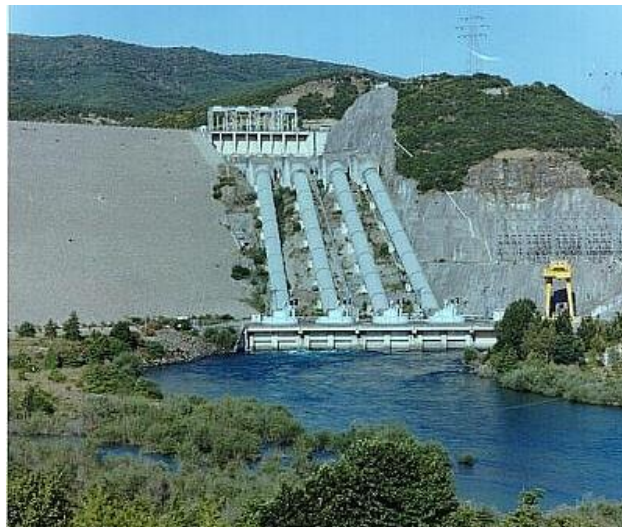


Ανανεώσιμη Ενέργεια & Υδροηλεκτρικά Έργα

8^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

2^ο εξάμηνο ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

Γνωριμία με το μάθημα – Βασικές έννοιες ενεργειακής τεχνολογίας



Α. Ευστρατιάδης, Γ.-Κ. Σακκή, & Δ. Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2022-23

Σκοπός: σχεδιασμός έργων/συστημάτων ΑΠΕ

□ Υδροηλεκτρικά έργα:

- Μικρά υδροηλεκτρικά έργα
 - Νομική διάκριση, με βάση το θεσμικό όριο των 15 MW
 - Πιο δόκιμος όρος: έργα παραγωγής Υ/Η ενέργειας χωρίς ταμίευση νερού
 - Άμεση μετατροπή της διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική
 - Μεγάλη ποικιλία διατάξεων
- Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα (ταμιευτήρες)
 - Ταμιευτήρες → φράγματα
 - Έλεγχος ενεργειακής παραγωγής λόγω της αποθήκευσης νερού, που επιτυγχάνουν αναρρύθμιση των εισροών
 - Συνδυάζονται με άλλες χρήσεις νερού

□ Άλλες μορφές ΑΠΕ που εξετάζει το μάθημα:

- Έργα αιολικής ενέργειας
- Φωτοβολταϊκά έργα
- Υβριδικά έργα (μίξη διαφορετικών ΑΠΕ με συμβατικές μονάδες παραγωγής)
- Συνδυασμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών και αντλησιοταμίευσης

Περίγραμμα ακαδημαϊκού έτους 2022-23

Ημερομηνία	Περιγραφή	Άσκηση
13/2/2023	Εισαγωγή - Βασικές έννοιες ενεργειακής τεχνολογίας	
20/2/2023	Γενικές διατάξεις υδροενεργειακών έργων	ΑΣΚ1
6/3/2023	Αγωγοί πτώσης και στρόβιλοι	
13/3/2023	Υδροηλεκτρικοί ταμιευτήρες (1)	ΑΣΚ2
20/3/2023	Υδροηλεκτρικοί ταμιευτήρες (2)	
27/3/2023	Μικρά υδροηλεκτρικά έργα (1)	ΑΣΚ3
3/4/2023	Μικρά υδροηλεκτρικά έργα (2)	
24/4/2023	Συστήματα αιολικών & Φ/Β έργων	ΑΣΚ4
8/5/2023	Κλίμα, νερό, ενέργεια και αβεβαιότητα	
15/5/2023	Οικονομικά της ενέργειας	
22/5/2023	Υβριδικά συστήματα - Ενεργειακό μίγμα	

Εργασίες εξαμήνου (προαιρετικές, σε ομάδες έως τριών ατόμων)

1. Εκτίμηση χαρακτηριστικών μεγεθών σχεδιασμού υδροηλεκτρικού έργου
2. Προσομοίωση και βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα
3. Σχεδιασμός μικρού υδροηλεκτρικού έργου
4. Ένταξη ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μίγμα μη διασυνδεδεμένου νησιού

Γενική διάκριση πηγών ενέργειας και αναγκών

Πηγές ενέργειας

Ανάγκες

Ορυκτά
καύσιμα

Στερεά (άνθρακας)
Υγρά (πετρέλαιο)
Αέρια (φυσικό αέριο)
Πυρηνικά (ουράνιο)

Ανανεώσιμες πηγές
ενέργειας (ΑΠΕ)

Ηλιακή
Αιολική
Υδραυλική
Βιομάζα
Γεωθερμική
Θαλάσσια (κυμάτων,
παλιρροιών, ρευμάτων)

Βαθμός
απόδοσης >80%

Βαθμός απόδοσης 35-55%

Βαθμός απόδοσης
18% (Φ/Β) - 93% (ΥΗΕ)

Οι ενεργειακές ανάγκες
περιλαμβάνουν και την
απόληψη, μεταφορά &
επεξεργασία του νερού

Μεταφορές
Οικιακή χρήση
Βιομηχανία
Τριτογενής τομέας
Γεωργία-αλιεία

Βαθμός
απόδοσης

Ηλεκτρική
ενέργεια

Συμπαγωγή
ηλεκτρισμού-
θερμότητας

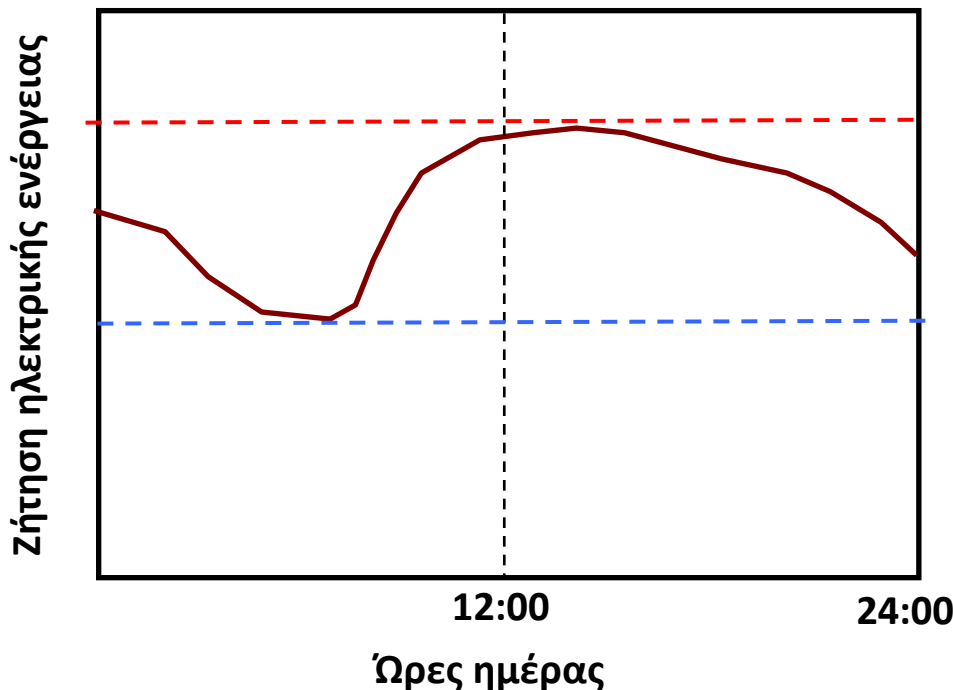
Βασικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικής ενέργειας

- Ο συνήθης τρόπος για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα έγκειται στην περιστροφή ενός πηνίου εντός μαγνητικού πεδίου (**ηλεκτρομαγνητική επαγωγή**).
- Συνεπώς, αρχικά απαιτείται μια **εξωτερική πηγή ενέργειας** ώστε να παραχθεί **μηχανικό έργο** για την περιστροφή του πηνίου:
 - Σε συστήματα **καύσης** (ορυκτά καύσιμα, βιομάζα, γεωθερμία), το μηχανικό έργο προκύπτει μέσω της **παραγωγής ατμού**.
 - Στα συστήματα **αιολικής, υδραυλικής και θαλάσσιας** ενέργειας (κύματα, ρεύματα, παλίρροιες), το έργο αποδίδεται μέσω της **κίνησης ενός ρευστού**.
 - Εξαίρεση: ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκές μονάδες
- 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 μειονέκτημα είναι η **μη δυνατότητα αποθήκευσής της**, παρά μόνο σε πολύ μικρή κλίμακα, που επιβάλλει συγχρονισμό της παραγόμενης ενέργειας με την ζήτηση.
- Χαρακτηριστικά πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας:
 - Έλεγχος της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο
 - Προβλεψιμότητα παραγωγής, σε διάφορες χρονικές κλίμακες
 - Τεχνικά ζητήματα (χρόνος απόκρισης, σύνδεση στο δίκτυο μεταφοράς)

Διαχείριση ηλεκτρικής ενέργειας

Η τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου διέπεται από δύο βασικούς περιορισμούς:

- Το δίκτυο πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς, με τόση ενέργεια όση καταναλώνεται (μόνο 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.** Η τάξη μεγέθους είναι ημέρες για τις λιγνιτικές μονάδες, ώρες ή λεπτά για τους σταθμούς φυσικού αερίου, και 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)

Θεμελιώδεις έννοιες

- Γενική σχέση μετατροπής της ενέργειας από μια αρχική μορφή σε μια άλλη:

$$\underline{P} = \eta(\underline{x}) P_0(\underline{x})$$

όπου \underline{P} η παραγόμενη ισχύς, \underline{x} η ροή του καυσίμου, $P_0(\underline{x})$ η εισερχόμενη ισχύς και $\eta(\underline{x}) < 1$ η σχέση μετασχηματισμού, που εκφράζεται μέσω του **βαθμού απόδοσης**.

- Η εισερχόμενη ισχύς, $P_0(\underline{x})$, μπορεί να εκτιμηθεί θεωρητικά:
 - Σε μονάδες καύσης, με βάση τη **θερμογόνο δύναμη** (ιδιότητα του καυσίμου) και την ροή (σε όρους μάζας ή όγκου) του εισερχόμενου καυσίμου
 - Σε συστήματα που μετατρέπουν **ροή ρευστού** σε μηχανική ενέργεια (αιολικά, υδροηλεκτρικά), με υπολογισμό της κινητικής ενέργειας και ενέργειας πίεσης που αποδίδεται στο σύστημα μετατροπής (ανεμογεννήτρια, υδροστρόβιλος)
 - Σε συστήματα που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά), η εισερχόμενη ισχύς είναι η **ροή ηλιακής ακτινοβολίας**.
- Η σχέση $\eta(\underline{x})$ είναι έντονα μη γραμμική, εξαρτάται από το «μηχάνημα» που κάνει τη μετατροπή της ενέργειας, και προσδιορίζεται μόνο εργαστηριακά (**καμπύλες ισχύος**).
- Υπό προϋποθέσεις, μπορεί να θεωρηθεί σταθερός βαθμός απόδοσης, όταν η μονάδα παραγωγής λειτουργεί με σταθερή ροή καυσίμου.
- Η παραγωγή ισχύος ενός ενεργειακού έργου λαμβάνει μια μέγιστη τιμή, που αναφέρεται ως **ονομαστική**, και αποτελεί «ταυτότητα» του έργου. Ο βαθμός απόδοσης δεν γίνεται κατ' ανάγκη μέγιστος στην ονομαστική ισχύ.

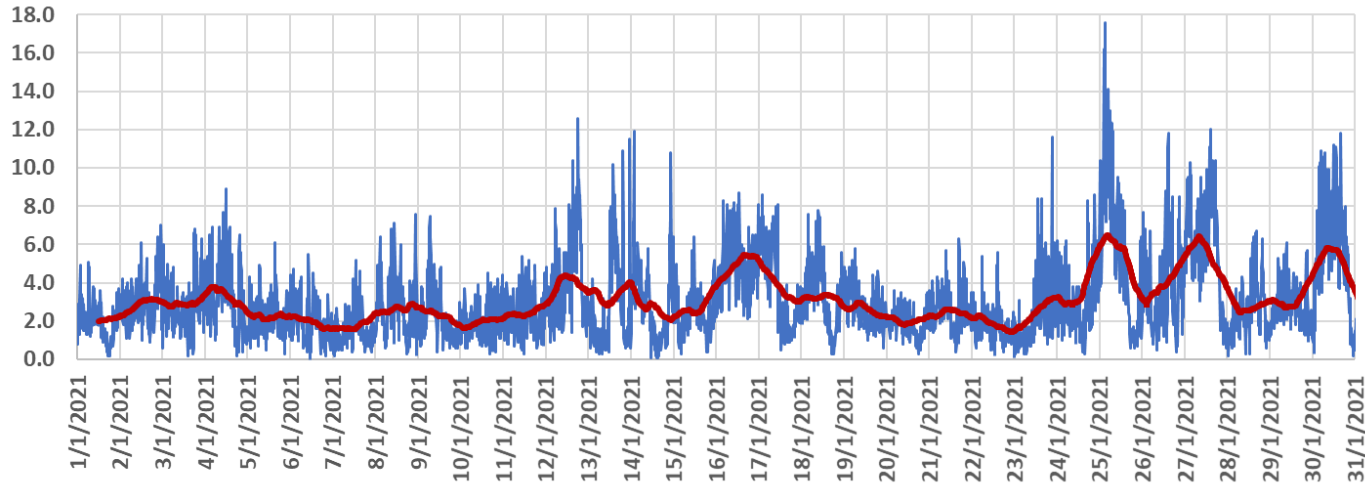
Παρατηρήσεις

- ❑ **Μονάδες ισχύος:** $W = N \text{ m/s}$
- ❑ **Μονάδες ενέργειας:** $J = W \text{ s}$ (μετατροπή σε Wh, kWh, MWh κτλ. διαιρώντας με 3600 s/h)
- ❑ Η παραγωγή ενέργειας είναι η χρονική ολοκλήρωση της ισχύος. Στην ωριαία κλίμακα, είθισται να χρησιμοποιείται (εσφαλμένα) ο όρος ισχύς ως ισοδύναμος της ενέργειας, καθώς ως απόλυτα μεγέθη οι δύο έννοιες ταυτίζονται.
- ❑ Κατά περίπτωση, απαιτείται μια **ελάχιστη ροή καυσίμου** ώστε να ξεκινήσει η παραγωγή ισχύος (ισοδύναμα, κάτω από αυτή την ποσότητα ο βαθμός απόδοσης είναι μηδενικός).
- ❑ Ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας προς τη δυνητική ενέργεια που θα είχε παραχθεί με συνεχή λειτουργία του έργου στην ονομαστική του ισχύ, P_{max} , καλείται **συντελεστής δυναμικότητας** CF (capacity factor, αναφέρεται και ως συντελεστής χρησιμοποίησης).
- ❑ Συνήθως εκφράζεται σε ετήσια ή μέση ετήσια κλίμακα (1 έτος = 8760 ώρες):

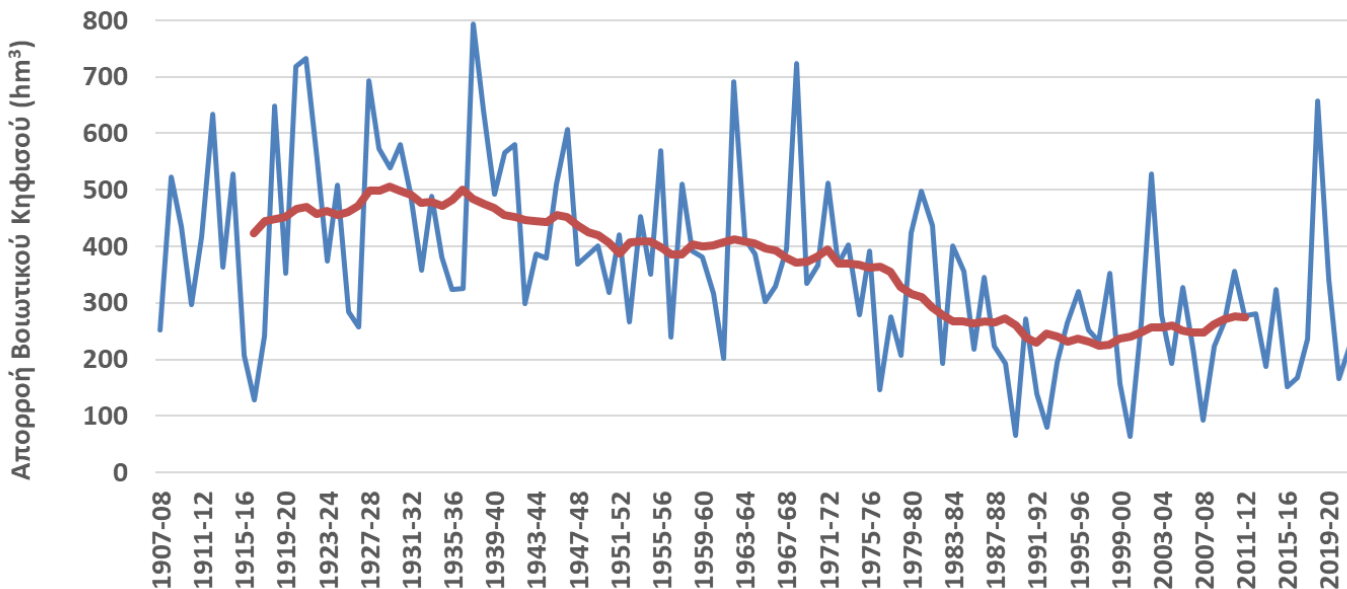
$$CF = E / (8760 P_{max})$$

- ❑ Ο συντελεστής δυναμικότητας εξαρτάται:
 - ❑ Σε ελεγχόμενα συστήματα, από τον εν γένει **ρόλο τους στο ενεργειακό μίγμα** (παραγωγή ενέργειας αιχμής ή βάσης)
 - ❑ Σε μη ελεγχόμενες ΑΠΕ (Α/Γ, Φ/Β, ΜΥΗΕ), από τις **υδρομετεωρολογικές συνθήκες**
 - ❑ Από πληθώρα άλλων παραγόντων του πραγματικού κόσμου (συντήρηση μονάδων, εφεδρείες, απόρριψη φορτίου, περιορισμοί αγορών ενέργειας)

Από τον ιδεατό στον πραγματικό κόσμο: Τυχαία μεταβαλλόμενες υδρομετεωρολογικές διεργασίες

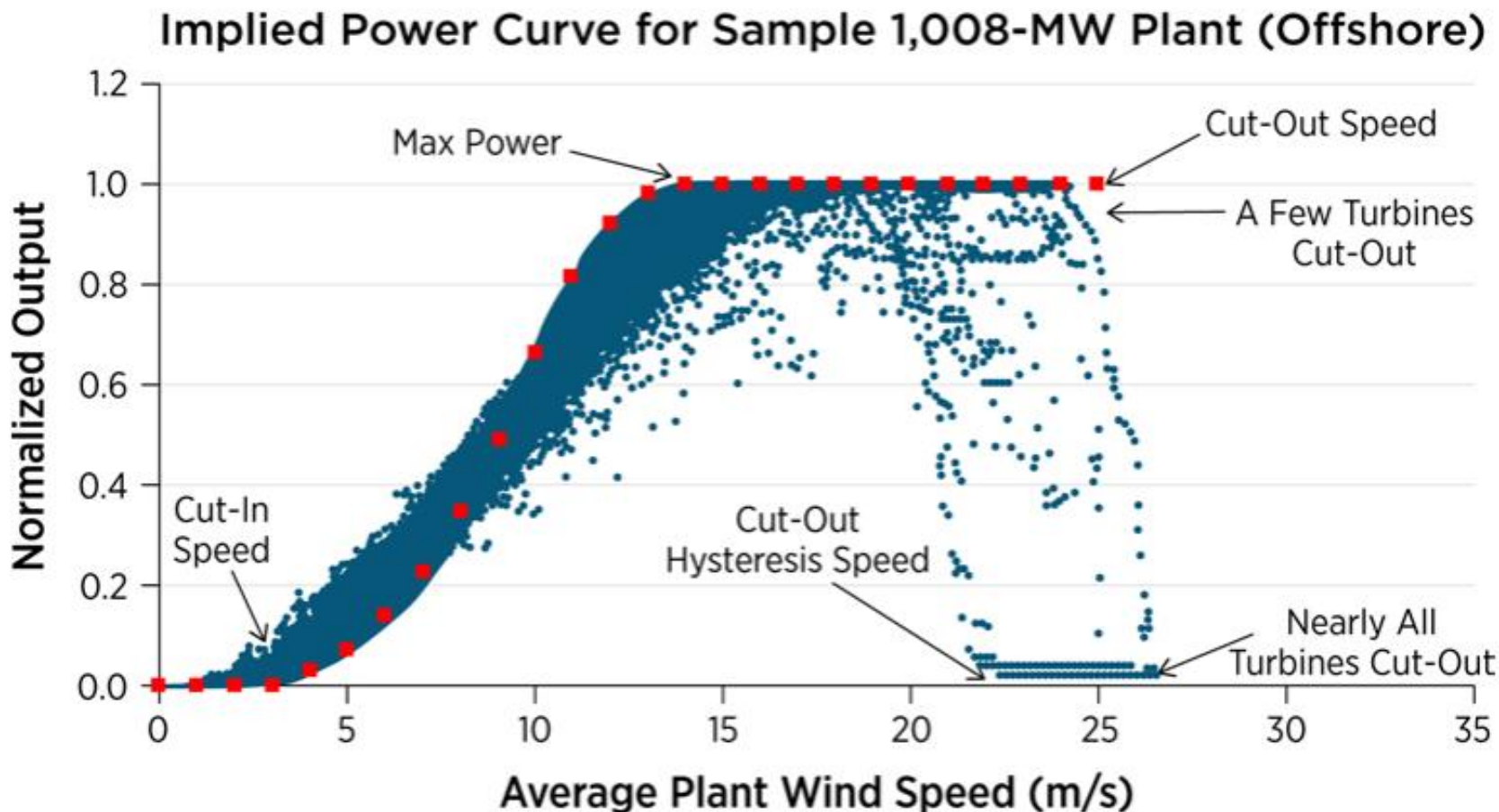


Μέση 10λεπτη και μέση 24ωρη ταχύτητα ανέμου στον σταθμό Άκτιο (Ιανουάριος 2021)



Ετήσια απορροή λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού και κινούμενος μέσος όρος 20 ετών

Από τον ιδεατό στον πραγματικό κόσμο: Παραγωγή ενέργειας στο πεδίο vs. εμπειρικές καμπύλες ισχύος



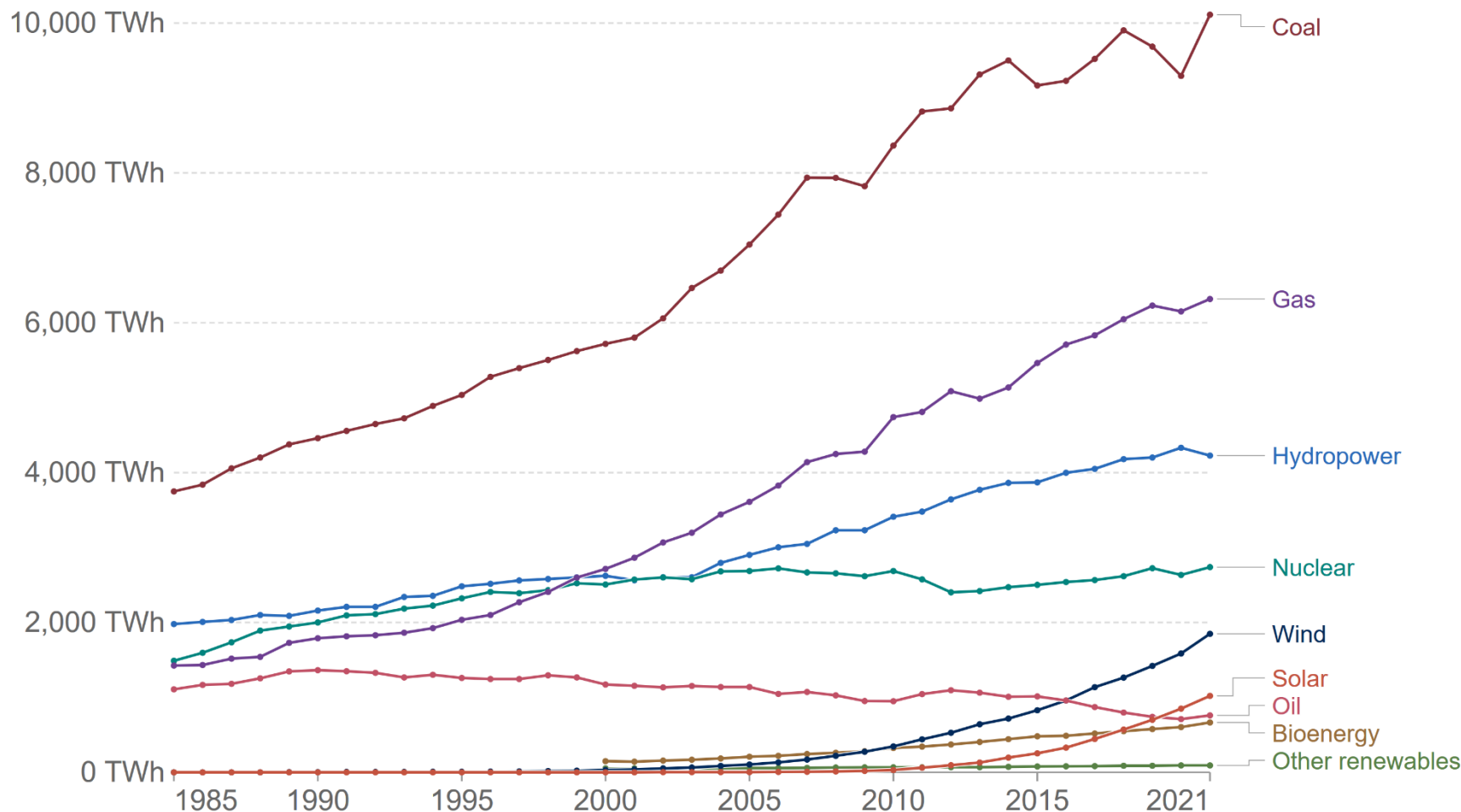
Τεχνολογικές και άλλες προκλήσεις των ΑΠΕ

- ❑ **Ανταγωνιστικά κριτήρια σχεδιασμού**, σε μεμονωμένα έργα ή συστήματα έργων:
 - ❑ Ελαχιστοποίηση κόστους (κυρίως κόστους επένδυσης)
 - ❑ Μεγιστοποίηση ενεργειακής παραγωγής (+ **αξιοπιστία** παραγωγής)
 - ❑ Ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- ❑ Εξάρτηση από **τυχαία μεταβαλλόμενες υδρομετεωρολογικές διεργασίες** (βροχόπτωση-απορροή, άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία)
 - ❑ Μη προβλέψιμη ηλεκτροπαραγωγή, σε όλες τις χρονικές κλίμακες
 - ❑ Επίδραση στον σχεδιασμό: βελτιστοποίηση υπό καθεστώς **αβεβαιότητας**
 - ❑ Επίδραση στη λειτουργία:
 - ❑ Πρόγνωση φυσικών διεργασιών → πρόγνωση ενεργειακής παραγωγής (σε διάφορες χρονικές κλίμακες, οπωσδήποτε 24ωρη)
 - ❑ Βελτιστοποίηση διαχείρισης (σε μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα ή σε υβριδικά συστήματα, που περιέχουν έργα αποθήκευσης ενέργειας)
- ❑ **Αδυναμία συγχρονισμού παραγωγής και ζήτησης**
 - ❑ Μίξη διαφόρων πηγών ενέργειας, με διαφορετικά χαρακτηριστικά
 - ❑ Αναγκαιότητα συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας
 - ❑ Αξιοποίηση πλεονασμάτων ενέργειας
 - ❑ Διαχείριση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας – κίνητρα για εξομάλυνση των αιχμών

Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (1985-2021)

Electricity production by source, World

Our World
in Data



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2022); Ember's Global and European Electricity Reviews (2022)

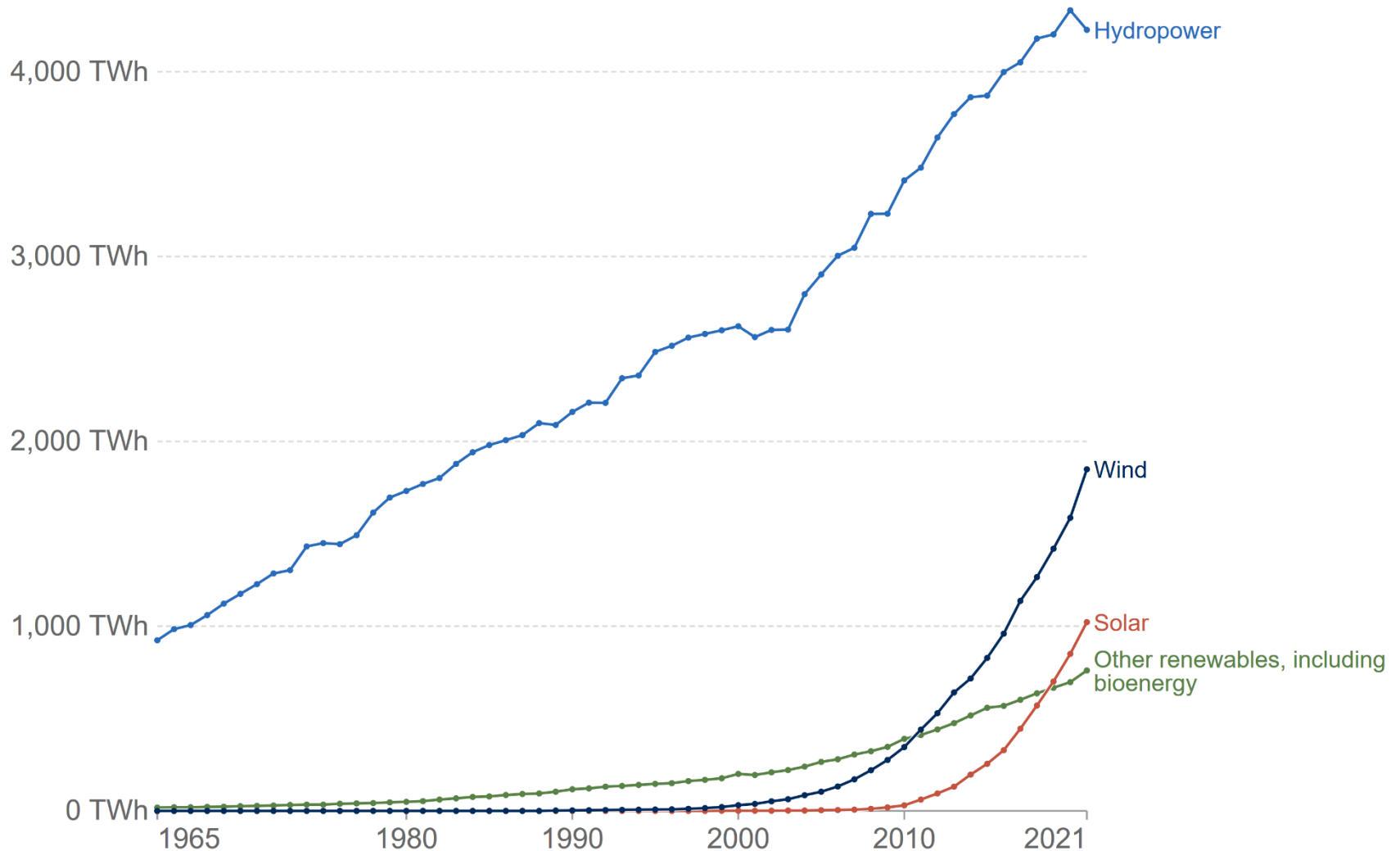
Note: 'Other renewables' includes waste, geothermal and wave and tidal energy.

OurWorldInData.org/energy • CC BY

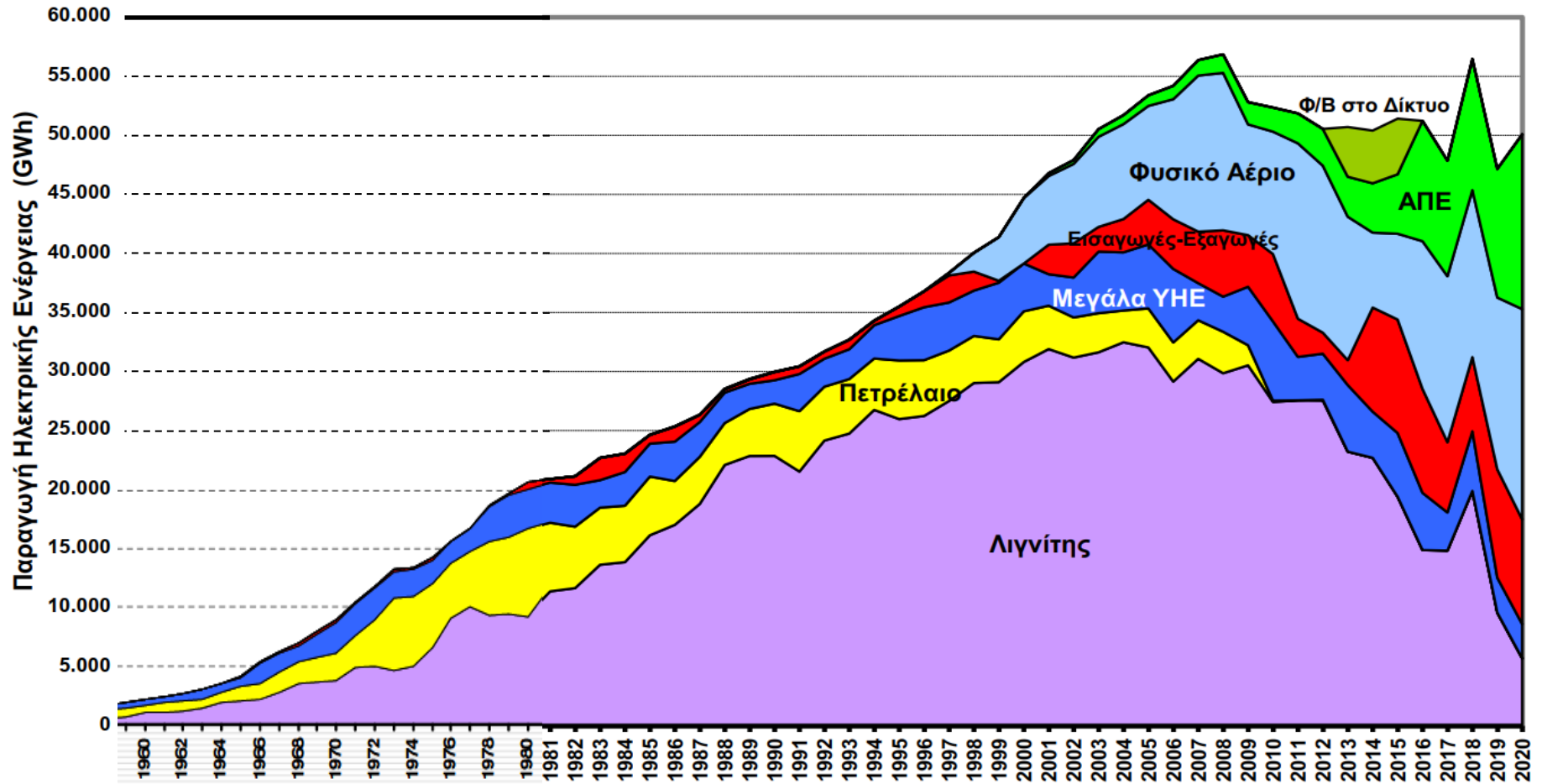
Παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ (1985-2021)

Modern renewable energy generation by source, World

Our World
in Data



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 2022)

Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ηλεκτροπαραγωγής: **19 783 MW** (έτος 2021)

- Μονάδες φυσικού αερίου: 5 213 MW (148 MW ΣΥΘΗΑ)
- Αιολικές μονάδες: 4 338 MW
- Μεγάλες Φ/Β μονάδες: 3 535 MW (+ 352 MW Φ/Β στη στέγη < 10 kW)
- Υδροηλεκτρικές μονάδες (ταμιευτήρες): 3 171 MW (+250 MW ΜΥΗΕ)
- Λιγνιτικές μονάδες: 2 816 MW (μείωση κατά 1 088 MW σε σχέση με 2020)
- Βιομάζα – βιοαέριο: 108 MW

Παραγωγή ενέργειας και ισοζύγιο διασυνδέσεων (= εισαγωγές – εξαγωγές):
50.67 TWh (έναντι 52.40 TWh το 2021)

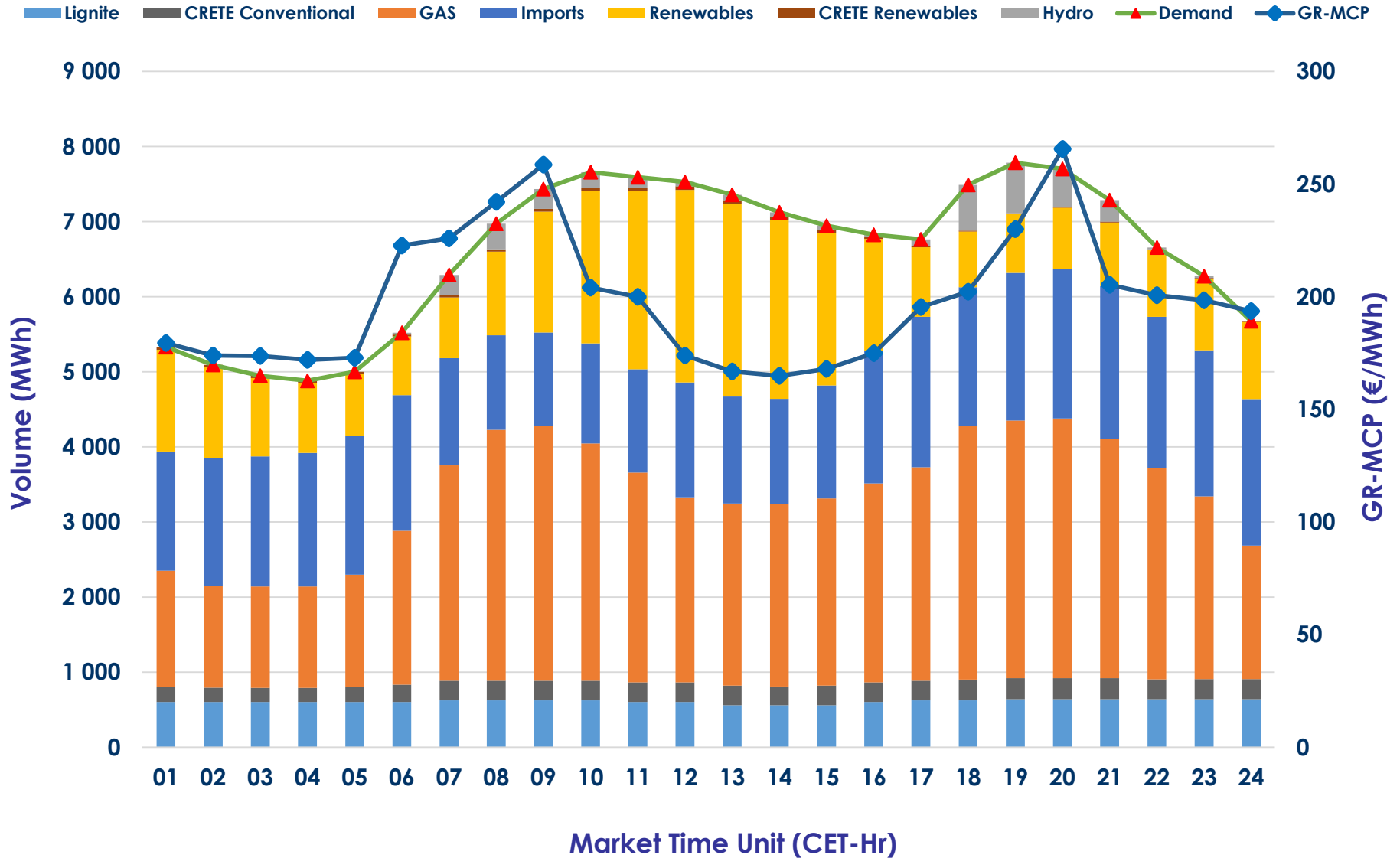
Ελάχιστη ζήτηση ωριαίας ισχύος: **3 295 MW**
(στις 25/4/2022 5:00 πμ)

Μέγιστη ζήτηση ωριαίας ισχύος: **9 512 MW**
(στις 28/7/2022 14:00 μμ)

Ρεκόρ ωριαίας ισχύος: **10 715 MW** (στις 5/8/2021 15:00 μμ)

Μείγμα παραγωγής (GWh)	2021	2022
Εισαγωγές	7 581	7 751
Εξαγωγές	3 898	4 303
Διαφορά	3 683	3 448
Λιγνιτικά	5 341	5 586
Φυσικό αέριο	20 873	17 949
Υδροηλεκτρικά	5 294	4 004
Λοιπά καύσιμα	20	27
ΑΠΕ συστήματος	10 451	11 291
Παραγωγή ΑΠΕ στο δίκτυο	6 742	8 351
Διασύνδεση Κρήτης	6	20
Εισαγωγές-εξαγωγές	3 683	3 448
Σύνολο	52 411	50 675

Η ελληνική αγορά ενέργειας στις 17/2/2022



Η ελληνική αγορά ενέργειας στις 12/2/2023

