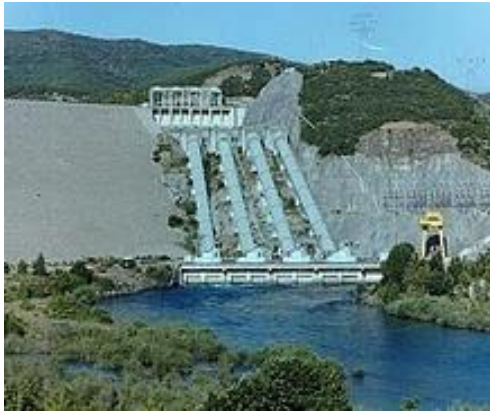


Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1^ο και 5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Ηλεκτρική ενέργεια: παραγωγή, μεταφορά, κατανάλωση



Νίκος Μαμάσης & Ανδρέας Ευστρατιάδης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2021-22

Βασικές αρχές ηλεκτρικής ενέργειας

- Μια από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις της ύλης είναι η **ηλεκτρομαγνητική**.
- Υπεύθυνο για την αλληλεπίδραση αυτή είναι το **ηλεκτρικό φορτίο**, το οποίο αποτελεί ιδιότητα των 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.
- Ο συνήθης τρόπος για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα έγκειται στην περιστροφή ενός πηνίου εντός μαγνητικού πεδίου (**Νόμος Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής – Faraday, 1831**).
- Συνεπώς, αρχικά απαιτείται μια **εξωτερική πηγή ενέργειας** ώστε να παραχθεί **μηχανικό έργο** για την περιστροφή του πηνίου:
 - Σε συστήματα **καύσης** (ορυκτά καύσιμα, γεωθερμία), το μηχανικό έργο προκύπτει μέσω της **παραγωγής ατμού**, ο οποίος οδηγείται σε στρόβιλο, που με τη σειρά του κινεί την ηλεκτρογεννήτρια.
 - Στα συστήματα αξιοποίησης της **αιολικής, υδραυλικής και θαλάσσιας** ενέργειας (από κύματα, ρεύματα και παλίρροιες), η ηλεκτρογεννήτρια κινείται από το ρεύμα κάποιου ρευστού.
- Εξαίρεση αποτελεί η παραγωγή ηλεκτρισμού από Φ/Β μονάδες, η οποία βασίζεται στο **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**, και διάφορες πειραματικές μορφές θαλάσσιας ενέργειας.

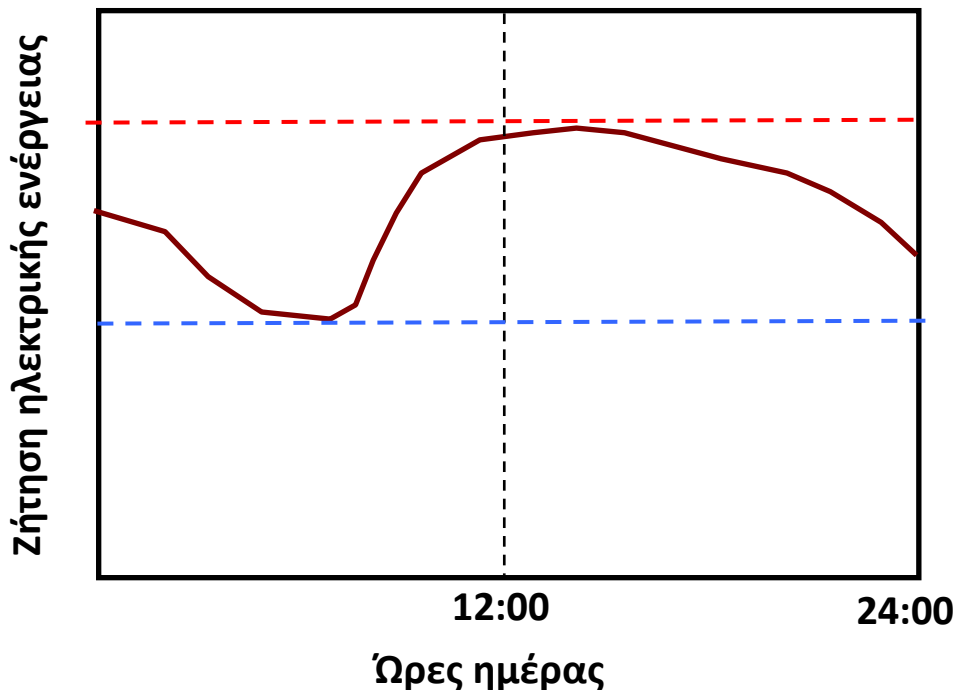
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας – ενεργειακό μίγμα

- Βασικά πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η **ευκολία μεταφοράς της από τις πηγές στην κατανάλωση** και η **ευκολία μετατροπής της σε άλλες μορφές ενέργειας** (θερμότητα, ακτινοβολία, μηχανική ενέργεια, χημική ενέργεια).
- Το βασικό της μειονέκτημα είναι η **μη δυνατότητα αποθήκευσής της**, παρά μόνο σε πολύ μικρή κλίμακα, το οποίο επιβάλλει συγχρονισμό της παραγόμενης ενέργειας με την αντίστοιχη καταναλισκόμενη
- Διαχείριση **πλεονασμάτων**:
 - Απόρριψη φορτίου – καταστροφή ενέργειας
 - Εξαγωγές
 - Αποθήκευση (μπαταρίες, αντλησιοταμίευση)
- Διαχείριση **ελλειμμάτων**
 - Διατήρηση εφεδρικών πηγών σε λειτουργία
 - Εισαγωγές
- Βασικά στοιχεία κατά την κατάρτιση του **ενεργειακού μίγματος** ενός συστήματος:
 - Χρονική διακύμανση ζήτησης σε διάφορες χρονικές κλίμακες (μονάδες βάσης, μονάδες αιχμής)
 - Ασφάλεια συστήματος (εφεδρικές πηγές)
 - Περιορισμοί δικτύου (μεταφορά, διανομή)

Διαχείριση ηλεκτρικής ενέργειας

Η τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου διέπεται από δύο βασικούς περιορισμούς:

- Το δίκτυο πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς, με τόση ενέργεια όση καταναλώνεται (πολύ μικρές αποκλίσεις μπορούν να απορροφηθούν από το δίκτυο μεταφοράς, της τάξης του 1-2%). Συνεπώς, **η παραγωγή ενέργειας πρέπει να μεταβάλλεται συνεχώς και να προσαρμόζεται στη ζήτηση.**
- **Ο χρόνος ενεργοποίησης και μεταβολής του φορτίου των σταθμών παραγωγής είναι διαφορετικός.** Κυμαίνεται από αρκετές ώρες για τις λιγνιτικές μονάδες, αρκετά λεπτά για τους σταθμούς φυσικού αερίου, ως λίγα λεπτά για τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

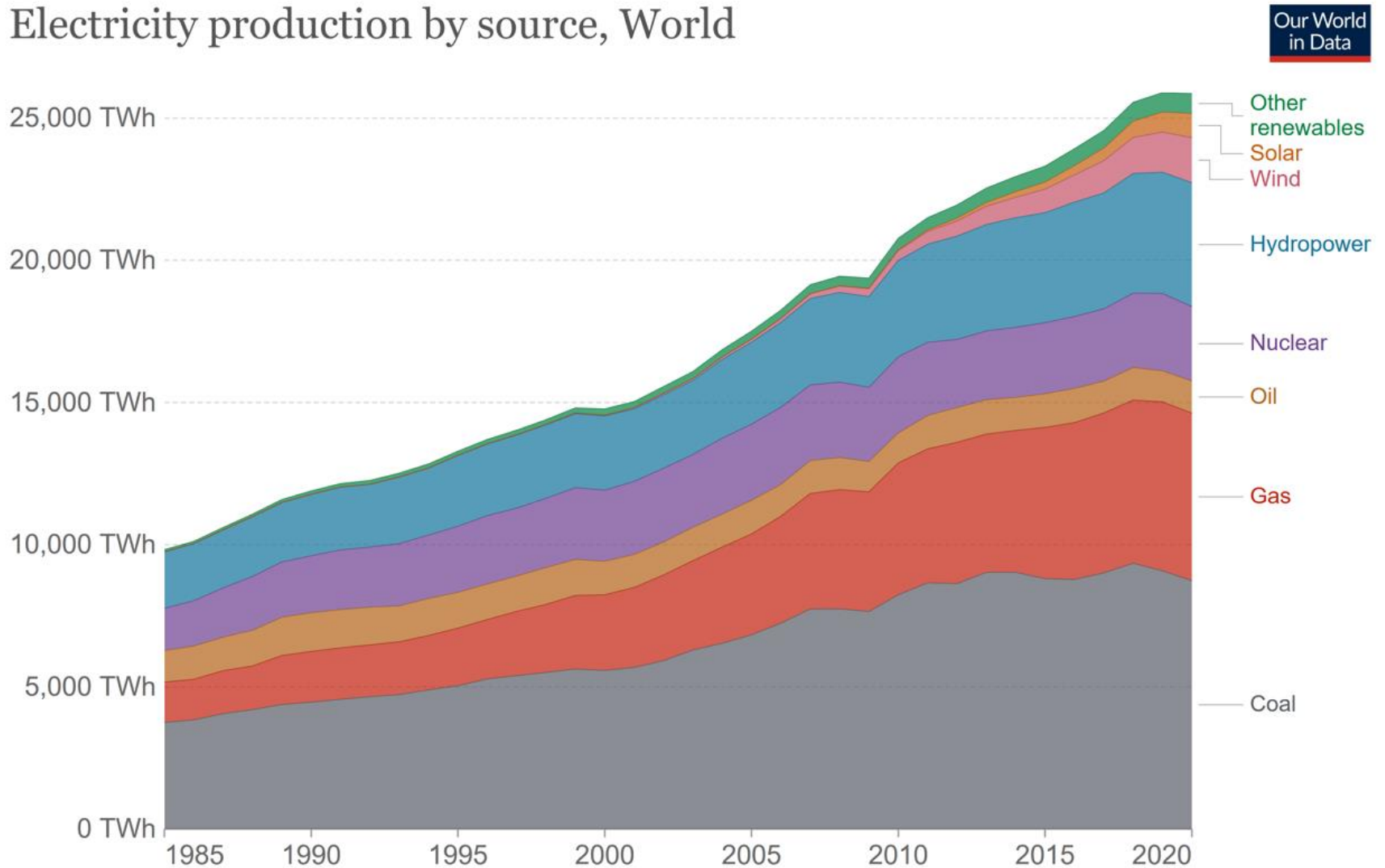


Οι αιχμές ζήτησης φορτίου καθορίζουν τη συνολική ισχύ που πρέπει να υπάρχει εγκατεστημένη (μονάδες αιχμής)

Το κατώφλι ζήτησης φορτίου καθορίζει την τιμή της ισχύος που αδιάλειπτα πρέπει να παρέχεται (μονάδες βάσης)

Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (1985-2020)

Electricity production by source, World

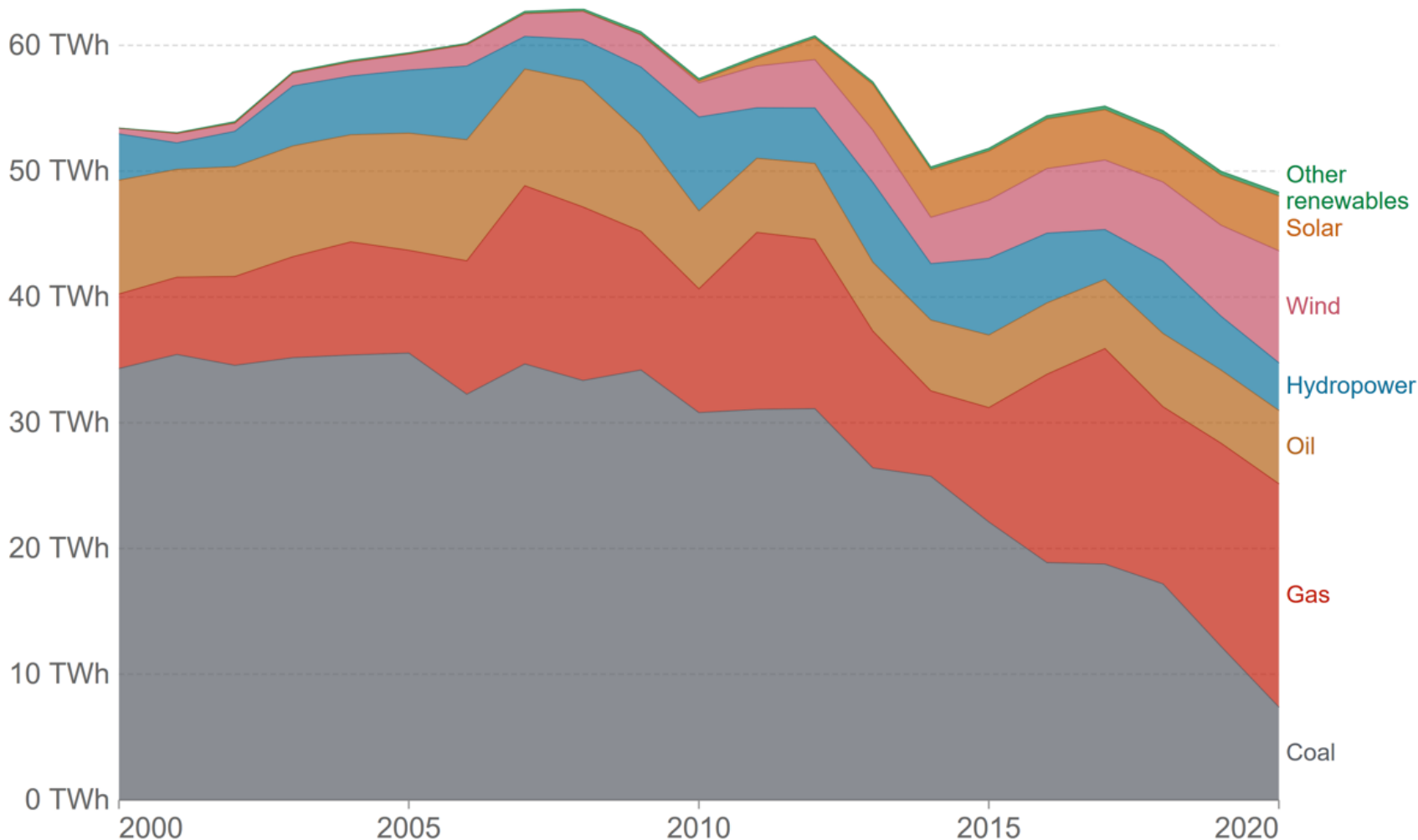


Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember (2021)
Note: 'Other renewables' includes biomass and waste, geothermal, wave and tidal.

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (2000-2020)

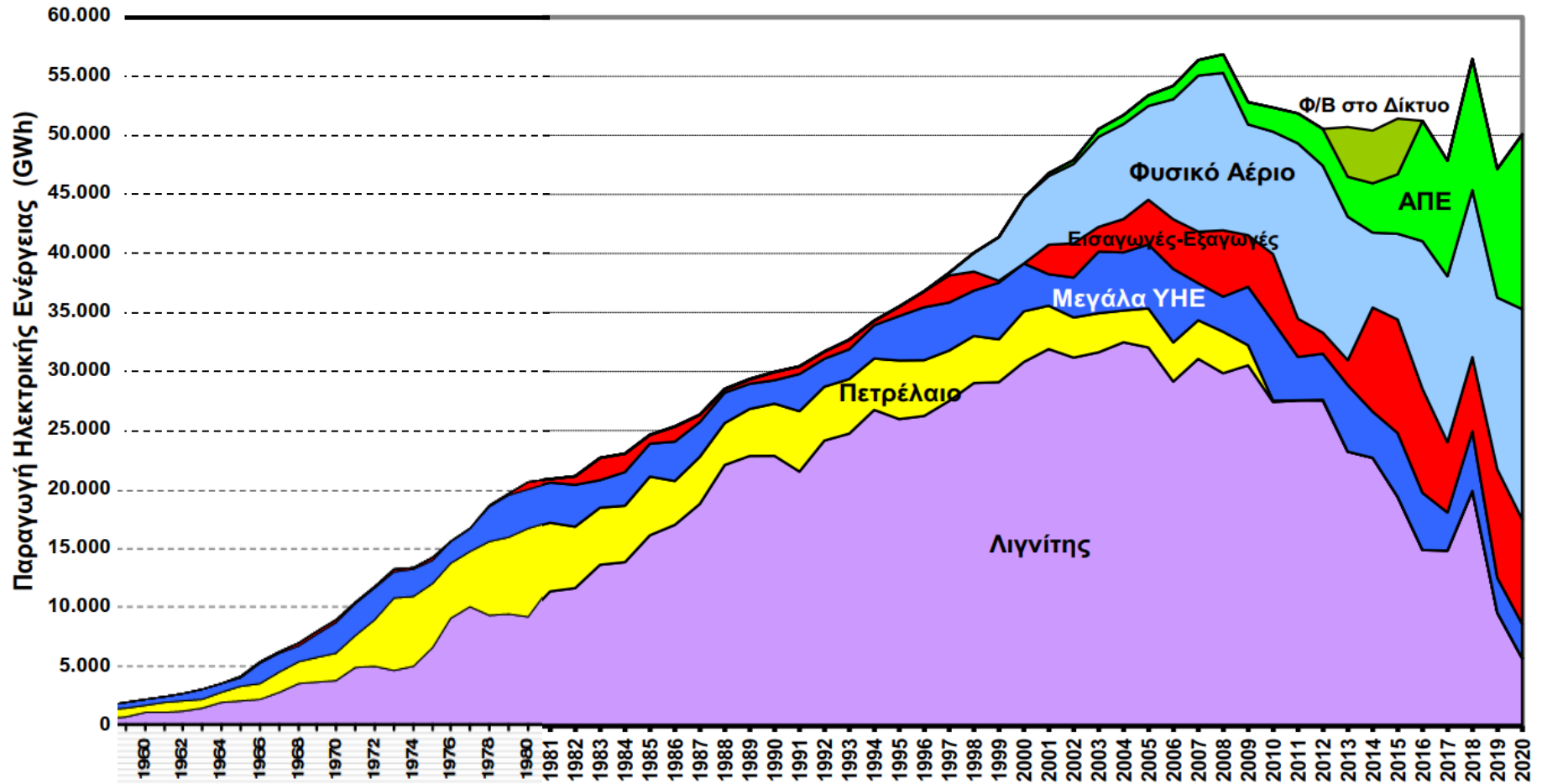
Electricity production by source, Greece



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember (2021)
Note: 'Other renewables' includes biomass and waste, geothermal, wave and tidal.

OurWorldInData.org/energy • CC BY

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

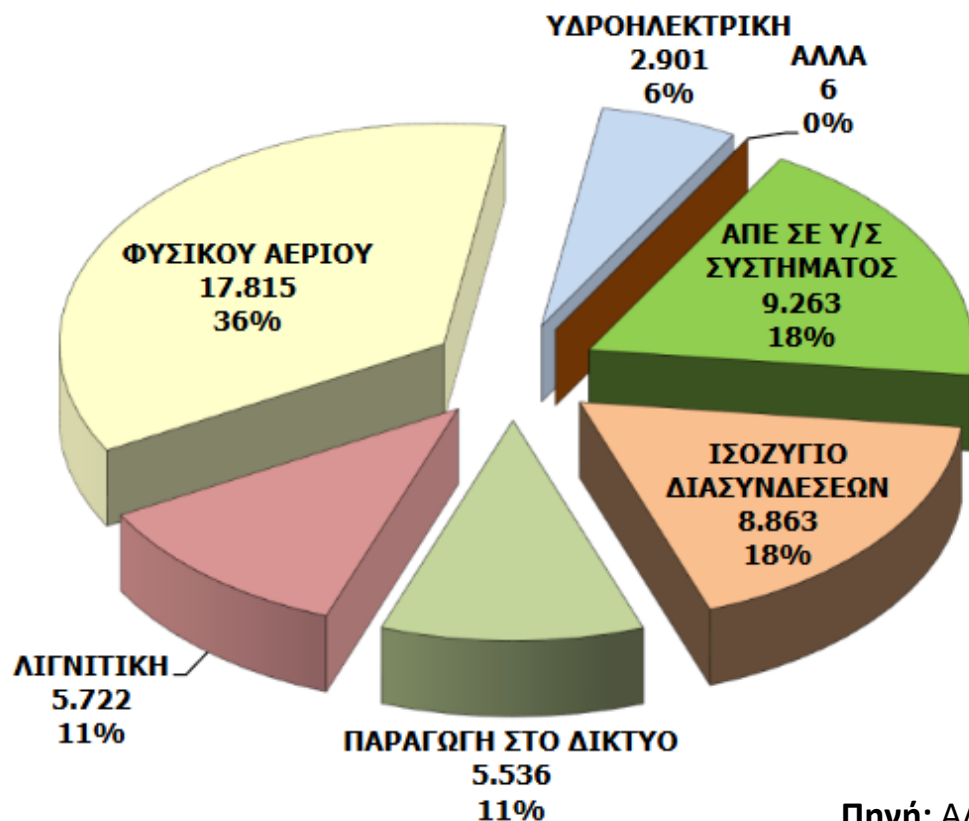


Πηγή: Στεφανάκος, Ι., Ο ρόλος των υδροηλεκτρικών έργων στο ενεργειακό σύστημα της χώρας, Ημερίδα: *Ενεργειακή αυτοδυναμία της Ελλάδας στα πλαίσια της ευρωπαϊκής πολιτικής για την ενέργεια*, Ακαδημία Αθηνών, 2021.

Μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (έτος 2020)

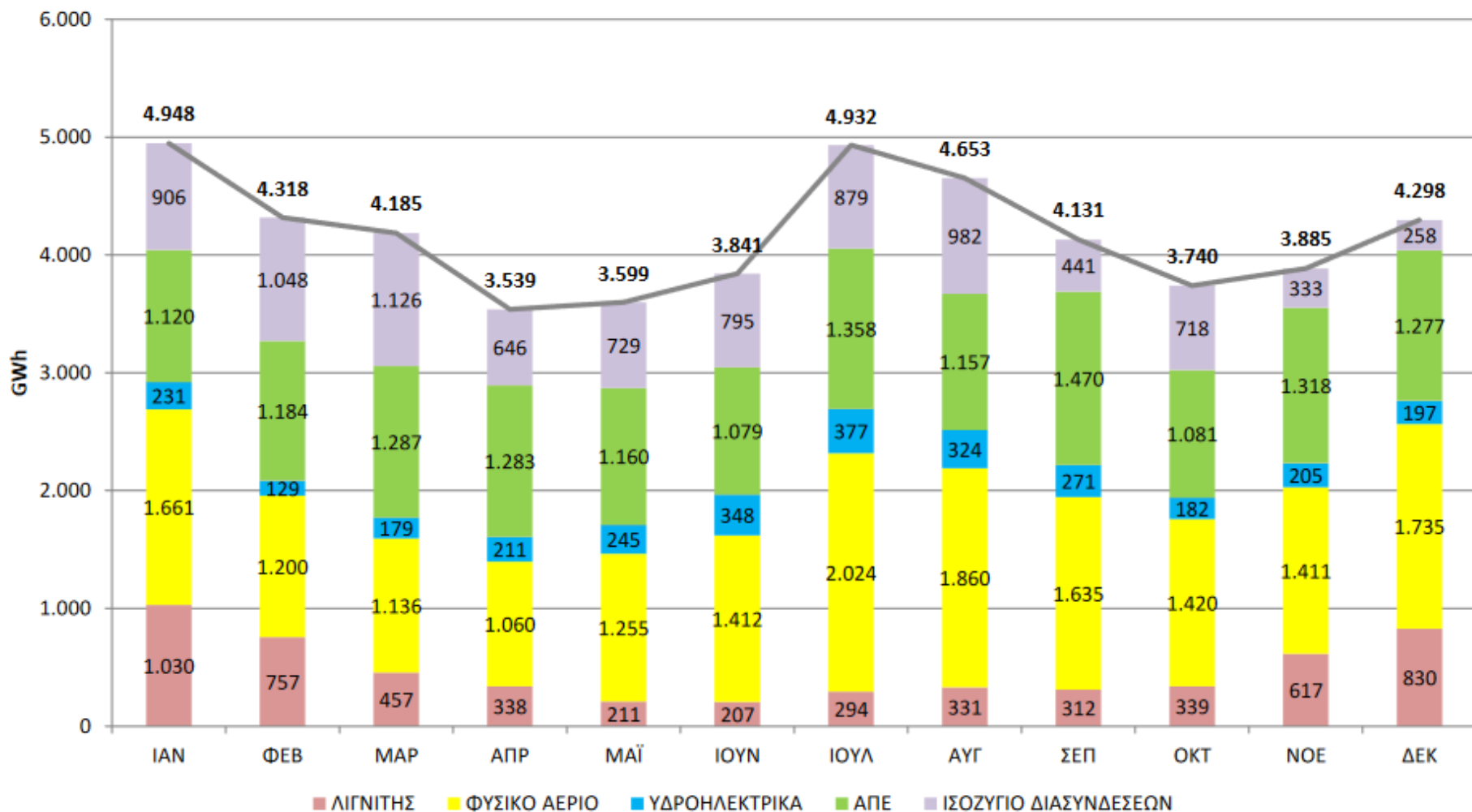
Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ηλεκτροπαραγωγής: **19 407 MW** (έναντι 18 330 MW το 2019)

- Λιγνιτικές μονάδες: 3 904 MW (20%)
- Μονάδες φυσικού αερίου: 5 212 MW (27%)
- Υδροηλεκτρικές μονάδες (ταμιευτήρες): 3 171 MW (16%)
- ΑΠΕ (κυρίως αιολικά και Φ/Β): 7 120 MW (37%)



Παραγωγή ενέργειας και ισοζύγιο διασυνδέσεων (= εισαγωγές - εξαγωγές): **50 106 GWh**

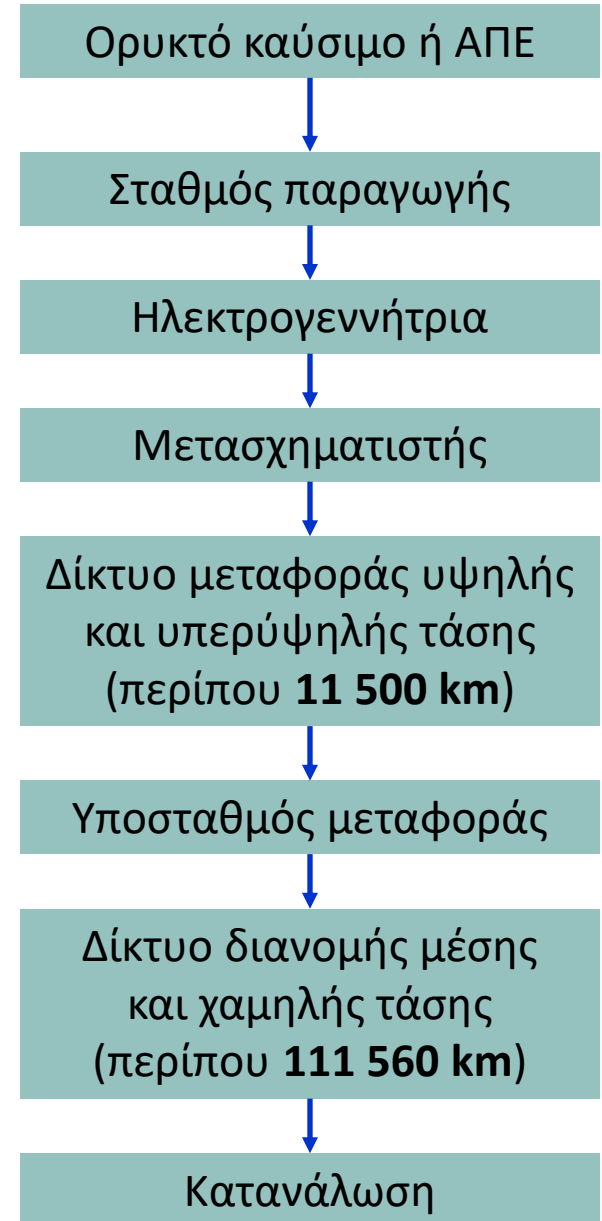
Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο και ισοζύγιο διασυνδέσεων (έτος 2020)



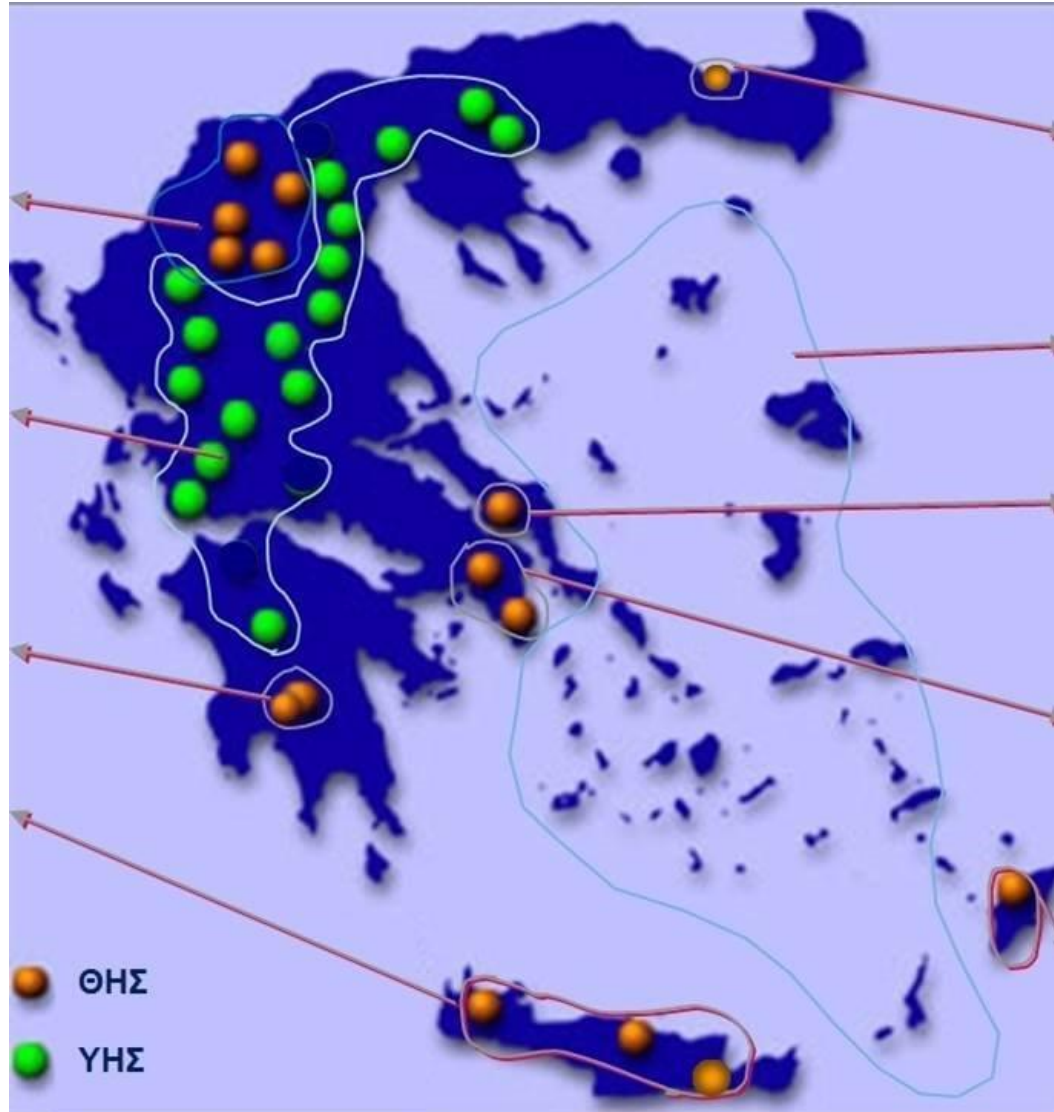
Πηγή: ΑΔΜΗΕ, Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας – Δεκέμβριος 2020 (https://www.admie.gr/sites/default/files/attached-files/type-file/2021/01/Energy_Report_202012_v1_0.pdf).

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 μεταφοράς**, η τιμή της τάσης υποβιβάζεται στη ζητούμενη τάση του δικτύου διανομής, που περιλαμβάνει:
 - ❑ το δίκτυο διανομής **μέσης τάσης** (20 kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
 - ❑ το δίκτυο διανομής **χαμηλής τάσης** (220/380 V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.



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

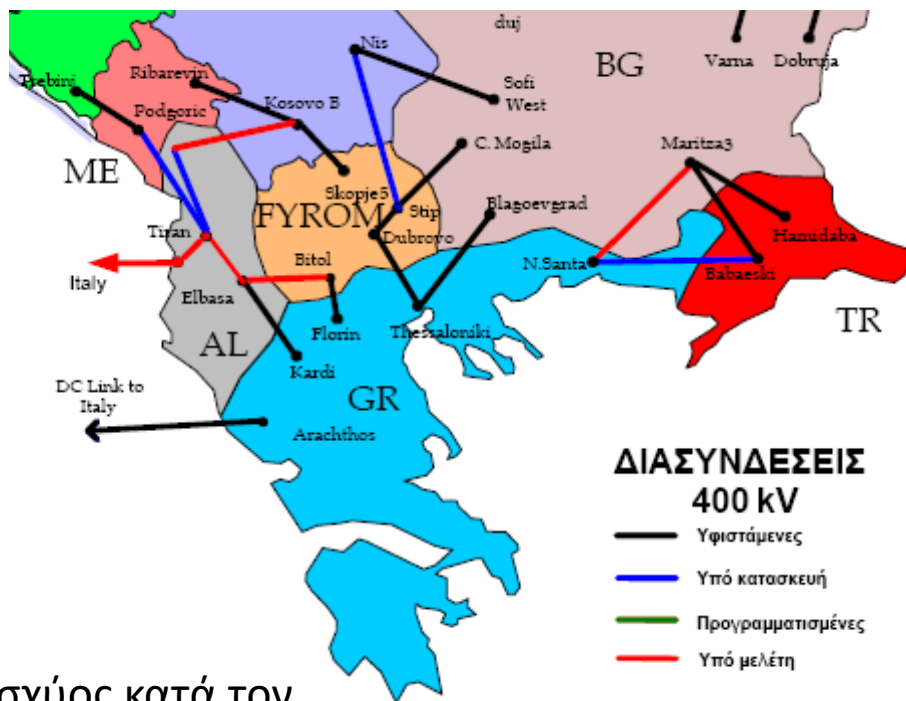
Εύβοια
1 ΘΗΣ, 420 MW

Αττική
2 ΘΗΣ, 930 MW

Ρόδος
1 ΘΗΣ, 233 MW

Ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

- Το 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).



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

Η περίπτωση των μη διασυνδεδεμένων νησιών (ΜΔΝ)

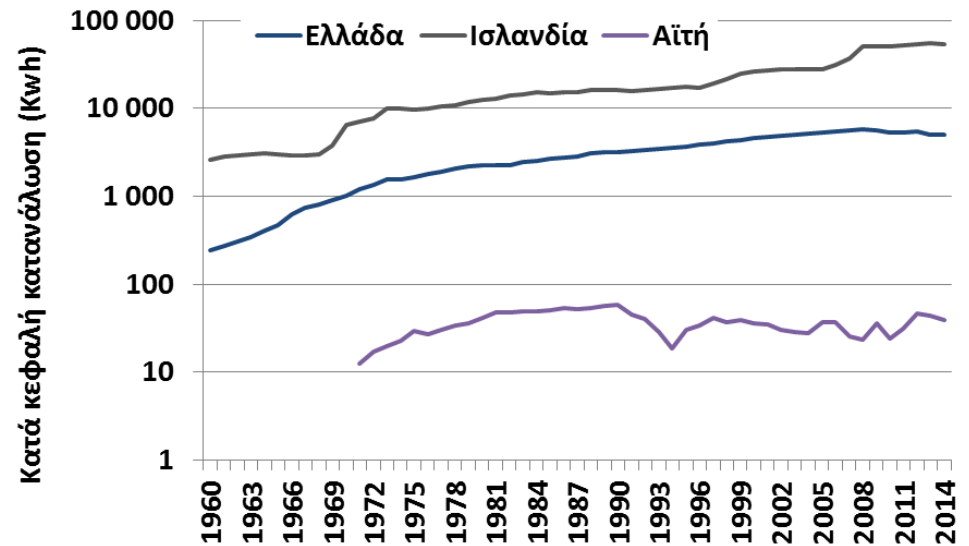
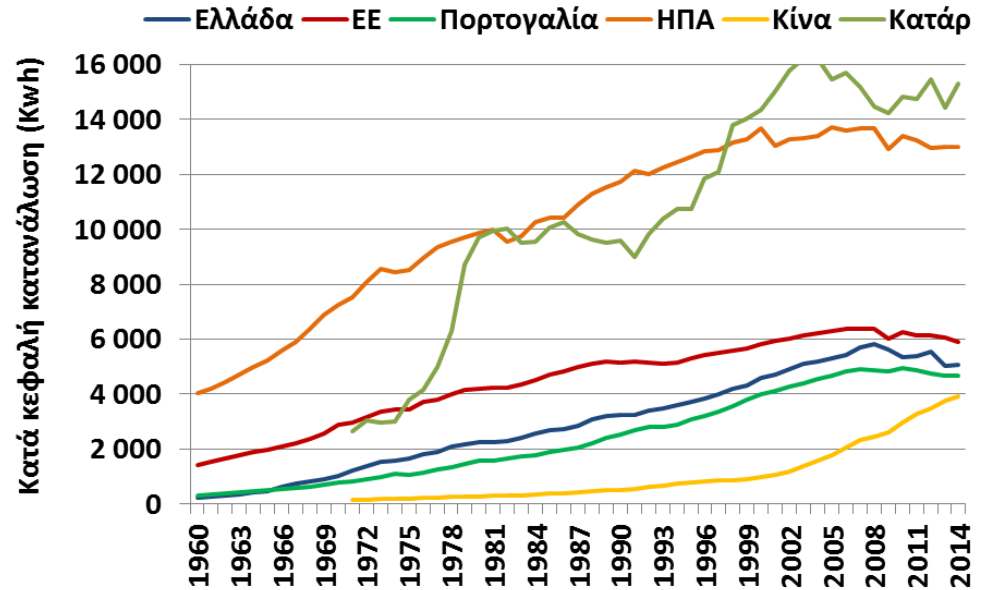
- Μεγάλες διακυμάνσεις της ζήτησης ενέργειας μεταξύ της χειμερινής και θερινής περιόδου (τουρισμός) και μεταξύ ημέρας και νύχτας
- 32 αυτόνομα νησιωτικά ηλεκτρικά συστήματα, που εξυπηρετούνται από τοπικούς πετρελαϊκούς σταθμούς
- Υψηλό κόστος παραγωγής ενέργειας (μεταφορά καυσίμου) και συντήρησης δικτύων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



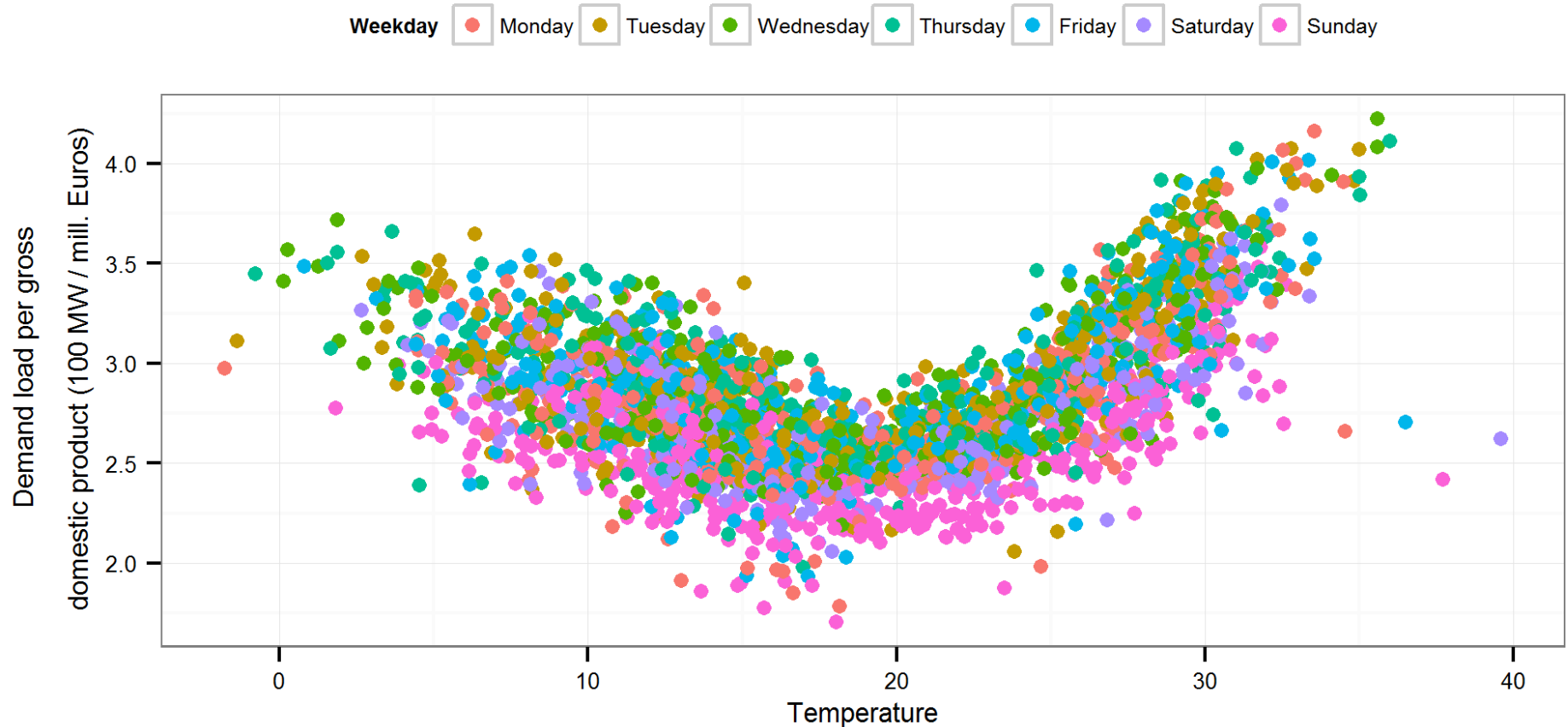
Πηγή: ΡΑΕ (http://www.rae.gr/site/categories_new/electricity/market/mdn.csp)

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: Tyrallis, 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

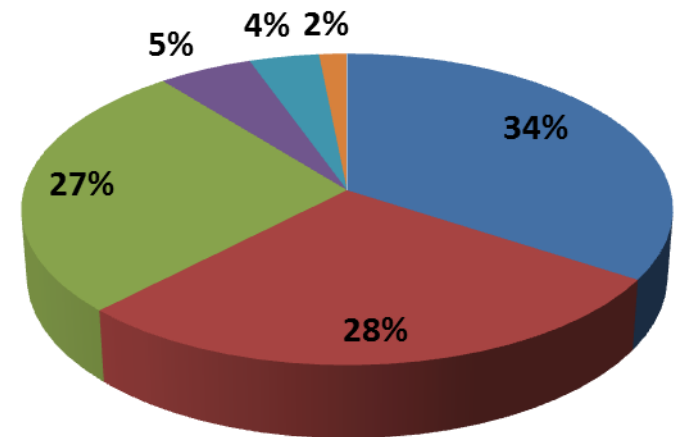
| Συσκευή | Ισχύς (W) |
|------------------------------|-----------|
| Αυτόματος τηλεφωνητής | 3 |
| Αερόθερμο | 2000 |
| Αναμονή στερεοφωνικού ή tv | 8 |
| Ανεμιστήρας οροφής | 150 |
| Αποκωδικοποιητής τηλεόρασης | 15 |
| Βίντεο | 33 |
| Η/Υ | 80-350 |
| Ηλεκτρική σκούπα | 700-2000 |
| Ηλεκτρικό θερμαντικό 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

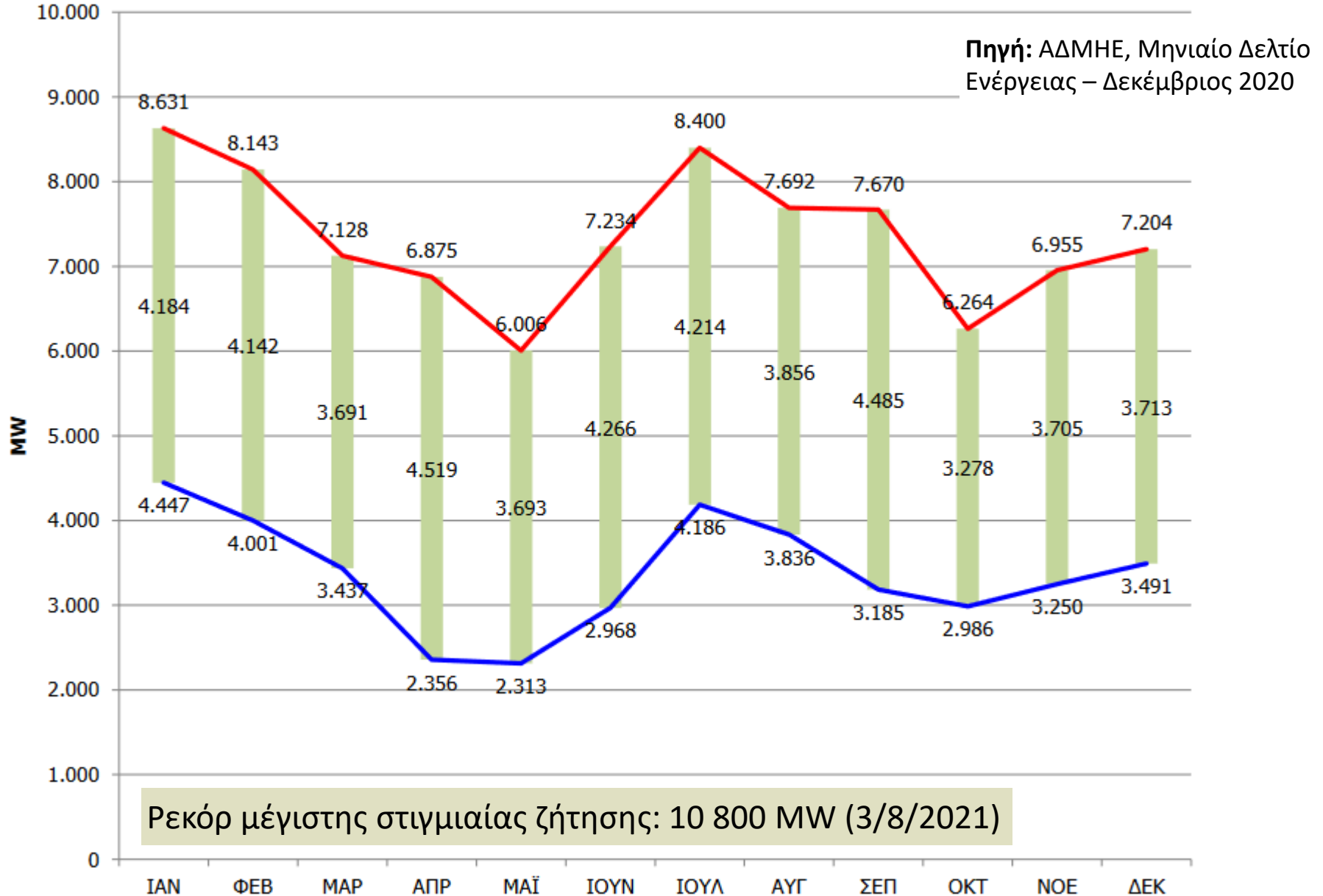
- Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι της τάξης των **50 TWh/έτος**.
- Η τρέχουσα κατά κεφαλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται σε 5.0-5.5 MWh/έτος, ενώ το 1990 ήταν της τάξης των 3.0 kWh/έτος.
- Η τρέχουσα τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος για οικιακή χρήση ξεκινά από περίπου 0.11 €/kWh (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)

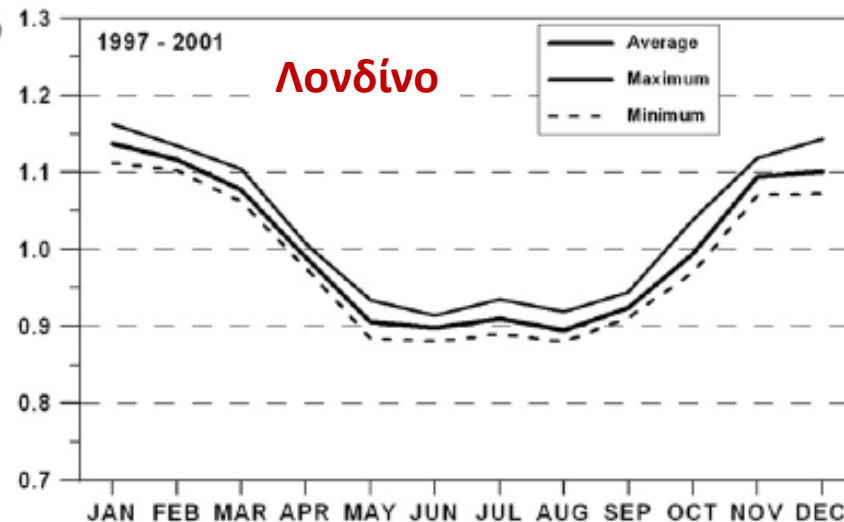
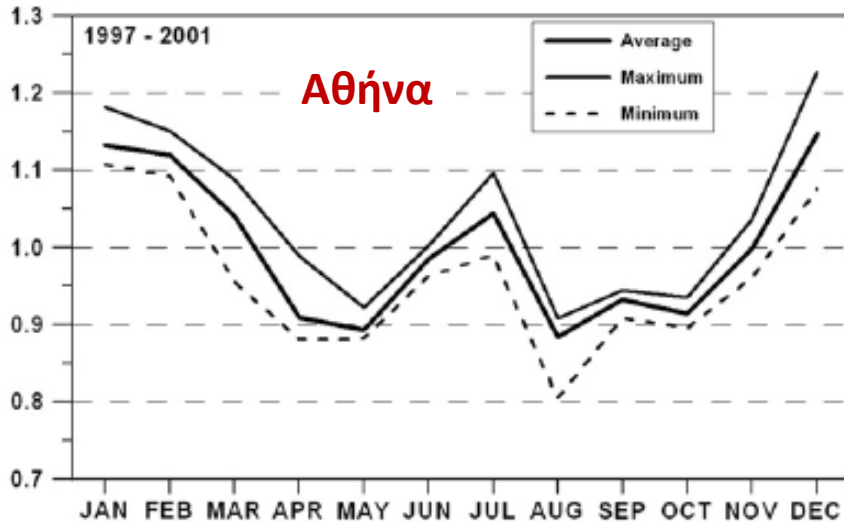


- Οικιακή χρήση (17.5 TWh)
- Εμπορική χρήση (14.4 TWh)
- Βιομηχανική χρήση (13.8 TWh)
- Γεωργική χρήση (2.7 TWh)
- Δημόσια-δημοτική χρήση (2.0 TWh)
- Φωτισμός οδών (0.8 TWh)

Μέγιστη και ελάχιστη ωριαία ζήτηση Η/Ε έτους 2020



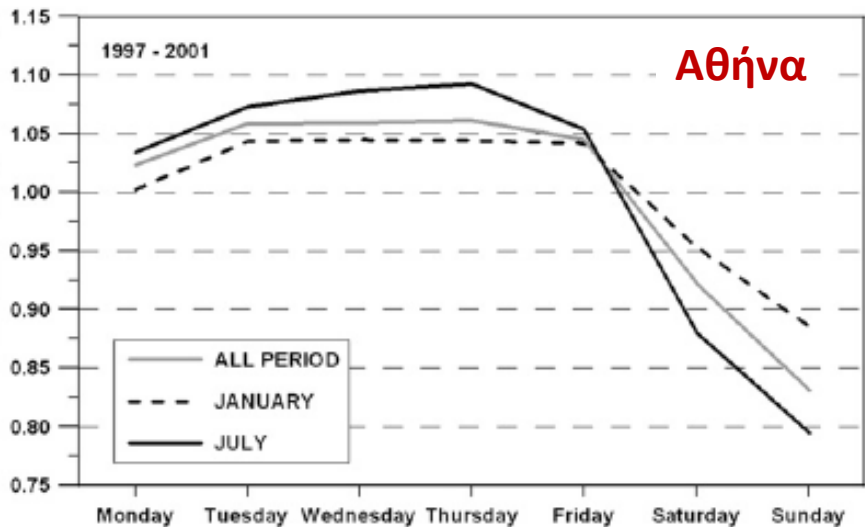
Σύγκριση Αθήνας-Λονδίνου (έτη 1997-2001): Εξέλιξη αδιαστατοποιημένης ζήτησης στη μηνιαία κλίμακα



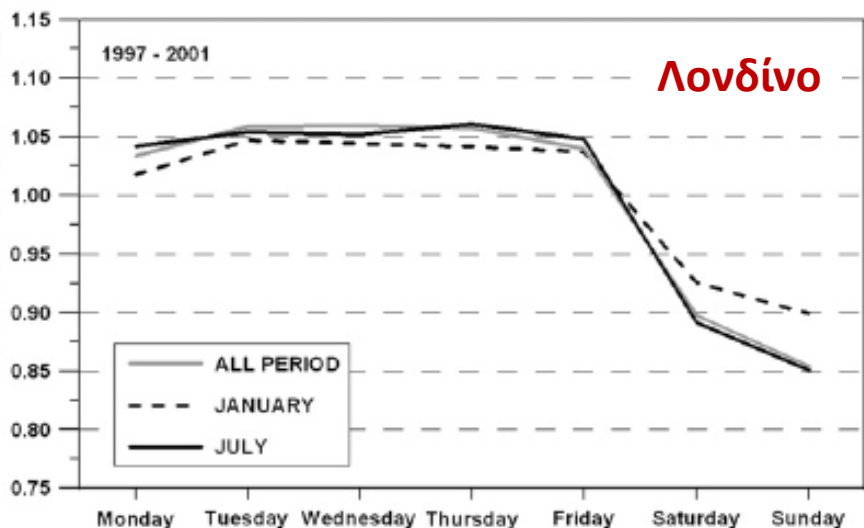
- Και στις δύο πόλεις υπάρχει **εποχιακή διακύμανση**, με τους χειμωνιάτικους μήνες να απαιτείται περισσότερη ενέργεια (για θέρμανση)
- Η Αθήνα (όπως και άλλες μεσογειακές πόλεις) παρουσιάζει **δεύτερη αιχμή τους καλοκαιρινούς μήνες** λόγω της ζήτησης ενέργειας για ψύξη
- **Αθήνα**: μέγιστη ζήτηση τον 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

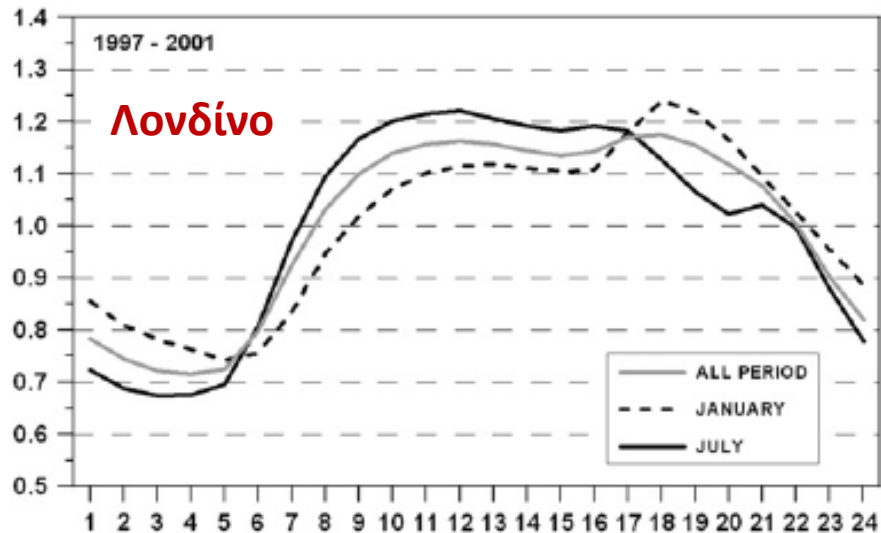
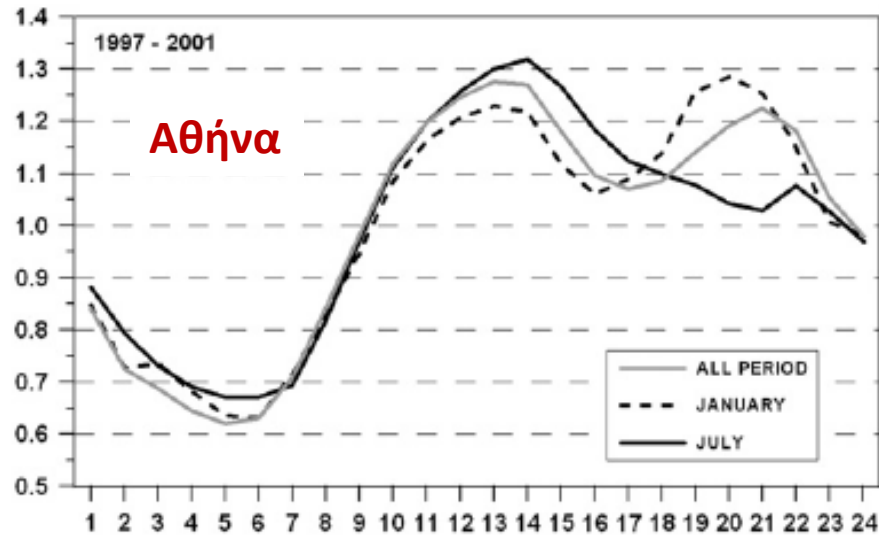


- Και στις δύο πόλεις παρατηρείται σημαντική μείωση της ζήτησης τα **Σαββατοκύριακα** λόγω μείωσης των εμπορικών δραστηριοτήτων, καθώς και τη Δευτέρα λόγω αδράνειας.
- Το Σαββατοκύριακα παρατηρούνται μικρότερες ζητήσεις τον Ιούλιο σε σχέση με τον Δεκέμβριο, λόγω των εξόδων στην ύπαιθρο.



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.

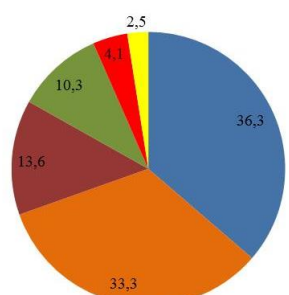
Σύγκριση Αθήνας-Λονδίνου (έτη 1997-2001): Εξέλιξη αδιαστατοποιημένης ωριαίας ζήτησης στην ημέρα



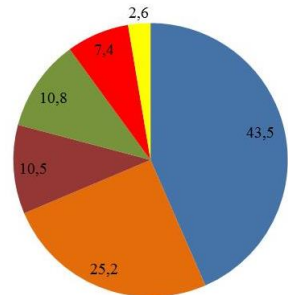
- Στην Αθήνα παρατηρείται αιχμή το μεσημέρι, λόγω δραστηριοτήτων, και δεύτερη αιχμή το βράδυ, λόγω φωτισμού
- Στο Λονδίνο η ζήτηση μέχρι το απόγευμα είναι σχεδόν σταθερή, γιατί πολλές δραστηριότητες συνεχίζονται
- Στη Αθήνα η βραδινή αιχμή τον Ιούλιο εξαφανίζεται, γιατί οι άνθρωποι παραμένουν έξω από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

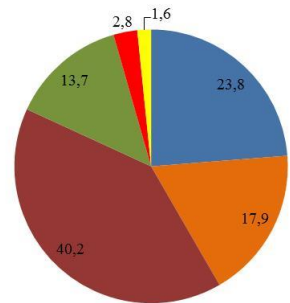
Κατανομή χρήσεων ανά Περιφέρεια (2002-2012)



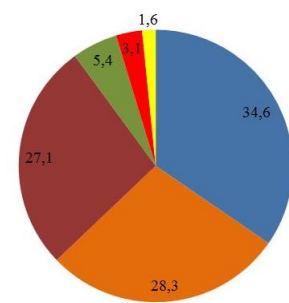
Ήπειρος



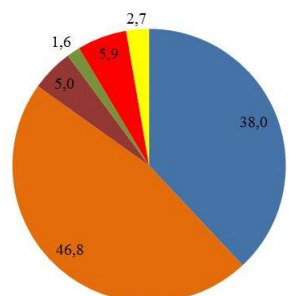
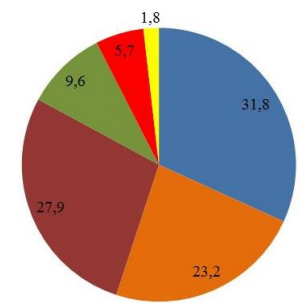
Δυτική Μακεδονία



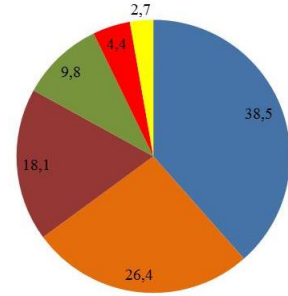
Θεσσαλία



Κεντρική Μακεδονία



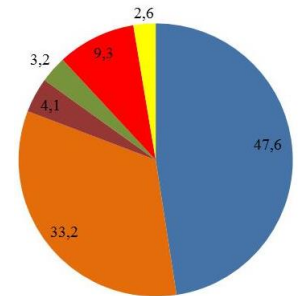
Ιόνιοι Νήσοι



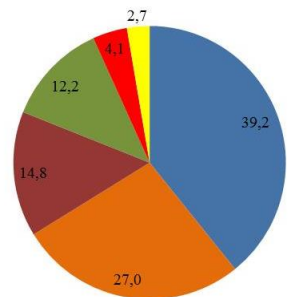
Δυτική Ελλάδα



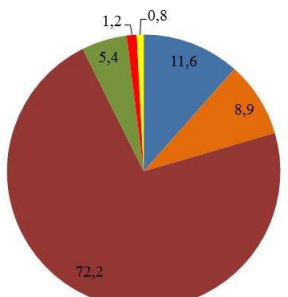
- Οικιακή χρήση
- Εμπορική χρήση
- Βιομηχανική χρήση
- Γεωργική χρήση
- Δημόσιες & Δημοτικές Αρχές
- Φωτισμός οδών



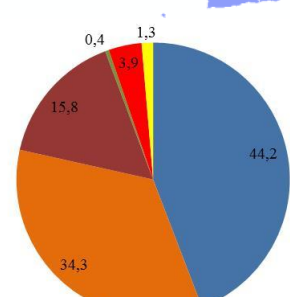
Βόρειο Αιγαίο



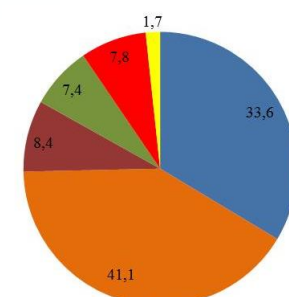
Πελοπόννησος



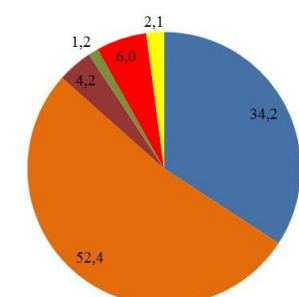
Στερεά Ελλάδα



Αττική

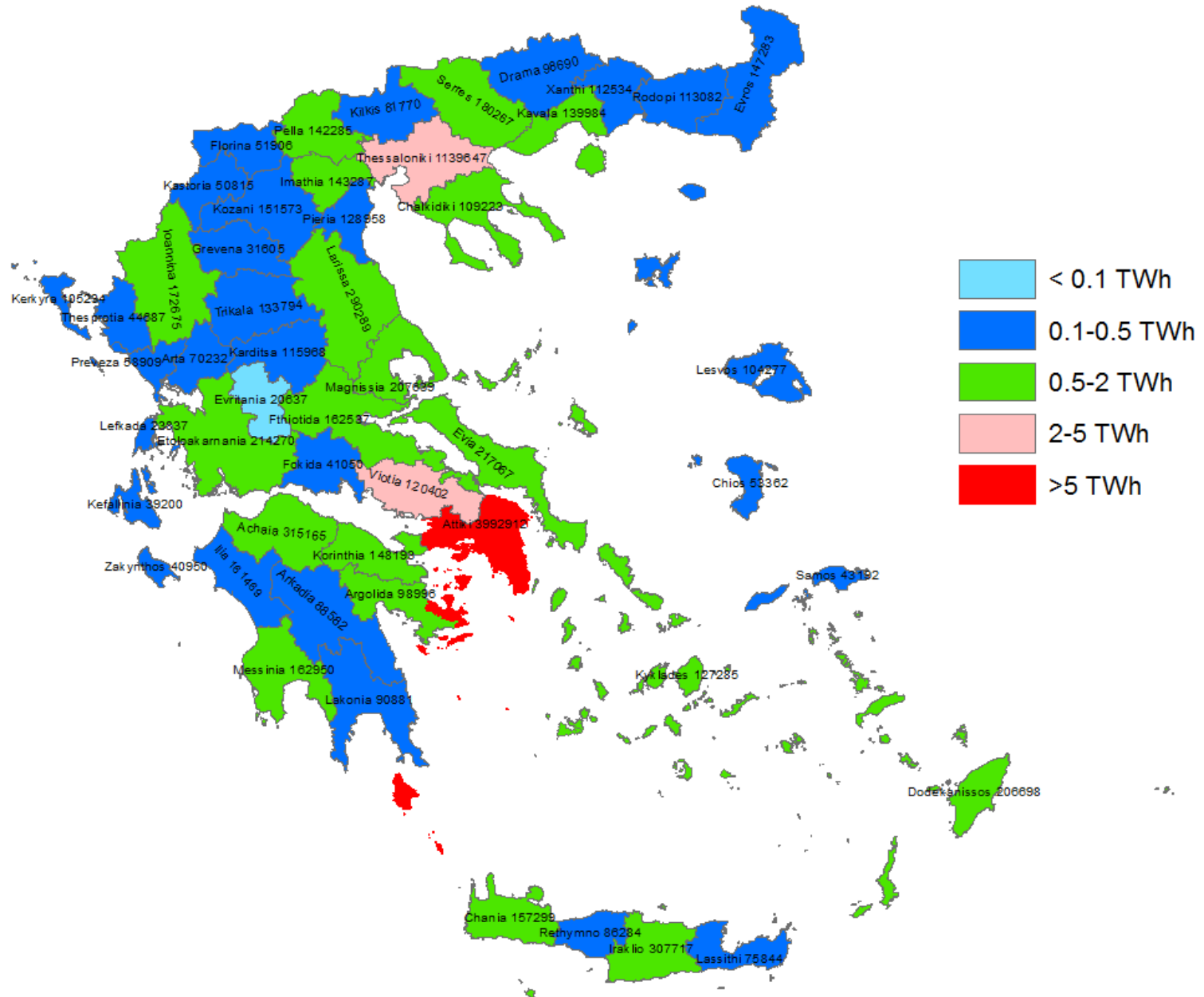


Κρήτη

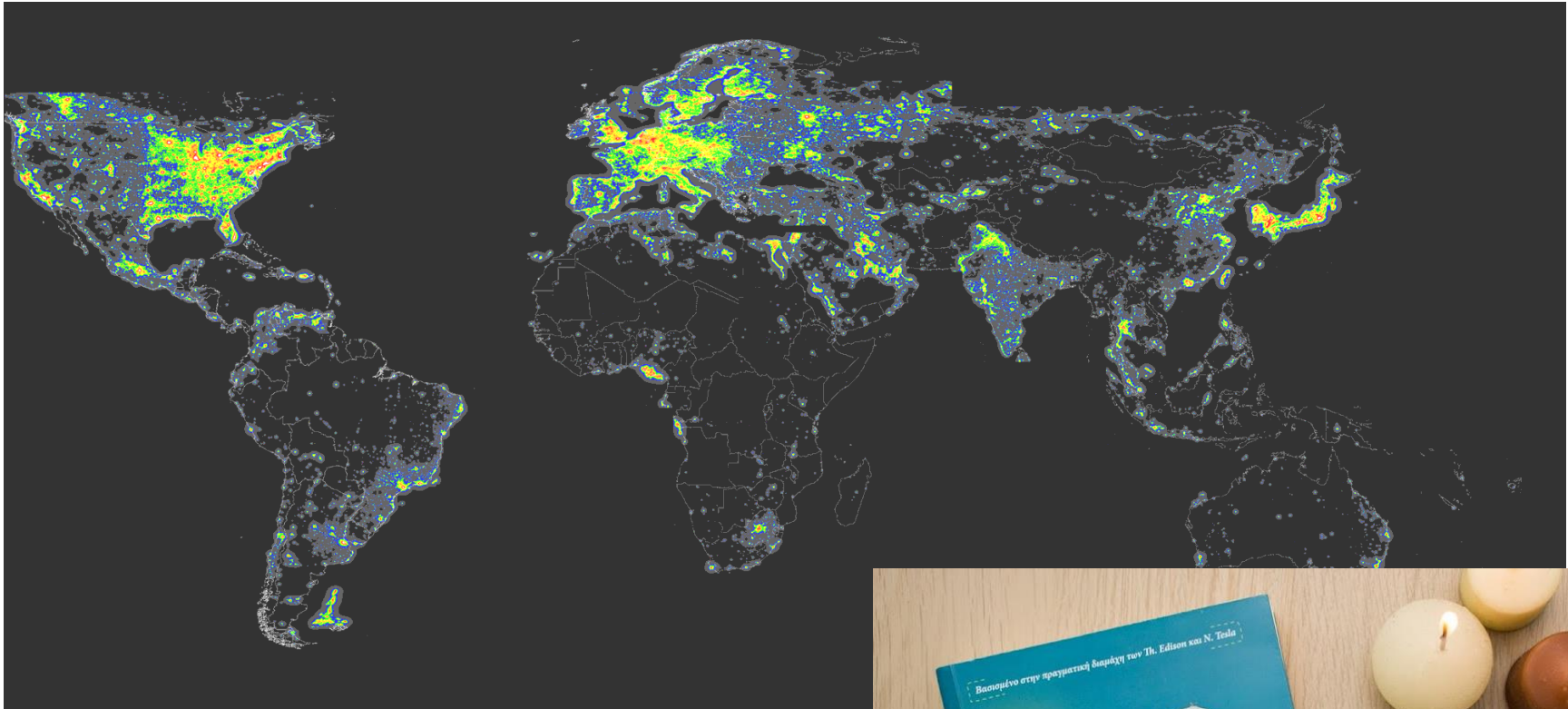


Νότιο Αιγαίο

Πληθυσμός και κατανάλωση Η/Ε έτους 2011 (ανά νομό)



Αντί επιλόγου



Παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη νυχτερινή φωτεινότητα

