

Ενέργεια και Περιβάλλον

Ηλεκτρική ενέργεια: παραγωγή, μεταφορά, κατανάλωση



Νίκος Μαμάσης και Ανδρέας Ευστρατιάδης,
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ακαδημαϊκό έτος 2024-25

Θεμελιώδεις έννοιες: Ενέργεια & ισχύς

Ενέργεια: η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο

Έργο: δύναμη × μετατόπιση, ορίζεται και ως:

- η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται ή καταναλώνεται από ένα σώμα κατά τη μεταβολή της κινητικής του κατάστασης
- η ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα σε ένα άλλο ή που μετατρέπεται από μια μορφή σε μια άλλη

Ισχύς: Ρυθμός μεταβολής της ενέργειας

$$P(t) = \frac{dE}{dt} \approx \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Μορφές ενέργειας

- Μηχανική (δυναμική, κινητική)
- Ηλεκτρομαγνητική
- Πυρηνική
- Χημική
- Θερμική-βιολογική
- Θερμότητα-ακτινοβολία

Σημείωση 1: Η λέξη *ενέργεια* αναφέρεται πρώτη φορά από τον Αριστοτέλη (Ηθικά Νικομάχεια), με την έννοια της «δραστηριότητας που απαιτείται για να γίνει πράξη η δυνατότητα (δύναμις)»

Σημείωση 2: Η παραγόμενη ενέργεια για την κάλυψη του συνόλου των ενεργειακών αναγκών καλείται *πρωτογενής* (primary).

Σημείωση 3: Μόνο ο άνθρωπος καταναλώνει ενέργεια για άλλους λόγους εκτός από τον βιοπορισμό

Μονάδες μέτρησης

Δύναμη (Newton, N)

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2 = 10^5 \text{ dyn}$$

$$1 \text{ dyn} = 1 \text{ gr} \times 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-5} \text{ N}$$

$$1 \text{ kg}^* \text{ (ή } 1 \text{ kp)} = 1 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \text{ N}$$

(kg: χιλιόγραμμα μάζας, kg* ή kp: χιλιόγραμμα βάρους)

Έργο (Joule, J)

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

$$1 \text{ erg} = 1 \text{ dyn} \times 1 \text{ cm} = 10^{-7} \text{ J}$$

$$1 \text{ kg}^* \text{m} = 9.81 \text{ J}$$

Ισχύς (Watt, W)

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ J/s} = 10^2 \text{ kg}^* \text{m/s} = 1.36 \text{ PS}$$

1 PS ή 1 hP = 746 W = 75 kg* m/s (η ισχύς ενός αλόγου, όπως εκτιμήθηκε από τον James Watt τον 18ο αιώνα, συγκρίνοντάς την με τις ατμομηχανές)

Ενέργεια (Joule ή kWh)

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \text{ MJ} \text{ (εφαρμογή στον ηλεκτρισμό)}$$

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J} \text{ (απαιτούμενη ενέργεια για να αυξηθεί η θερμοκρασία } 1 \text{ g νερού κατά } 1^\circ\text{C)}$$

$$1 \text{ toe (tones oil equivalent)} = 10^7 \text{ kcal} = 42 \text{ GJ} = 40 \times 10^6 \text{ Btu} = 11.7 \text{ MWh} \text{ (για ορυκτά καύσιμα)}$$

$$1 \text{ Btu (British thermal unit)} = 0.252 \text{ kcal} \text{ (για εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης)}$$

Χαρακτηριστικά ενεργειακά μεγέθη

Ενεργειακές ανάγκες ανθρώπου:

- Η ημερήσια ενέργεια μεταβολισμού που χρειάζεται ένας μέσος άνθρωπος είναι περίπου 8.4 ως 10.5 MJ (2000-2500 kcal).
- Η ωριαία ενέργεια που χρειάζεται ένας άνθρωπος μάζας 75 kg που τρέχει με ταχύτητα 13 km/h είναι περίπου 3.5 MJ (800 kcal)
- Η χημική ενέργεια που λαμβάνεται από τις τροφές μετατρέπεται σε *κινητική* (κίνηση σώματος), *δυναμική* (σύσπαση μυών), *θερμική* (διατήρηση θερμοκρασίας) και *ηλεκτρική* (επικοινωνία εγκεφάλου με τα λοιπά μέρη του σώματος)

Ενέργεια που αποδίδεται από την καύση υλικών μάζας 1 kg:

Άνθρακας: 34 MJ

Λιγνίτης: 10 MJ

Βενζίνη: 44 MJ

Πετρέλαιο: 42 MJ

Φυσικό αέριο: 47 MJ

Ξύλο: 15 MJ

Ισχύς και ενέργεια:

- Λαμπτήρας ισχύος 100 W που λειτουργεί επί μία ημέρα αποδίδει 2.4 kWh (8.6 MJ)
- Κινητήρας αυτοκινήτου 1400 cm³ έχει ισχύ 56 kW και σε μία ώρα αποδίδει 200 MJ
- Κινητήρας αεροπλάνου Boeing 707 έχει ισχύ 21 MW και σε 1 s αποδίδει 21 MJ

- Ηλιακή ενέργεια:** Η μέση ημερήσια τιμή της στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, η οποία προσπίπτει σε 1 m² ενός τόπου που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 40°, ανέρχεται σε 42 MJ (11.7 kWh) τον Ιούνιο και σε 14 MJ (3.9 kWh) τον Δεκέμβριο.

«Πρωτογενείς» πηγές ενέργειας & φυσικές διεργασίες

Ηλιακή ακτινοβολία: Στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας προσπίπτουν περίπου 1367 W/m^2 (ηλιακή σταθερά). Η ενέργεια αυτή: (α) απορροφάται από τη γη και μετατρέπεται σε θερμότητα, διατηρώντας τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, (β) συντηρεί τον υδρολογικό κύκλο (εξάτμιση, βροχόπτωση), (γ) συντηρεί την κατακόρυφη μεταφορά (αιολική ενέργεια, ρεύματα), και (δ) συντηρεί την φωτοσύνθεση.

Γη: Θερμικές, χημικές και ραδιενεργές πηγές που βρίσκονται στο εσωτερικό της γης, οι οποίες προκαλούν ροή ενέργειας στην επιφάνεια της τάξης των 0.063 W/m^2 .

Βαρύτητα: Προέρχεται από τη σχετική θέση Γης, Ηλίου και Σελήνης και δημιουργεί τις παλίρροιες και τα θαλάσσια ρεύματα, ενώ συντηρεί τον υδρολογικό κύκλο. Εκτιμάται στο 10% της γήινης ενέργειας.

Βιομάζα: Η χρήση της ξεκίνησε πριν 400 000 έτη (*homo erectus*) και η χρήση της για καύση προκάλεσε «τεχνολογική επανάσταση».

Ορυκτά καύσιμα: Άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο που προέρχονται από τα λείψανα της αρχαίας χλωρίδας και πανίδας. Είναι αποθηκευμένα για 600 εκατομμύρια έτη και η καύση τους παράγει ενέργεια τα τελευταία 300 έτη. Ο ρυθμός κατανάλωσής τους είναι πολλαπλάσιος από το ρυθμό δημιουργίας τους, και στο μέλλον θα εξαντληθούν.

Σημείωση: Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στο έδαφος της γης σε ένα έτος είναι περίπου 14 000 φορές μεγαλύτερη από την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

Τυπική διάκριση πηγών ενέργειας

▪ Ορυκτά καύσιμα (αναφέρονται και ως συμβατικές πηγές ενέργειας):

- Στερεά (άνθρακας, σε διάφορες μορφές)
- Υγρά (πετρέλαιο και παράγωγα αυτού)
- Αέρια (φυσικό αέριο, σε διάφορες μορφές)
- Πυρηνικά (ουράνιο)

▪ Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

- Ηλιακή (με κυρίαρχη τεχνολογία τα φωτοβολταϊκά συστήματα)
- Αιολική
- Υδραυλική (κυρίως υδροηλεκτρική)
- Βιομάζα
- Γεωθερμική
- Θαλάσσια (κυμάτων, παλίρροιών, ρευμάτων)

Σημείωση 1: Ο όρος *ανανεώσιμη* αφορά στη χρονική κλίμακα επαναδημιουργίας της πηγής ενέργειας. Στη γεωλογική κλίμακα, τα ορυκτά καύσιμα είναι ανανεώσιμα.

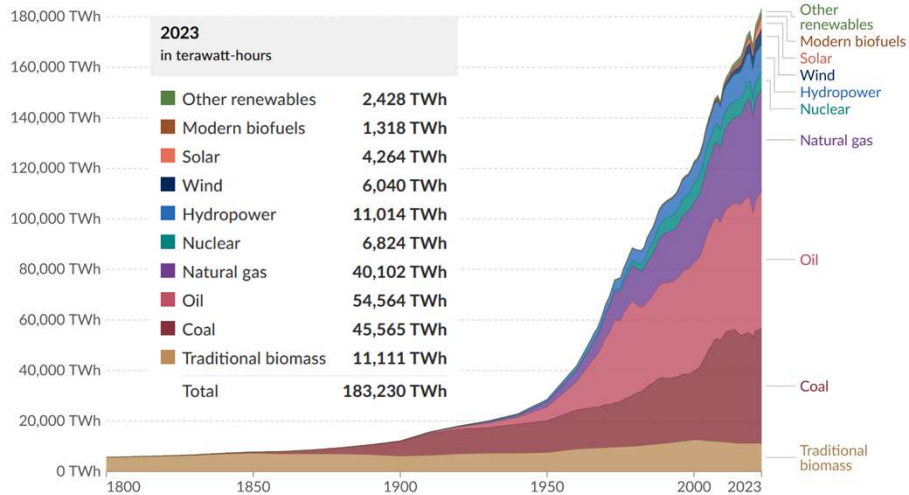
Σημείωση 2: Η παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, βιομάζα και γεωθερμία έχει ως κοινή βάση τη διεργασία της καύσης.

Χρονική εξέλιξη πρωτογενούς ενέργειας (1800-2023)

Global primary energy consumption by source

Primary energy¹ is based on the substitution method² and measured in terawatt-hours³.

Our World
in Data



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024); Smil (2017)

Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

OurWorldinData.org/energy | CC BY

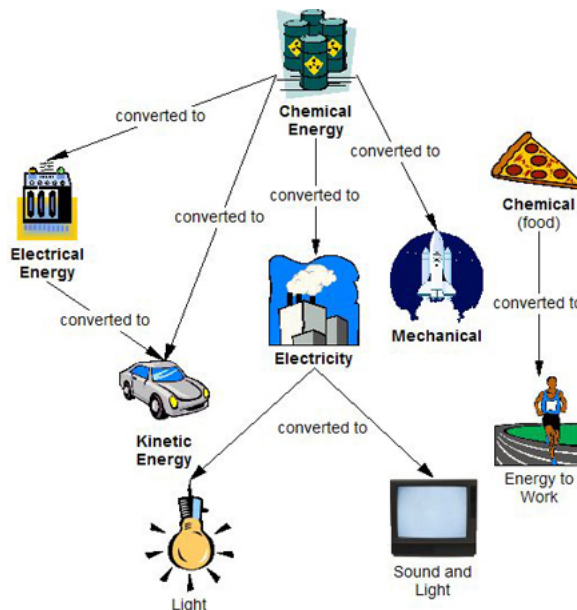
Μετατροπές ενέργειας

Σημείωση 1: Οποιαδήποτε μεταβολή στον φυσικό κόσμο συνδέεται με κάποια μετατροπή ενέργειας

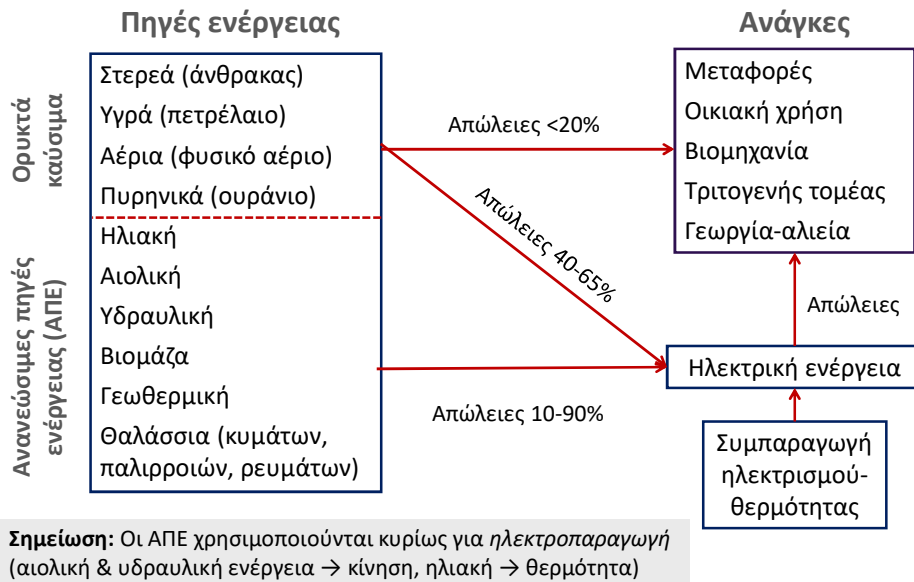
Σημείωση 2: Σε κάθε μετατροπή ενέργειας από μια μορφή σε κάποια άλλη πραγματοποιούνται απώλειες ενέργειας

Σημείωση 3: Απώλειες πραγματοποιούνται και κατά τη μεταφορά και αποθήκευση της ενέργειας

Σημείωση 4: Η σύγχρονη τάση είναι η χρήση του ηλεκτρισμού ως του κύριου μετατροπέα ενέργειας.



Γενικό σχήμα μετατροπών ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών



Συστήματα μετατροπής ενέργειας (1)

- Για δεδομένη ισχύ, P_0 , η οποία εισάγεται σε ένα σύστημα μετατροπής, η ισχύς που εξέρχεται, P , είναι πάντα μικρότερη, σύμφωνα με τη σχέση:

$$P = \eta P_0$$

όπου $\eta < 1$ αδιάστατο μέγεθος που καλείται **βαθμός απόδοσης (efficiency)**.

- Η εισερχόμενη ισχύς είναι μια σχέση της μορφής:

$$P_0 = P_0(x, \lambda)$$

όπου x η ροή του μέσου/υλικού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισχύος και λ φυσικές ιδιότητες του μέσου παραγωγής και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος μετατροπής (π.χ. πυκνότητα ανέμου και διάμετρος ανεμογεννήτριας).

- Συνήθως η συνάρτηση $P_0(x, \lambda)$ μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά (**θεωρητική ισχύς**).
- Χαρακτηριστικά παραδείγματα του μεγέθους x είναι:
 - Ρυθμός μεταβολής μάζας καυσίμου που εισάγεται σε θερμοηλεκτρική μονάδα
 - Ρυθμός μεταβολής όγκου νερού (παροχή) που διέρχεται από υδροστρόβιλο
 - Ταχύτητα ανέμου που προσπίπτει σε ανεμογεννήτρια
- Η ροή x , και ως εκ τούτου η θεωρητική ισχύς μπορεί να είναι:
 - Ελεγχόμενη** (π.χ., καύσιμο, βιομάζα, γεωθερμία, εκροή από ταμιευτήρα)
 - Μη ελεγχόμενη** (π.χ., ροή ποταμού, άνεμος, ήλιος, κύματα), συνήθως επειδή εξαρτάται από τις μεταβαλλόμενες υδρομετεωρολογικές συνθήκες.

Συστήματα μετατροπής ενέργειας (2)

- Ο βαθμός απόδοσης είναι γενικά εξαρτώμενος από τη ροή ισχύος, x , και χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος μετατροπής, μ , ήτοι:

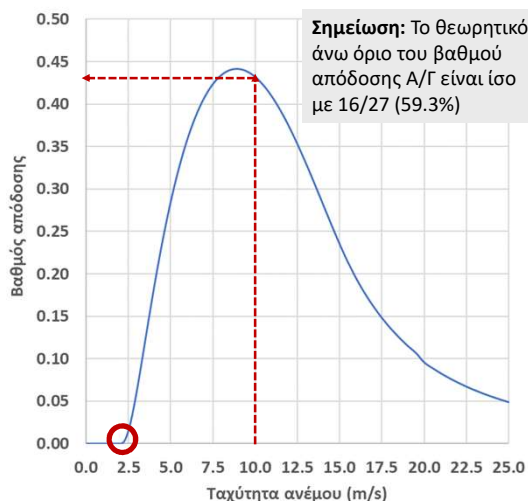
$$\eta = \eta(x, \mu)$$

- Σε αντίθεση με τη θεωρητική ισχύ, η σχέση μεταβολής του βαθμού απόδοσης δεν μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά, παρά μόνο με βάση εργαστηριακά πειράματα που αφορούν στο συγκεκριμένο και μόνο μηχάνημα μετατροπής (καμπύλες ισχύος).
- Σε αρκετά συστήματα, απαιτείται μια ελάχιστη ροή x προκειμένου να παραχθεί ισχύς, ενώ όλα τα συστήματα έχουν ένα άνω όριο παραγωγής, που καλείται **ονομαστική ισχύς** (nominal power). Η ονομαστική ισχύς χαρακτηρίζει το κάθε σύστημα (π.χ. φωτοβολταϊκό πάνελ 200 W, ανεμογεννήτρια 700 kW, θερμοηλεκτρική μονάδα 400 MW).
- Όταν η ροή x , και ως εκ τούτου η θεωρητική ισχύς, είναι ελεγχόμενες, επιδιώκεται η λειτουργία του συστήματος στη μέγιστη (ονομαστική) ισχύ του, με σταθερή ροή x , και συνακόλουθα με **σταθερό βαθμό απόδοσης**, ίσο ή κοντά στο μέγιστο.
- Τυπικές τιμές του (μέγιστου) βαθμού απόδοσης:
 - Θερμικές μονάδες: > 0.40
 - Υδροηλεκτρικά έργα: > 0.85 (μεγάλα έργα > 0.90)
 - Ανεμογεννήτριες: < 0.45
 - Φωτοβολταϊκά πάνελ: > 0.23

Σημείωση: Ο βαθμός απόδοσης είναι εξ ορισμού μικρότερος της μονάδας, ενώ για ορισμένες πηγές ενέργειας υπάρχει θεωρητικό άνω όριο

Παράδειγμα: Θεωρητική ισχύς ανέμου και βαθμός απόδοσης ανεμογεννητριών

- Η θεωρητική ισχύς του ανέμου (αιολική ισχύς) εξαρτάται από:
 - την ταχύτητα του ανέμου (ροή «καυσίμου»)
 - την πυκνότητα του αέρα (φυσική ιδιότητα καυσίμου)
 - τη διάμετρο της πτερωτής (γεωμετρικό μέγεθος)
- Στο νομογράφημα δίνεται η σχέση μεταβολής του βαθμού απόδοσης μιας Α/Γ εμπορίου (Enercon E-66/18.70), διαμέτρου 70 m και ονομαστικής ισχύος 1800 kW.
- Για ταχύτητα ανέμου 10 m/s, η θεωρητική ισχύς του ανέμου υπολογίζεται σε 2356 kW, ο βαθμός απόδοσης εκτιμάται σε 43.2%, άρα παράγεται ηλεκτρική ισχύς 1018 kW.



Πηγή: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/135-enercon-e-66-18.70> (ανακατασκευή σχέσης βαθμού απόδοσης, με βάση την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας)

Βασικές αρχές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

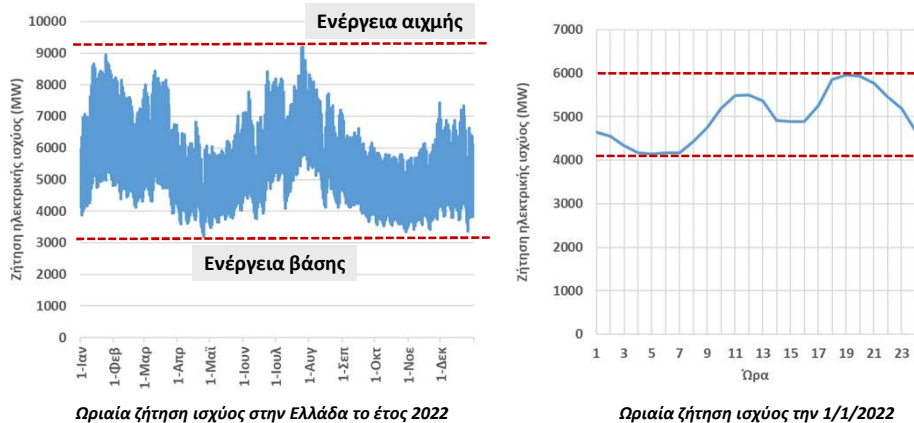
- Μια από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις της ύλης είναι η **ηλεκτρομαγνητική**, μέσω του **ηλεκτρικού φορτίου** (ιδιότητα υποατομικών σωματιδίων).
- Μια ροή ηλεκτρικού φορτίου αποτελεί το **ηλεκτρικό ρεύμα**, που διακρίνεται σε:
 - **συνεχές (D/C)**, το οποίο έχει σταθερή κατεύθυνση
 - **εναλλασσόμενο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



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)

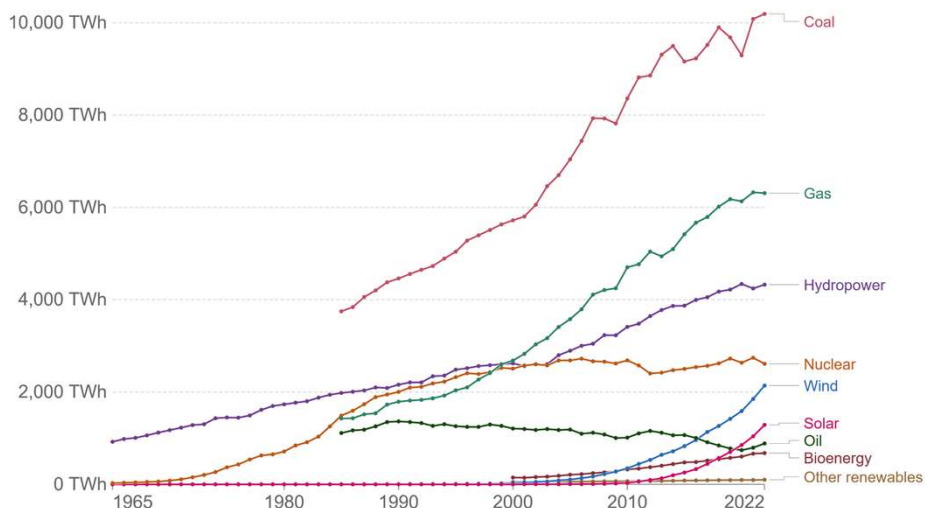
- **Ορισμός:** Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη θεωρητικά μέγιστη που μπορεί να παραχθεί από ένα έργο (ή σύστημα έργων) συνολικής ισχύος P_{max} σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, T :

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

- 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:

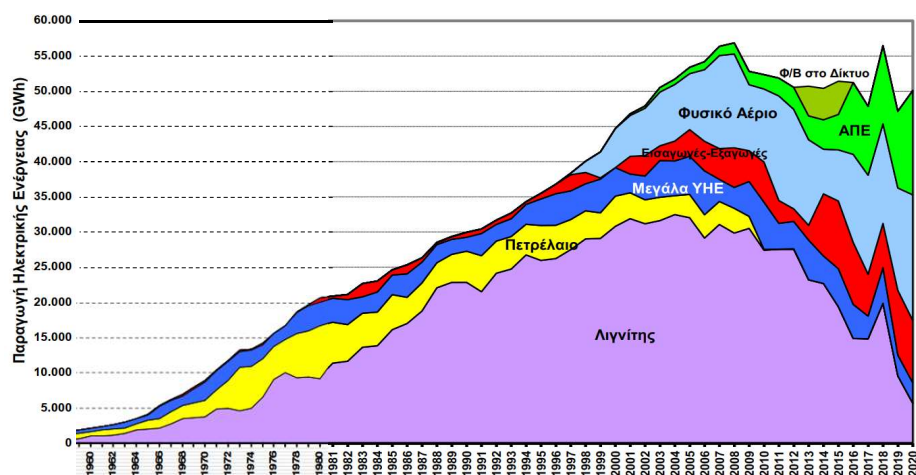
$$CF = \frac{4.0 \times 1000}{3.17 \times 8760} = 14.4\%$$

Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (1965-2022)



Data source: Ember's Yearly Electricity Data; Ember's European Electricity Review; Energy Institute Statistical Review of World Energy
Note: 'Other renewables' includes waste, geothermal and wave and tidal energy.
OurWorldInData.org/energy | CC BY

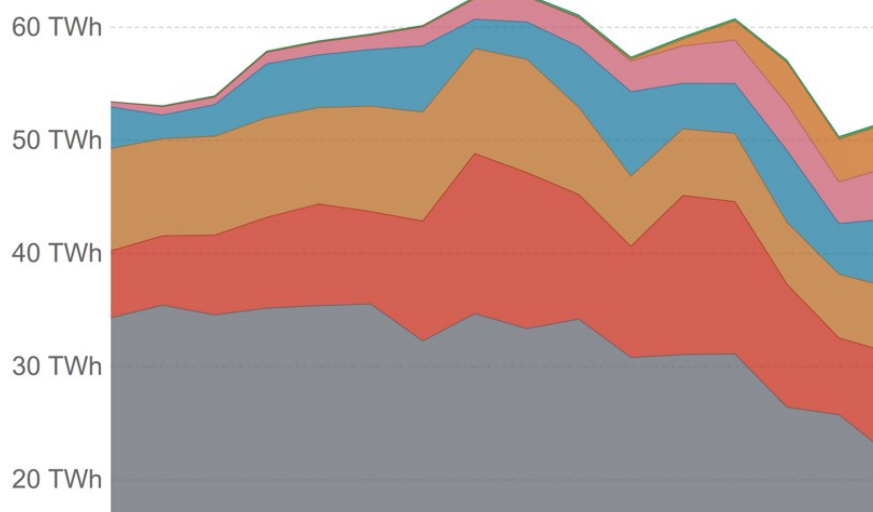
Διαχρονική εξέλιξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα – Διασυνδεδεμένο σύστημα (1957-2020)



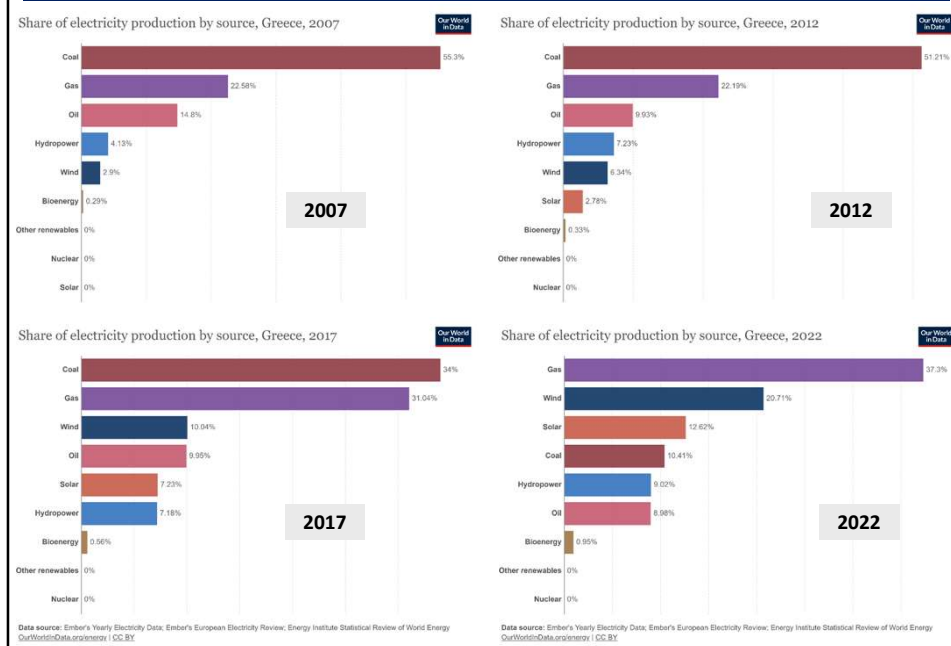
Πηγή: Στεφανάκος, Ι., Ο ρόλος των υδροηλεκτρικών έργων στο ενεργειακό σύστημα της χώρας, Ημερίδα: Ενεργειακή αυτοδυναμία της Ελλάδας στα πλαίσια της ευρωπαϊκής πολιτικής για την ενέργεια, Ακαδημία Αθηνών, 2021.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (2000-2020)

Electricity production by source, Greece



Εξέλιξη ενεργειακού μίγματος Ελλάδας (2007-2022)



Μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (έτος 2022)

- Συνολική εγκατεστημένη ισχύς: 21.46 GW (19.78 GW το 2021)
- Συνολική ζήτηση ενέργειας: 50.69 TWh (52.40 TWh το 2021)
 - Εγχώρια παραγωγή: 47.24 TWh
 - Ισοζύγιο διασυνδέσεων: 3.45 TWh
- Ελάχιστη ζητούμενη ισχύς: 3.29 GW (25/04/2022 5:00)
- Μέγιστη ζητούμενη ισχύς: 9.51 GW (28/7/2022 14:00)
- Ρεκόρ ισχύος: 10.72 GW (5/8/2021 15:00)

	Ισχύς (MW)	Ποσοστό	Παραγωγή	Συντ. δυναμ.
Φωτοβολταϊκά (Φ/Β)	5 788	27.0%	8 969	17.7%
Φυσικό αέριο	4 935	23.0%	17 949	41.5%
Αιολικά	4 828	22.5%	9 504	22.5%
Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα (ταμιευτήρες)	3 171	14.8%	4 005	14.4%
Λιγνίτης (απόσυρση έως το 2030)	2 069	9.6%	5 586	30.8%
ΜΥΗΣ (υδροηλεκτρικοί σταθμοί < 15 MW)	281	1.3%	125	5.1%
Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού-θερμότητας (ΣΗΘΥΑ)	256	1.2%	1 056	47.1%
Βιομάζα	131	0.6%		
Σύνολο	21 460		47 193	25.1%

Πηγή: ΑΔΜΗΕ, Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας – Ιανουάριος 2023, 2^η έκδοση, μετά από επεξεργασία

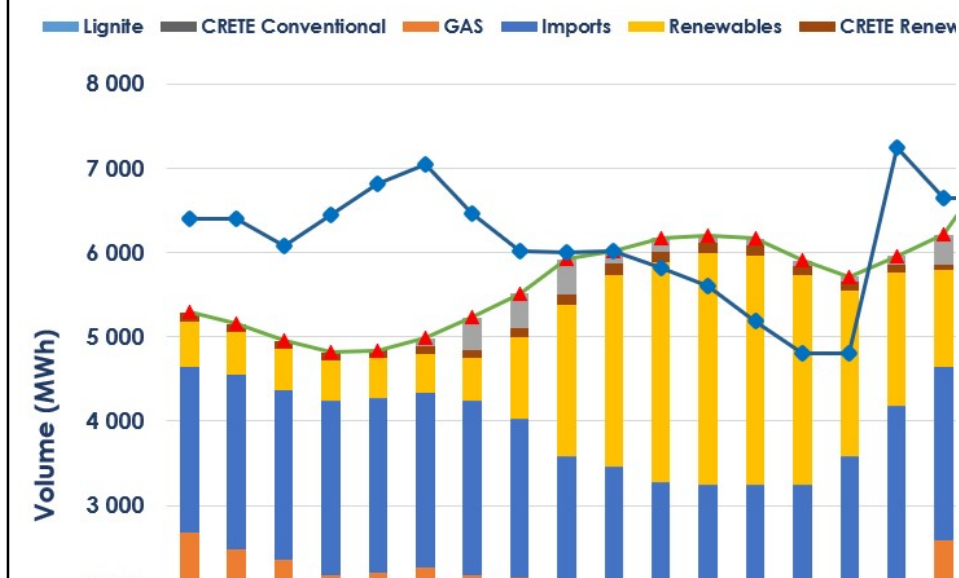
Ανάλυση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (έτος 2022)

	Παραγωγή (GWh)	Ποσοστό
Λιγνίτης	5 586	11.0%
Φυσικό αέριο	17 949	35.4%
Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα	4 005	7.9%
Λοιπά καύσιμα	27	0.1%
Σύνολο από συμβατικές μονάδες	27 566	54.4%
Φωτοβολταϊκά συστήματος	606	1.2%
Αιολικά συστήματος	9 504	18.8%
Μικρά υδροηλεκτρικά έργα	125	0.2%
Συμπαγωγή ηλεκτρισμού-θερμότητας	1 056	2.1%
Παραγωγή στο δίκτυο (ΑΠΕ, κυρίως Φ/Β)	8 363	16.5%
Διασύνδεση Κρήτης (ΑΠΕ)	20	0.0%
Σύνολο από ΑΠΕ	19 674	38.8%
Εισαγωγές	7 751	
Εξαγωγές	-4 303	
Ισοζύγιο διασυνδέσεων	3 448	6.8%
Σύνολο	50 688	

Διαχείριση ηλεκτρικής ενέργειας

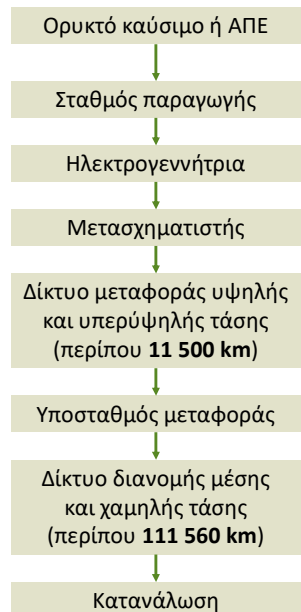
- **Βασική λειτουργική απαίτηση:** Προσαρμογή της παραγωγής ενέργειας από τις διάφορες συνιστώσες του ενεργειακού μίγματος, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, στη ζήτηση
- Η διαχείριση της ηλεκτροπαραγωγής γίνεται σε διάφορες **χρονικές κλίμακες**:
 - Προγραμματισμός επόμενης ημέρας (day-ahead), ανά ώρα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

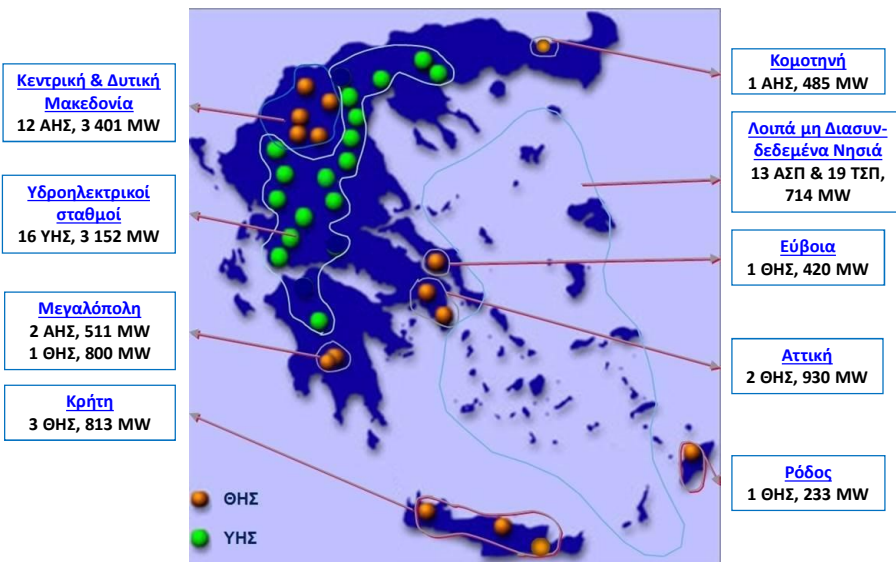


Βασικές αρχές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

- 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 μικρότερες 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



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)

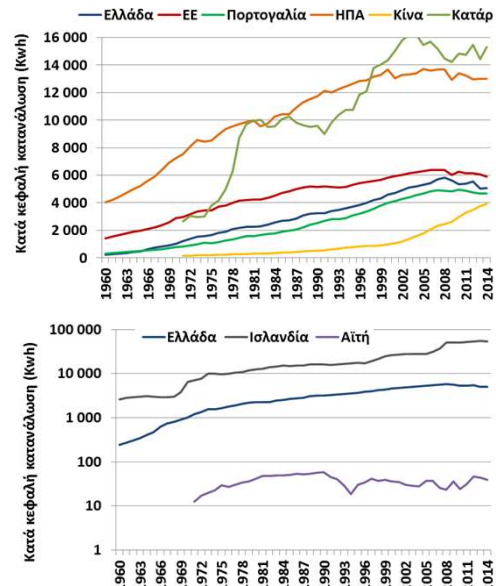
- Μεγάλες διακυμάνσεις της ζήτησης ενέργειας μεταξύ της χειμερινής και θερινής περιόδου (τουρισμός) και μεταξύ ημέρας και νύχτας
- 32 αυτόνομα νησιωτικά ηλεκτρικά συστήματα, που εξυπηρετούνται από τοπικούς πετρελαϊκούς σταθμούς
- Υψηλό κόστος παραγωγής ενέργειας (μεταφορά καυσίμου) και συντήρησης δικτύων (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)

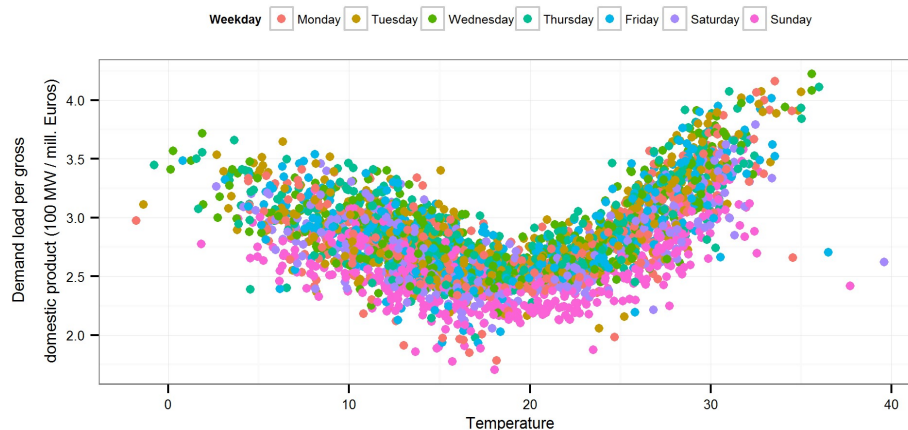
Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

- 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)



Πηγή: Παγκόσμια Τράπεζα (<https://data.worldbank.org/>)

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/>).

Ισχύς οικιακών συσκευών

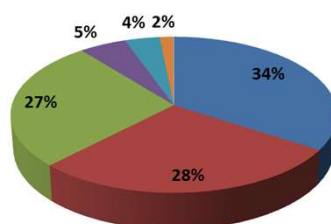
Συσκευή	Ισχύς (W)
Αυτόματος τηλεφωνητής	3
Αερόθερμο	2000
Αναμονή στερεοφωνικού ή tv	8
Ανεμιστήρας οροφής	150
Αποκωδικοποιητής τηλεόρασης	15
Βίντεο	33
Η/Υ	80-350
Ηλεκτρική σκούπα	700-2000
Ηλεκτρικό θερμαντικό σώμα	2000
Ηλεκτρικό σίδερο	1000
Θερμοσίφωνα	2000-4000
Καταψύκτης	300-700
Καφετιέρα	900
Κλιματιστικό (ψύξη 9000 Btu)	1000

Συσκευή	Ισχύς (W)
Κουζίνα: μεγάλο μάτι	2000
Κουζίνα: μεσαίο μάτι	1500
Κουζίνα: φούρνος απλός	2700
Λαμπτήρας κοινός	100
Λαμπτήρας χαμηλής κατανάλωσης	20
Μίξερ	180
Πλυντήριο πιάτων μεγάλο	700-3000
Πλυντήριο ρούχων	500-5000
Στεγνωτήρας μαλλιών	800-2000
Στερεοφωνικό	30
Τηλεόραση	80-300
Φούρνος μικροκυμάτων	700-2100
Φριτέζα	1600
Ψυγείο	200-700

Γενικά στοιχεία κατανάλωσης Η/Ε για την Ελλάδα

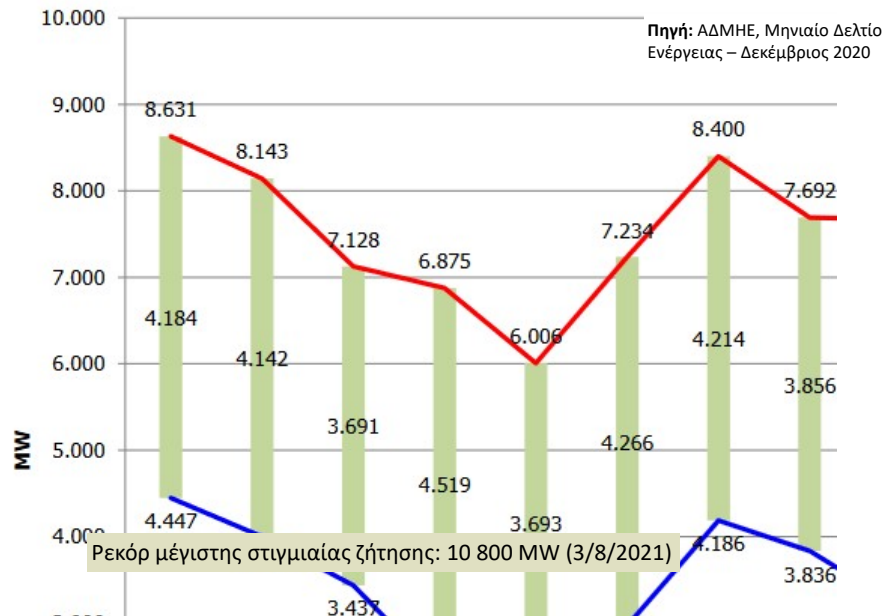
- Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι της τάξης των **50 TWh/έτος**.
- Η τρέχουσα κατά κεφαλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται σε 5.0-5.5 MWh/έτος, ενώ το 1990 ήταν της τάξης των 3.0 kWh/έτος.
- Η τρέχουσα τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος για οικιακή χρήση ξεκινά από περίπου 0.11 €/kWh (0.08 €/kWh για νυκτερινή κατανάλωση).
- Καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια κατά τους μήνες με ακραίες θερμοκρασίες (χειμώνα, καλοκαίρι) και λιγότερη κατά τους μεταβατικούς μήνες (άνοιξη, φθινόπωρο).
- Καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια τις καθημερινές από ότι τα Σαββατοκύριακα.
- Εκλύονται περίπου 0.875 kg CO₂ ανά παραγόμενη kWh.
- Οι συνθήκες θερμικής άνεσης αντιστοιχούν σε θερμοκρασία 20 °C και σχετική υγρασία από 40 έως 60%.

Κατανομή χρήσεων ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα – Μέσες τιμές ετών 2002-2012 (σύνολο 51.2 TWh)

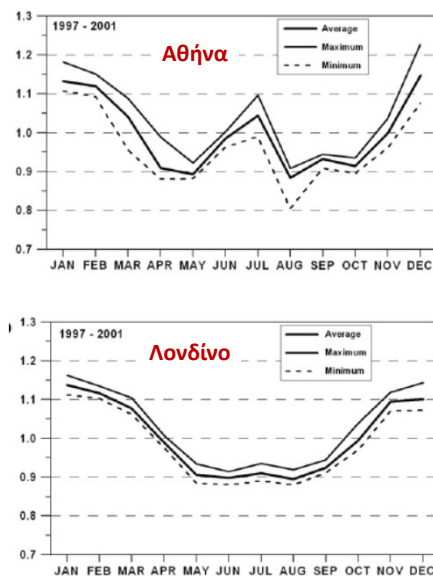


- Οικιακή χρήση (17.5 TWh)
- Εμπορική χρήση (14.4 TWh)
- Βιομηχανική χρήση (13.8 TWh)
- Γεωργική χρήση (2.7 TWh)
- Δημόσια-δημοτική χρήση (2.0 TWh)
- Φωτισμός οδών (0.8 TWh)

Μέγιστη και ελάχιστη ωριαία ζήτηση Η/Ε έτους 2020



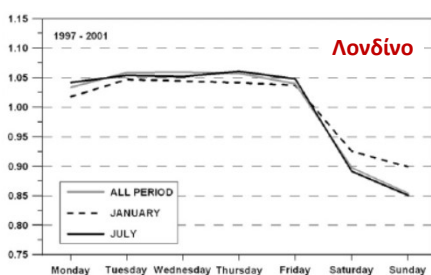
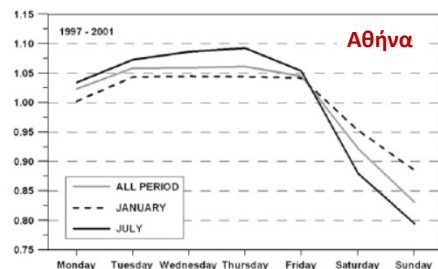
Σύγκριση Αθήνας-Λονδίνου (έτη 1997-2001): Εξέλιξη αδιαστατοποιημένης ζήτησης στη μηνιαία κλίμακα



- Και στις δύο πόλεις υπάρχει **εποχιακή διακύμανση**, με τους χειμωνιάτικους μήνες να απαιτείται περισσότερη ενέργεια (για θέρμανση)
- Η Αθήνα (όπως και άλλες μεσογειακές πόλεις) παρουσιάζει **δεύτερη αιχμή τους καλοκαιρινούς μήνες** λόγω της ζήτησης ενέργειας για ψύξη
- **Αθήνα**: μέγιστη ζήτηση τον Δεκέμβριο (Χριστούγεννα, χαμηλή θερμοκρασία), ελάχιστη τον Αύγουστο (μετακίνηση πληθυσμού)
- **Λονδίνο**: δεν παρατηρείται η καλοκαιρινή αιχμή (λόγω θερμοκρασιακής άνεσης)

Πηγή: Psiloglou, B.E., C. Giannakopoulos, S. Majithia, and M. Petrakis, Factors affecting electricity demand in Athens, Greece and London, UK: A comparative assessment, *Energy*, 34(11), 1855-1863, doi:10.1016/j.energy.2009.07.033, 2009.

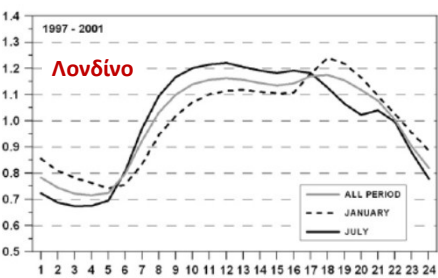
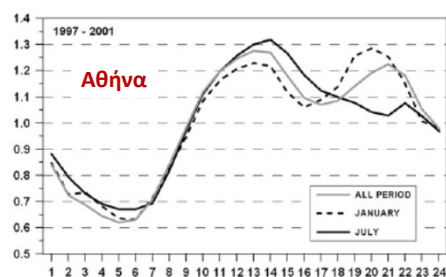
Σύγκριση Αθήνας-Λονδίνου (έτη 1997-2001): Εξέλιξη αδιαστατοποιημένης ημερήσιας ζήτησης στην εβδομάδα



- Και στις δύο πόλεις παρατηρείται **σημαντική μείωση της ζήτησης τα Σαββατοκύριακα** λόγω μείωσης των εμπορικών δραστηριοτήτων, καθώς και τη Δευτέρα λόγω αδράνειας.
- Το Σαββατοκύριακα παρατηρούνται μικρότερες ζητήσεις τον Ιούλιο σε σχέση με τον Δεκέμβριο, λόγω των εξόδων στην ύπαιθρο.

Πηγή: Psiloglou, B.E., C. Giannakopoulos, S. Majithia, and M. Petrakis, Factors affecting electricity demand in Athens, Greece and London, UK: A comparative assessment, *Energy*, 34(11), 1855-1863, doi:10.1016/j.energy.2009.07.033, 2009.

Σύγκριση Αθήνας-Λονδίνου (έτη 1997-2001): Εξέλιξη αδιαστατοποιημένης ωριαίας ζήτησης στην ημέρα



- Στην Αθήνα παρατηρείται αιχμή το μεσημέρι, λόγω δραστηριοτήτων, και δεύτερη αιχμή το βράδυ, λόγω φωτισμού
- Στο Λονδίνο η ζήτηση μέχρι το απόγευμα είναι σχεδόν σταθερή, γιατί πολλές δραστηριότητες συνεχίζονται
- Στη Αθήνα η βραδινή αιχμή τον Ιούλιο εξαφανίζεται, γιατί οι άνθρωποι παραμένουν έξω από τα σπίτια τους.

Πηγή: Psiloglou, B.E., C. Giannakopoulos, S. Majithia, and M. Petrakis, Factors affecting electricity demand in Athens, Greece and London, UK: A comparative assessment, *Energy*, 34(11), 1855-1863, doi:10.1016/j.energy.2009.07.033, 2009.

Κατανομή χρήσεων ανά Περιφέρεια (2002-2012)

