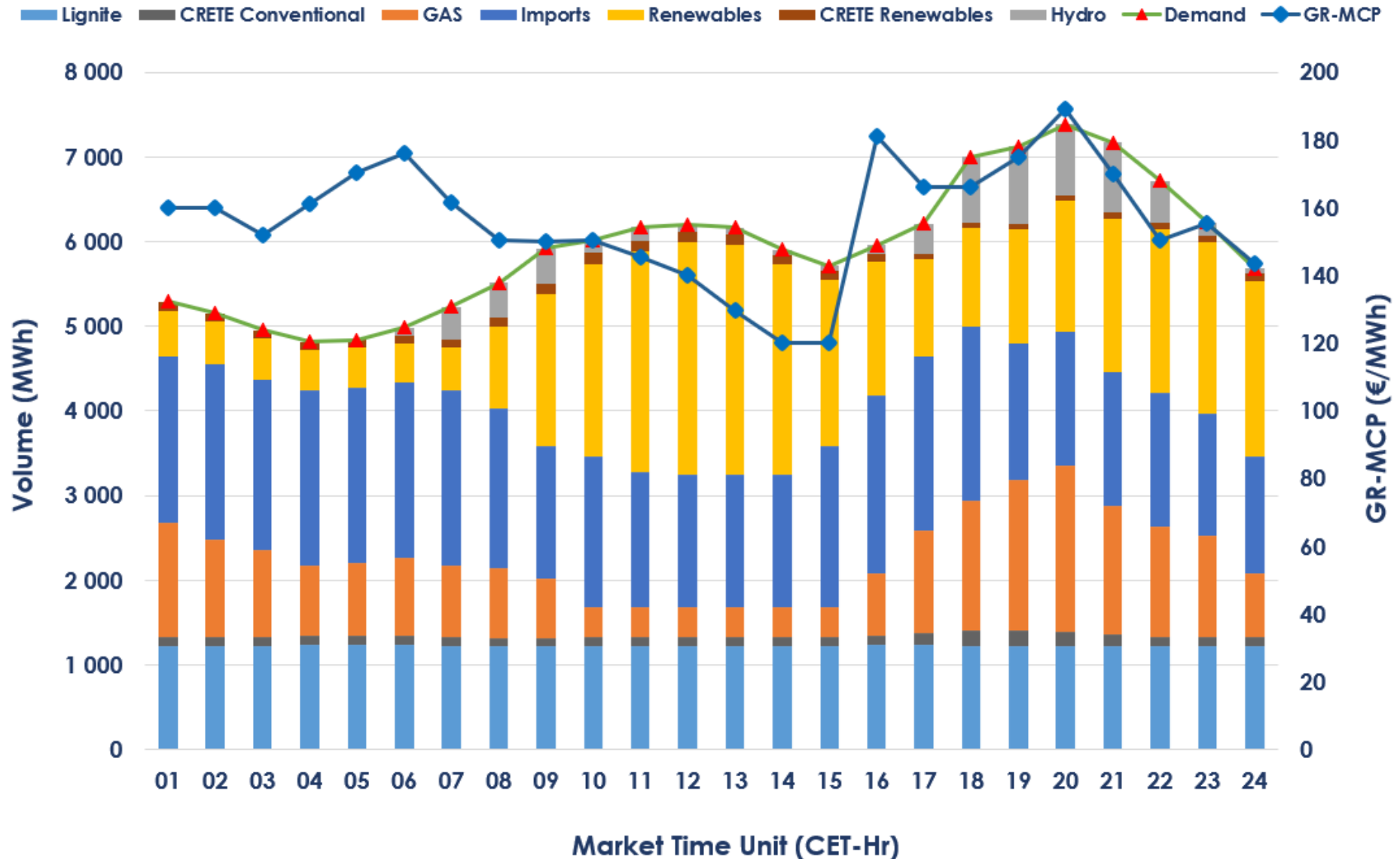
	Ισχύς (GW)	Ποσοστό	Παραγωγή (GWh)	Συντ. δυναμ.
Φωτοβολταϊκά (Φ/Β)	9 600	41.5%	13 098	15.6%
Φυσικό αέριο	6 889	29.8%	20 190	33.5%
Αιολικά	4 731	20.4%	10 959	26.4%
Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα	3 171	13.7%	3 482	12.5%
Λιγνίτης (απόσυρση έως το 2030)	2 313	10.0%	3 236	16.0%
ΜΥΗΣ (υδροηλ. σταθμοί < 15 MW)	40	0.2%	100	28.4%
Συμπ. ηλεκτρισμού-θερμότητας	193	0.8%	1 014	60.0%
Βιοαέριο	2	0.0%	8	43.2%
Λοιπά καύσιμα		0.0%	16	
Διασύνδεση Κρήτης (ΑΠΕ)		0.0%	14	
Σύνολο	26 939		52 118	22.1%

Πηγή: ΑΔΜΗΕ, Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας – Ιανουάριος 2025, 2^η έκδοση, μετά από επεξεργασία

Διαχείριση ηλεκτρικής ενέργειας

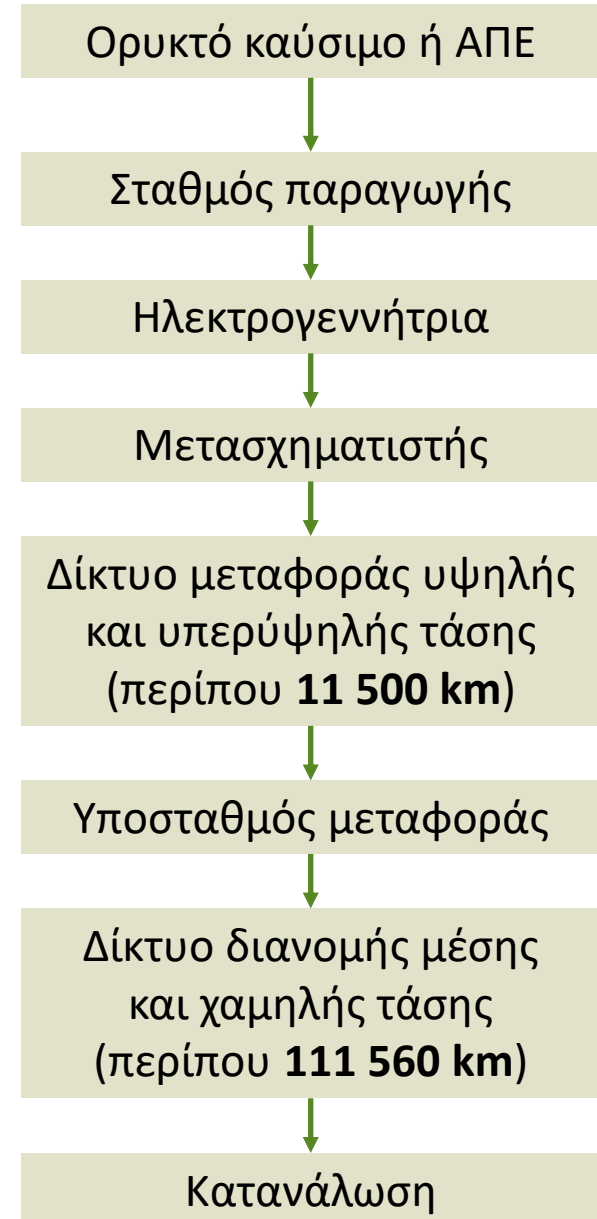
- **Βασική λειτουργική απαίτηση:** Προσαρμογή της παραγωγής ενέργειας από τις διάφορες συνιστώσες του ενεργειακού μίγματος, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, στη ζήτηση
- Η διαχείριση της ηλεκτροπαραγωγής γίνεται σε διάφορες **χρονικές κλίμακες**:
 - Προγραμματισμός επόμενης ημέρας (day-ahead), ανά ώρα (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.



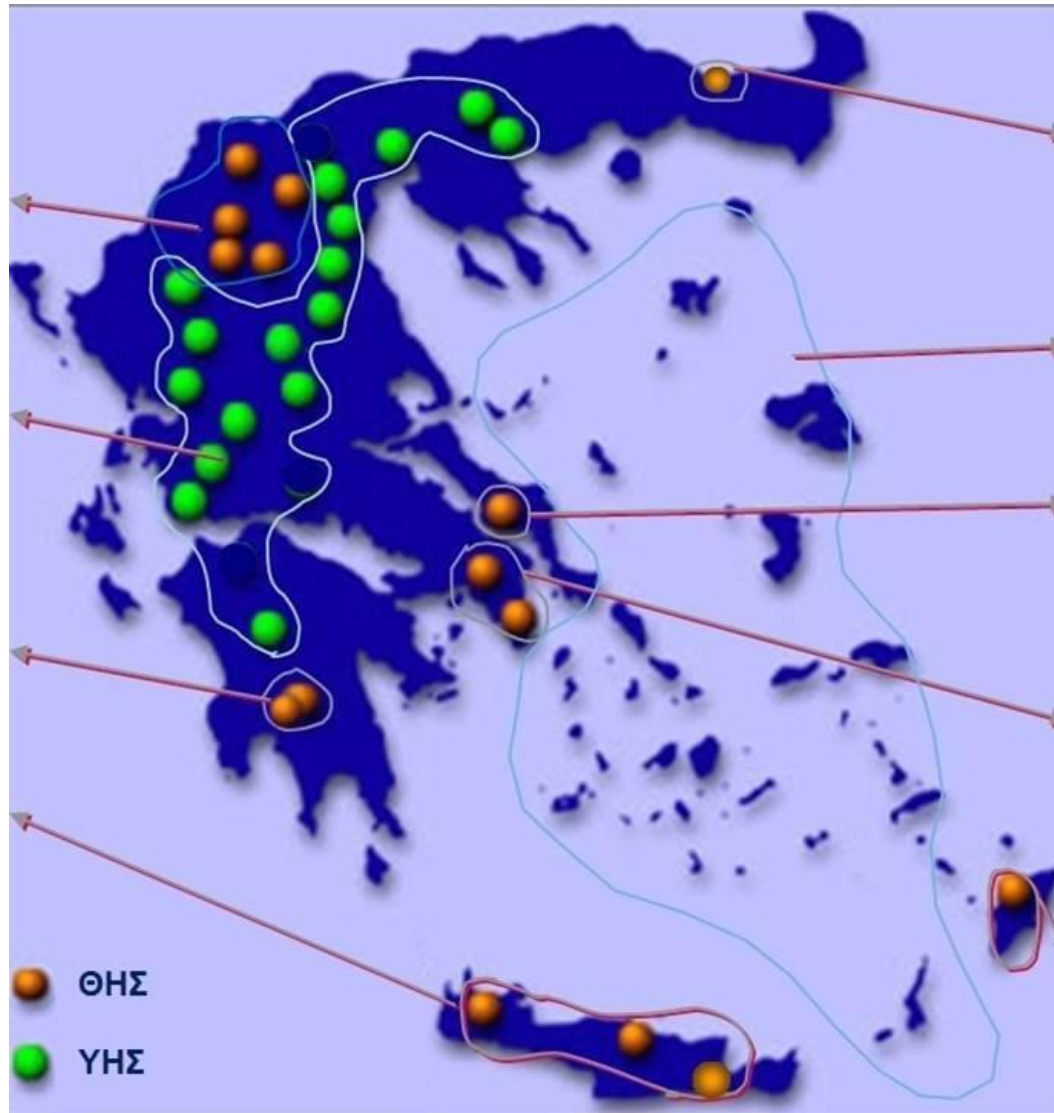
Γεωγραφική κατανομή σταθμών παραγωγής της ΔΕΗ ΑΕ

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

- Ως τις αρχές της δεκαετίας του 2000, κύριο χαρακτηριστικό του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος ήταν η συγκέντρωση της παραγωγής στο βόρειο και δυτικό τμήμα της χώρας (λιγνιτικές μονάδες, 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-φορτίων.
- Η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ισχύος κατά τον άξονα Βορρά – Νότου εξυπηρετούνταν κυρίως από έναν κεντρικό κορμό ισχύος 400 kV (τρεις γραμμές μεταφοράς, διπλού κυκλώματος).
- Η μεγάλη γεωγραφική ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης είχε οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα τάσεων, ωστόσο η κατάσταση βελτιώθηκε σημαντικά με την ανάπτυξη μεγάλων μονάδων παραγωγής στο νότιο τμήμα της χώρας (κυρίως ΦΑ) και την ανάπτυξη ΑΠΕ σε όλη την ελληνική επικράτεια (αιολικά & Φ/Β), που επιτρέπουν την **αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας**.



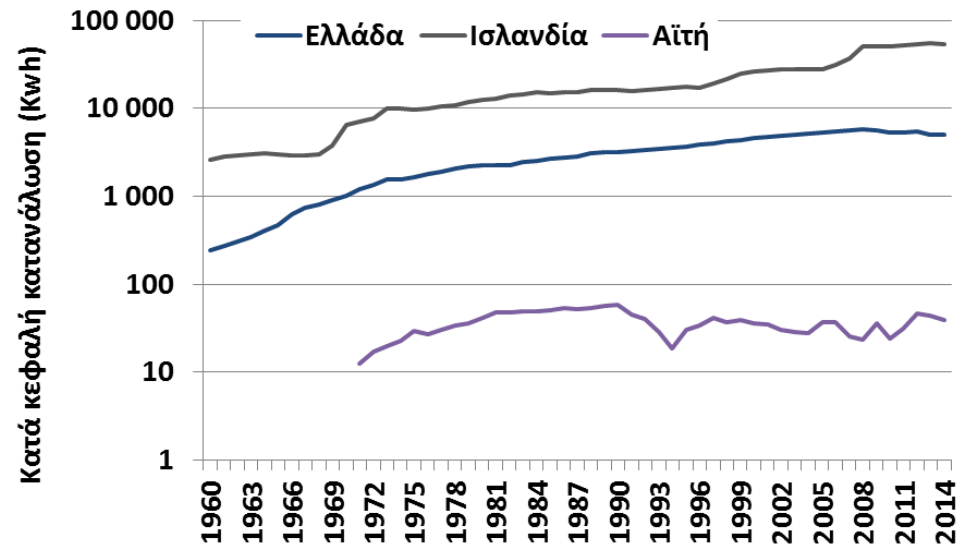
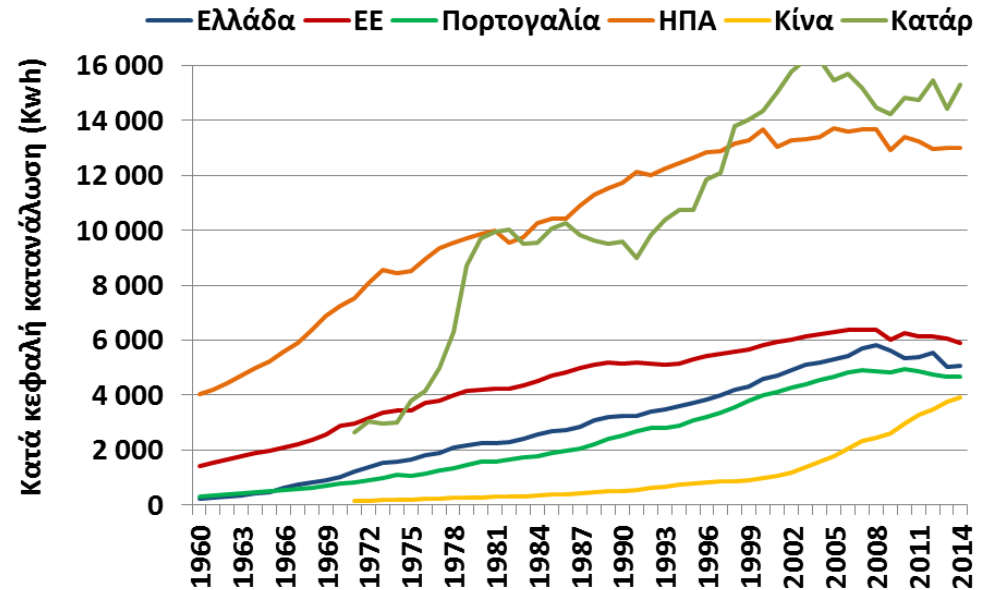
Η περίπτωση των μη διασυνδεδεμένων νησιών (ΜΔΝ)

- 28 Μη Διασυνδεδεμένα Ηλεκτρικά Συστήματα (ΜΔΝ), που περιλαμβάνουν νησιά ή συμπλέγματα νησιών.
- Ενεργειακό μίγμα (έως Οκτ. 2024):
 - 30 θερμικοί σταθμοί (~933 MW)
 - >690 σταθμοί ΑΠΕ (~160 MW)
 - >1800 αυτοπαραγωγοί (~17 MW)
 - 2 υβριδικοί σταθμοί (2.95 MW)
- Τυπικά προβλήματα:
 - Μεγάλες διακυμάνσεις ζήτησης ενέργειας μεταξύ χειμερινής και θερινής περιόδου (τουρισμός)
 - Υψηλό κόστος παραγωγής ενέργειας (μεταφορά καυσίμου) και συντήρησης δικτύων (όχι οικονομία κλίμακας)
 - Εξάρτηση από την τιμή του πετρελαίου (εισαγόμενο καύσιμο)
 - Διαχείριση και απορρόφηση της μη ελεγχόμενης παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ (ανεπαρκή δίκτυα)

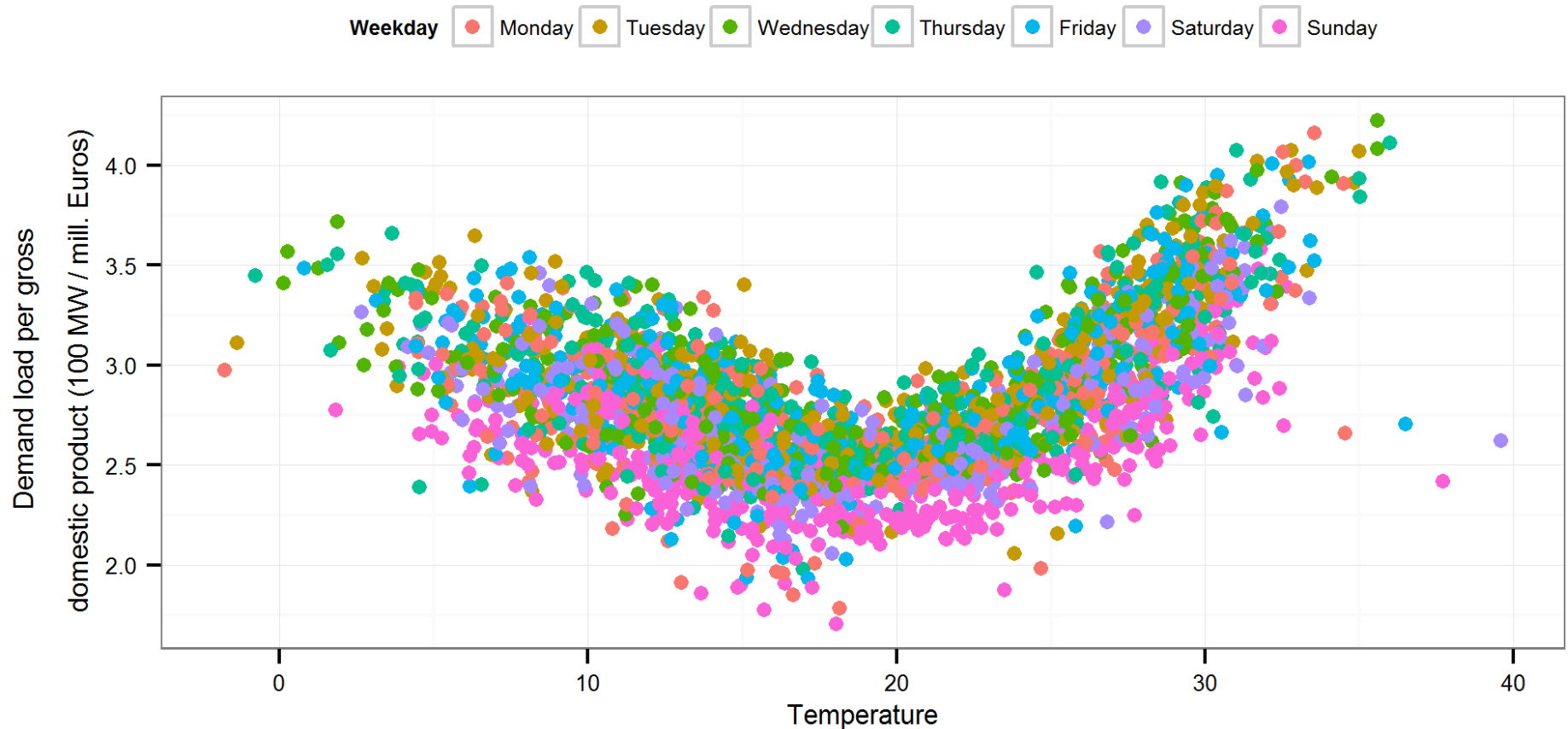


Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

- 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)

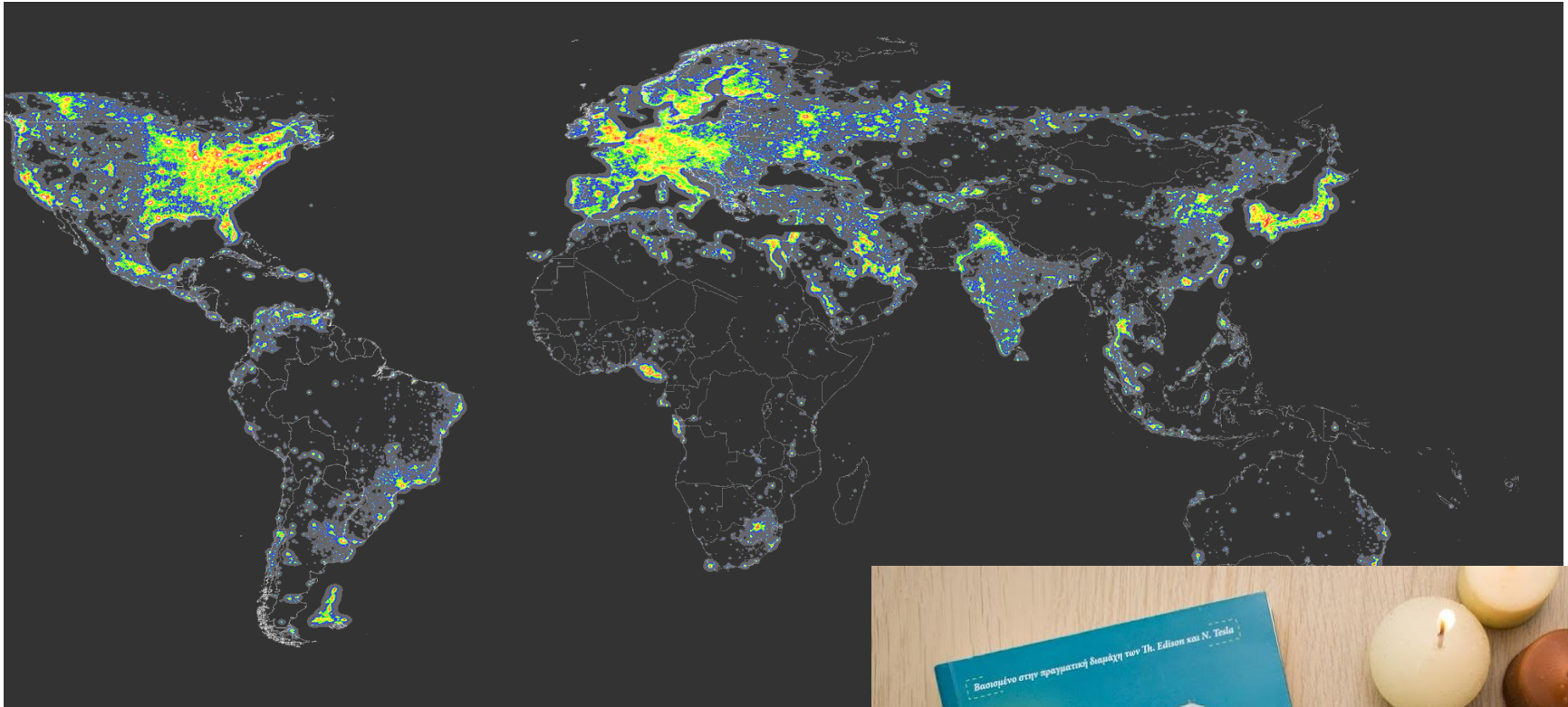


Συσχέτιση μέσης μηνιαίας ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου στην Αθήνα με τη θερμοκρασία (2003-2013)



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**

