



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Πολυκριτηριακή αξιολόγηση της διαχρονικής εξέλιξης των συνιστωσών ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη

ΣΤΕΡΓΙΟΣ ΒΛΑΧΟΓΙΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιούλιος 2024

Αντικείμενο και στόχοι

Αντικείμενο

Η μελέτη και αξιολόγηση των ιστορικών μεταβολών στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη λαμβάνοντας υπόψιν διάφορα χαρακτηριστικά, όπως η ηλεκτροπαραγωγή και η εγκατεστημένη ισχύς για 30 χώρες καλύπτοντας ένα εύρος τριών δεκαετιών.

Στόχοι

- Επισκόπηση των πρωτογενών πηγών που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Διαμόρφωση ενεργειακού προφίλ για κάθε χώρα με βάση τις αλλαγές στη σύνθεση του μείγματος ηλεκτροπαραγωγής
- Διερεύνηση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών στα ενεργειακά συστήματα της Ευρώπης
- Αξιολόγηση της επιρροής των μεταβολών στους συντελεστές δυναμικότητας
- Μελέτη της επίδρασης της ενεργειακής μετάβασης στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας

Μεθοδολογία

1. Επιλογή χωρών (ΕU-27, Ηνωμένο Βασίλειο, Ισλανδία, Νορβηγία)
2. Επιλογή χρονικού εύρους (αρχές 1990 - αρχές 2020) → Ικανοποιητικό για την αποτύπωση της ενεργειακής μετάβασης
3. Αξιοποίηση μεγάλων βάσεων δεδομένων (Eurostat, Ηνωμένα Έθνη, Παγκόσμια Τράπεζα) για τη συλλογή στοιχείων:
 - Ζήτησης
 - Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
 - Εισαγωγών
 - Εγκατεστημένης ισχύος
 - Τιμών ηλεκτρικής ενέργειας
4. Στατιστική επεξεργασία των δεδομένων – εξαγωγή συμπερασμάτων

Πηγές ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή

Συμβατικές Πηγές – Μη ανανεώσιμες

- Περιλαμβάνουν ορυκτά καύσιμα όπως:
 - Πετρέλαιο
 - Φυσικό Αέριο
 - Γαιάνθρακες
- Πυρηνική Ενέργεια

Ανανεώσιμες Πηγές (ΑΠΕ)

- Ηλιακή Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Βιομάζα
- Γεωθερμία
- Κυματική και Θαλάσσια Ενέργεια

Από τις ΑΠΕ μελετώνται κυρίως η ηλιακή, η αιολική και τα υδροηλεκτρικά, καθώς έχουν εκτενή ενσωμάτωση στην πλειοψηφία των ενεργειακών συστημάτων της Ευρώπης.

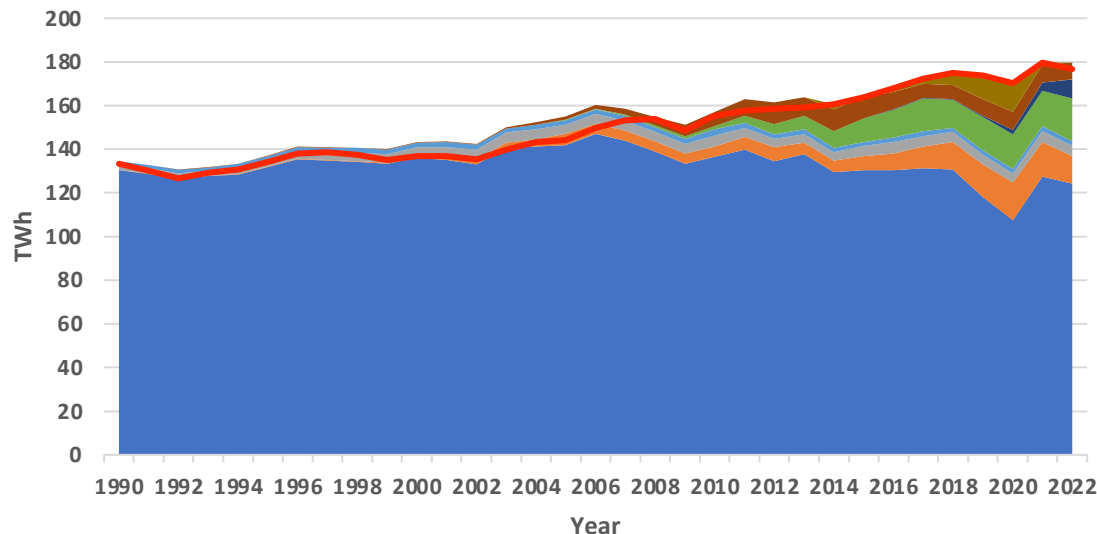
Η ανάπτυξη άλλων ΑΠΕ περιορίζεται σε χώρες με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (πχ. Ισλανδία → Γεωθερμία)

Ενεργειακά προφίλ Ευρωπαϊκών χωρών

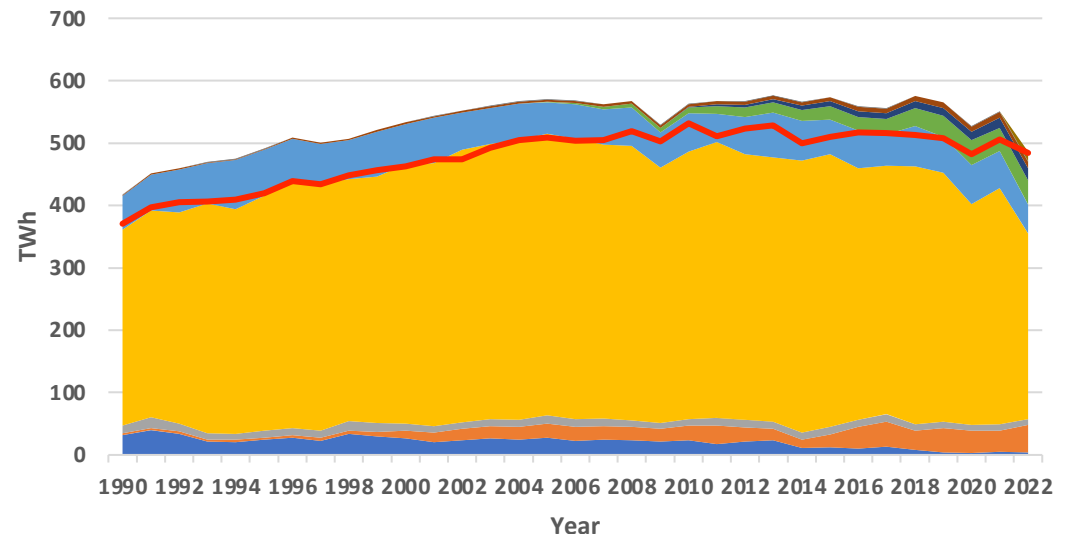
Διαφορετική ταυτότητα όσον αφορά τις κύριες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε χώρα:

- Πολωνία → Σημαντική εξάρτηση από συμβατικές πηγές (λιγνίτης)
- Γαλλία → Χαρακτηριστικό παράδειγμα ευρείας χρήσης πυρηνικής ενέργειας

Electricity Mix of Poland
(Produced Electricity by Source, in TWh)



Electricity Mix of France
(Produced Electricity by Source, in TWh)

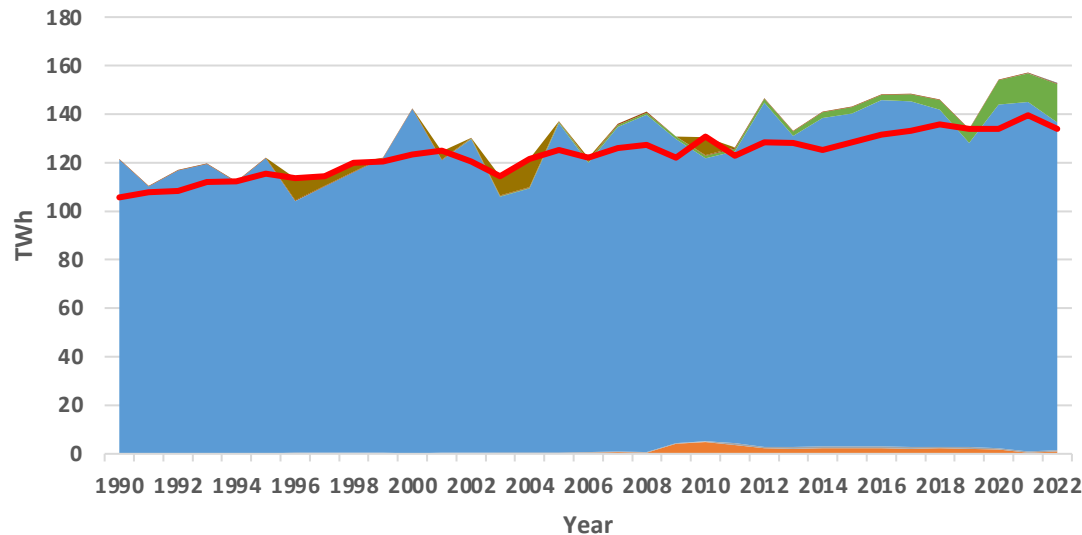


Coal Gas Oil Nuclear Hydro Wind Solar Bioenergy Other Net Imports Demand

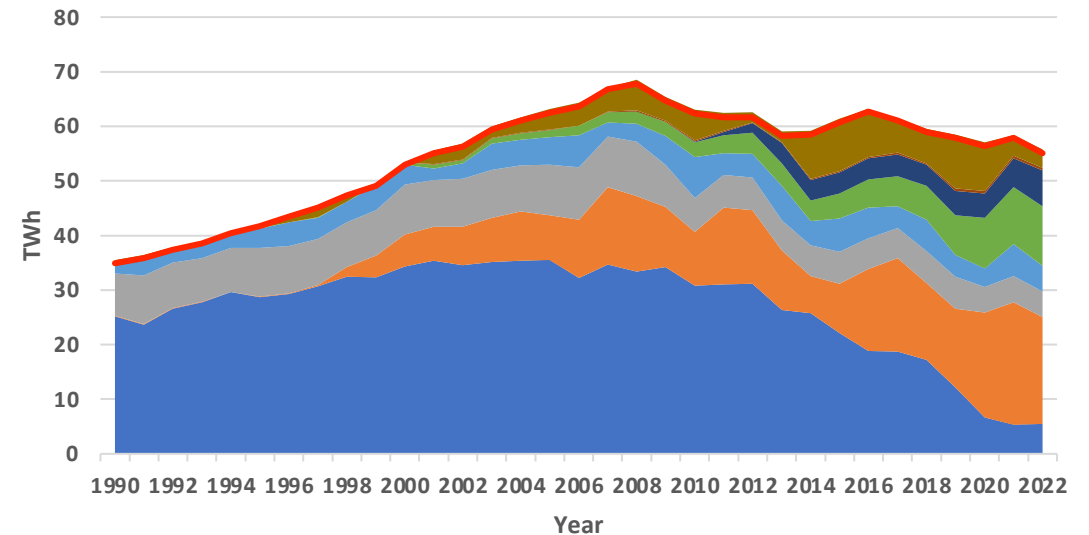
Ενεργειακά προφίλ Ευρωπαϊκών χωρών

- Νορβηγία → Σχεδόν αποκλειστική χρήση υδροηλεκτρικών για παραγωγή ηλεκτρισμού
- Ελλάδα → Κυρίως ορυκτά καύσιμα (λιγνίτης, φυσικό αέριο) με ορατή την ευρεία ενσωμάτωση των ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια

Electricity Mix of Norway
(Produced Electricity by Source, in TWh)



Electricity Mix of Greece
(Produced Electricity by Source, in TWh)

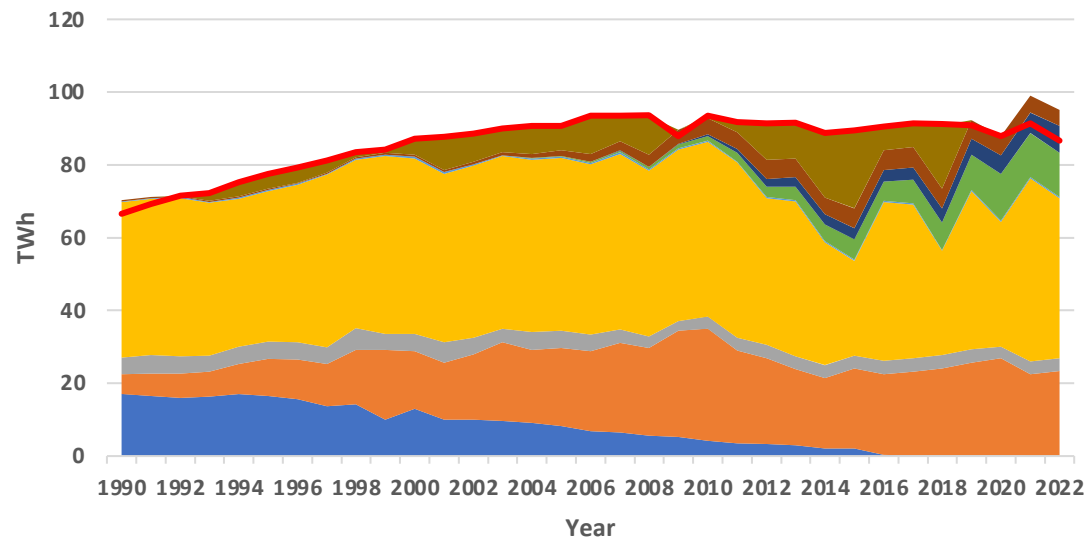


Coal Gas Oil Nuclear Hydro Wind Solar Bioenergy Other Net Imports Demand

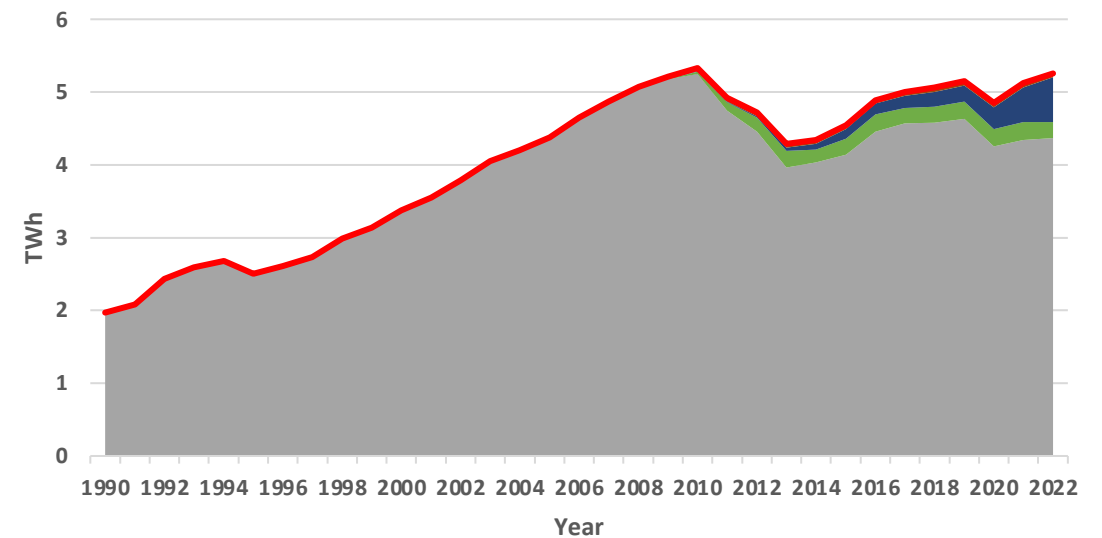
Ενεργειακά προφίλ – Ο ρόλος των διασυνδέσεων

- Βέλγιο → Εισαγωγές για την κάλυψη της ζήτησης, καλή διασύνδεση χωρών κεντρικής Ευρώπης
- Κύπρος → Αποκλειστική εξάρτηση από την εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, γεωγραφική απομόνωση

Electricity Mix of Belgium
(Produced Electricity by Source, in TWh)



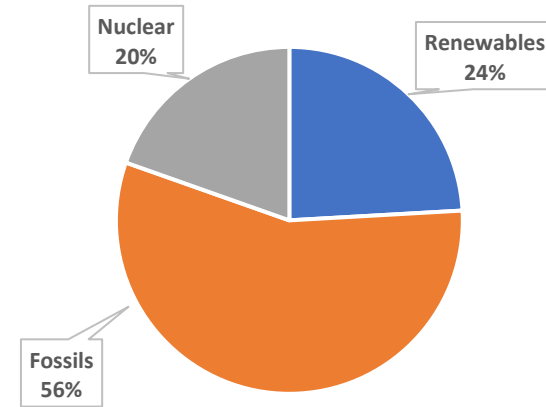
Electricity Mix of Cyprus
(Produced Electricity by Source, in TWh)



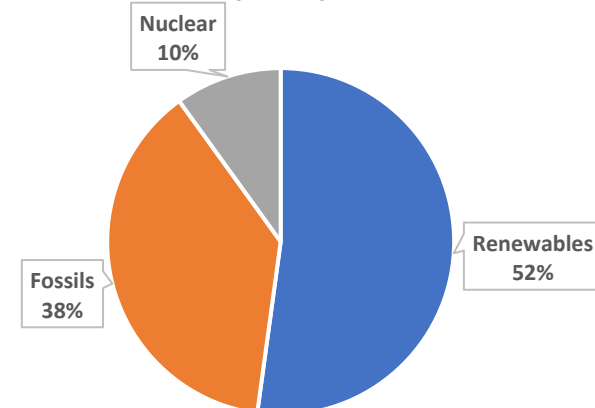
Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ

- Για πολλά χρόνια εκτεταμένη χρήση των συμβατικών πηγών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Μεγάλες εκπομπές CO₂ και άλλων ρύπων κατά την καύση → Αρνητική επίπτωση στην κλιματική αλλαγή
- Σταδιακός περιορισμός της χρήσης ορυκτών καυσίμων
- Ανανεώσιμες Πηγές → Καθαρή μορφή ενέργειας, μηδενικές εκπομπές CO₂
- Ενεργειακές πολιτικές μετατοπισμένες προς ένα μοντέλο ηλεκτροπαραγωγής που στηρίζεται στη χρήση των ΑΠΕ

Share of each source in Generation Capacity (1992)

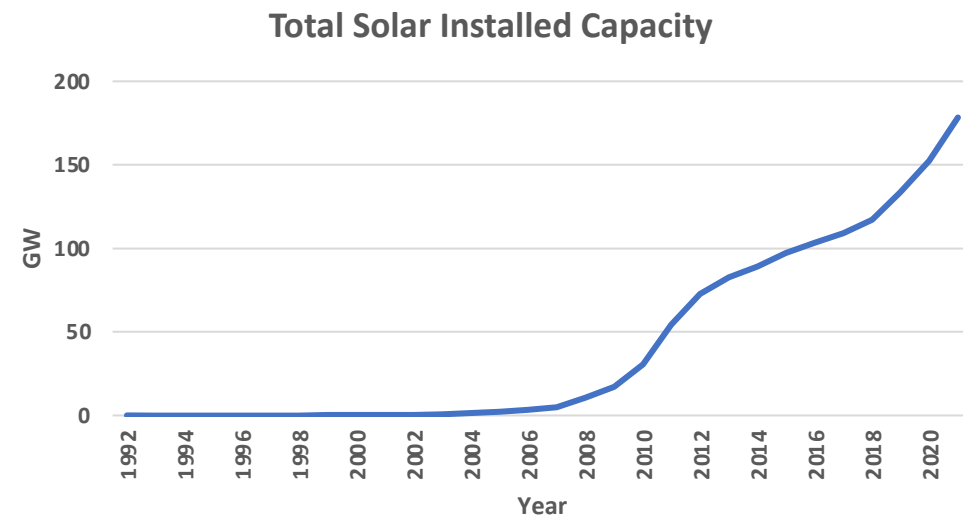
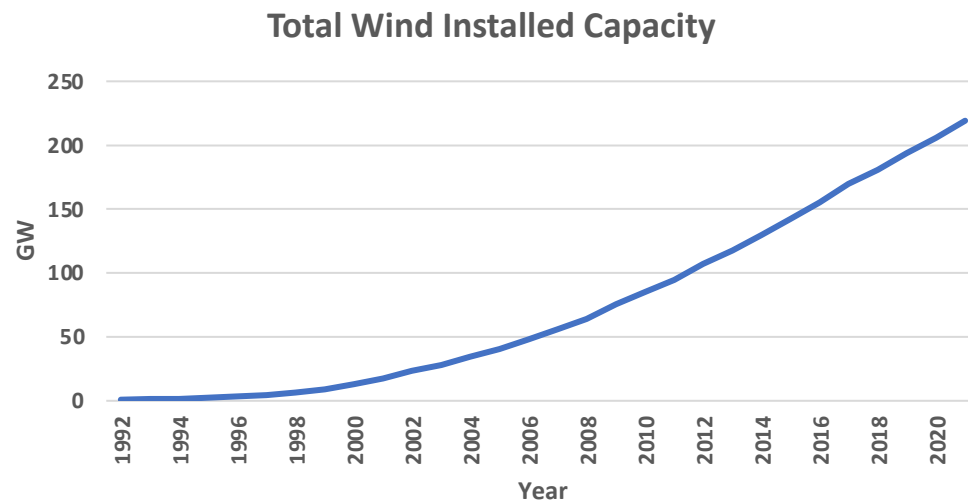


Share of each source in Generation Capacity (2021)



Ανάπτυξη αιολικής και ηλιακής ενέργειας

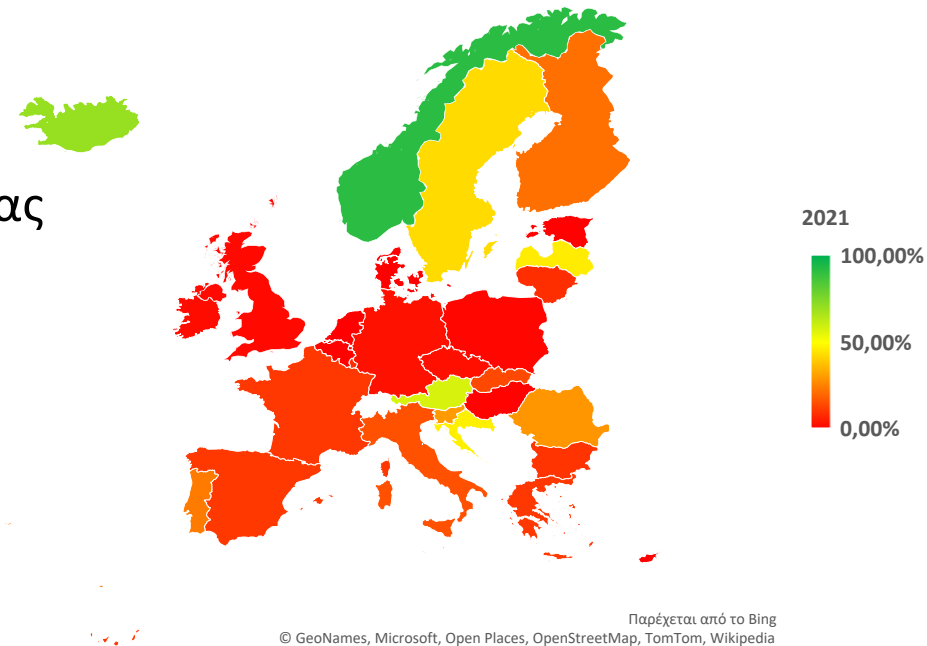
- Σχετικά καινούργιες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας
- Μεταβλητή φύση των φυσικών διαδικασιών → Μη ελεγχόμενη παραγωγή ενέργειας
- Σημαντικές βελτιώσεις στην τεχνολογίες των ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών συστημάτων τις τελευταίες δεκαετίες → Αύξηση αποδοτικότητας
- Ευνοϊκές ενεργειακές πολιτικές στη χρήση των ΑΠΕ → Εκθετική ενσωμάτωση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας τη δεκαετία του 2000 και 2010 αντίστοιχα



Ο ρόλος των υδροηλεκτρικών

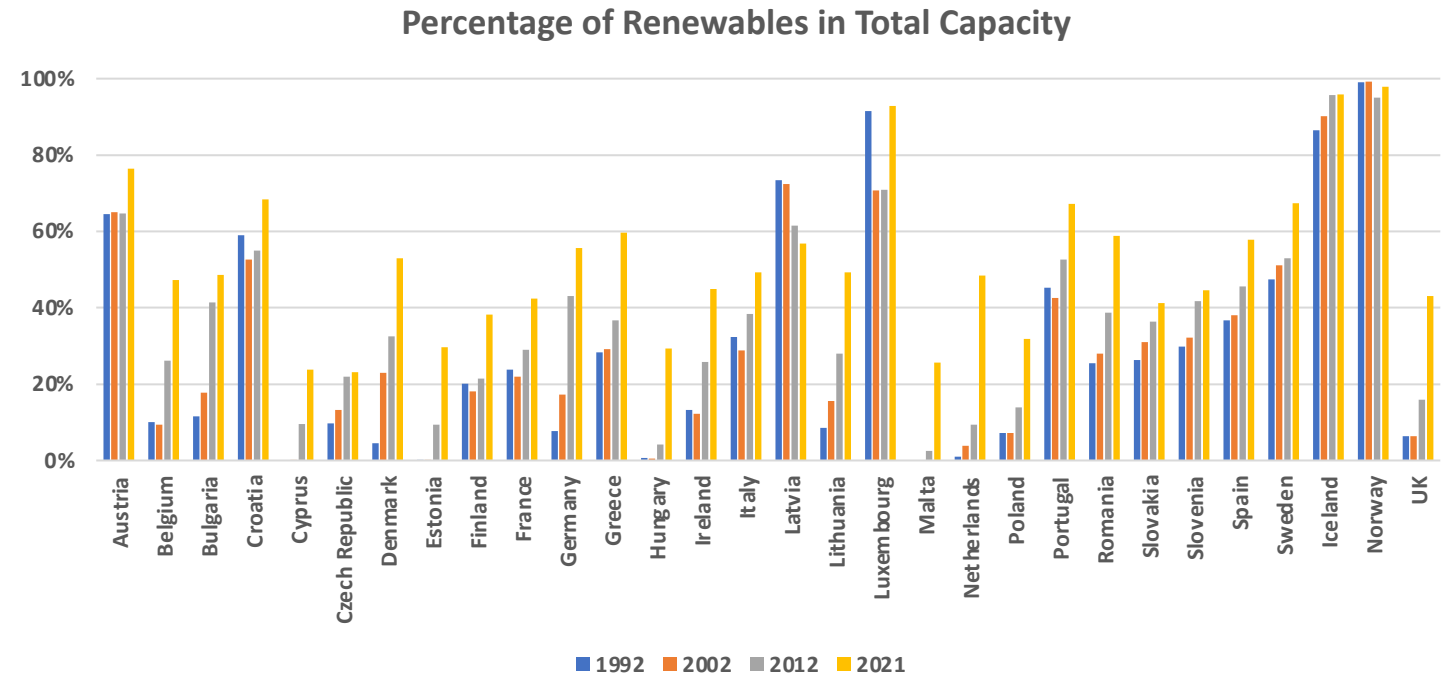
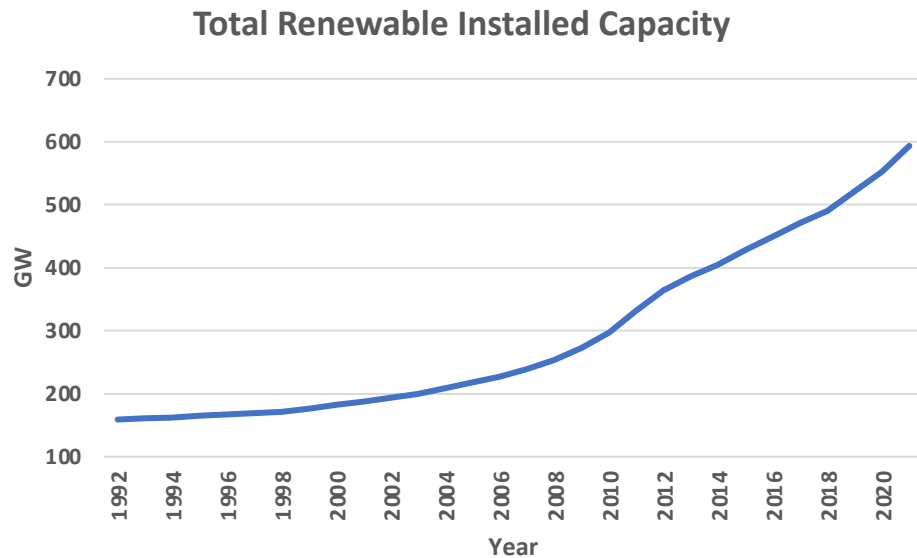
- Μικρά υδροηλεκτρικά έργα → Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από τη χρονική κατανομή των απορροών
- Μεγάλοι υδροηλεκτρικοί ταμιευτήρες με δυνατότητα αποθήκευσης → Ελεγχόμενη παραγωγή ενέργειας
- Συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας – κάλυψη στις αιχμές της ζήτησης → ενεργειακή ασφάλεια
- Η ηλεκτροπαραγωγή από υδροηλεκτρικά έχει παραμείνει σχετικά σταθερή τα τελευταία 30 χρόνια
- Χρήση υδροηλεκτρικών ως έργα αιχμής στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες
- Εκτενής αξιοποίηση - παραγωγή ενέργειας βάσης σε χώρες με ευνοϊκό ανάγλυφο και επάρκεια υδατικών πόρων (πχ. Νορβηγία, Σουηδία, Αυστρία)
- Περιορισμένη χρήση σε μικρές νησιωτικές χώρες (πχ. Κύπρος, Μάλτα)

Percentage of Generated Electricity from Hydro (2021)



Αποτύπωση των μεταβολών στις ΑΠΕ

- Σταθερή συμμετοχή των ΑΠΕ στα ενεργειακά συστήματα μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 (αποκλειστική χρήση υδροηλεκτρικής ενέργειας)
- Η αυξητική τάση στη χρήση των ΑΠΕ οφείλεται στη ταχεία ενσωμάτωση ηλιακής και αιολικής ενέργειας τις δεκαετίες που ακολούθησαν

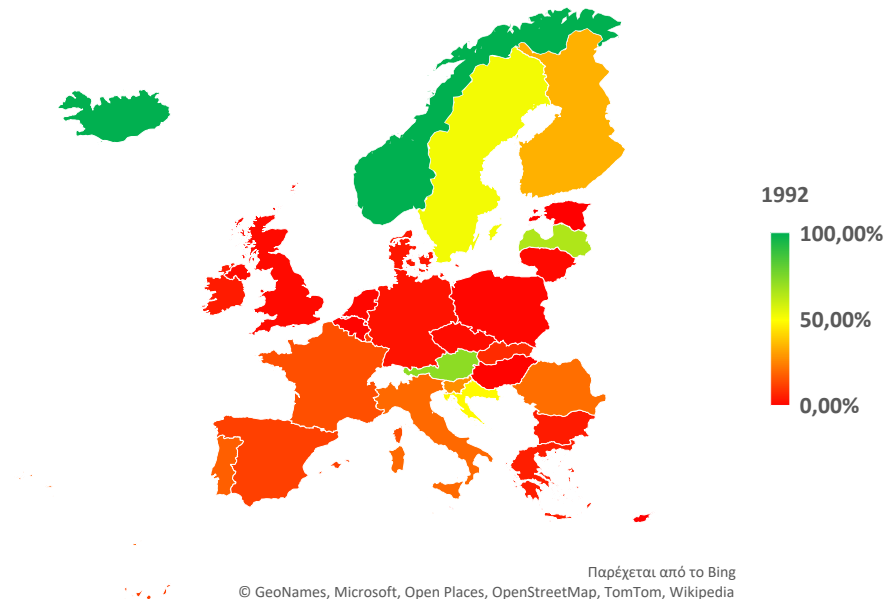


Αποτύπωση των μεταβολών στις ΑΠΕ

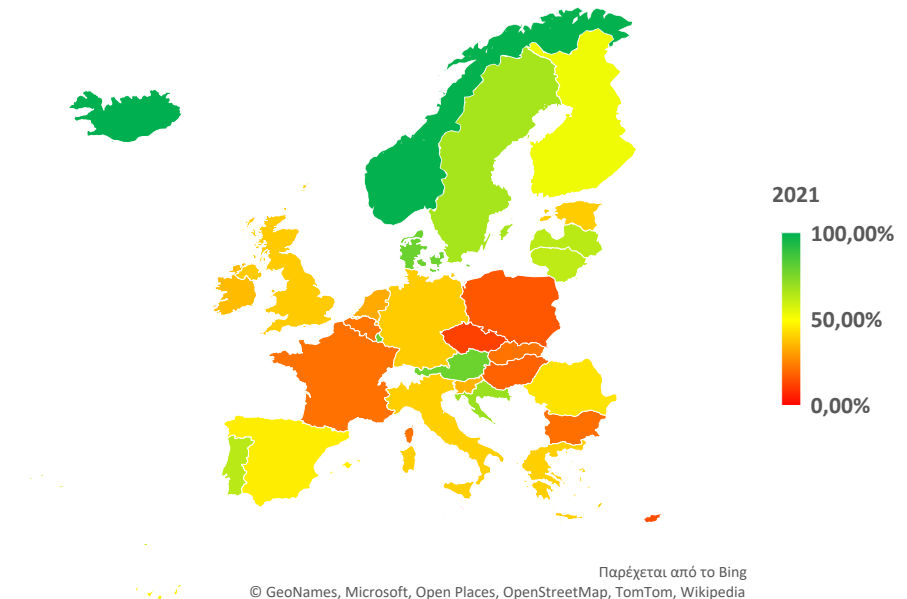
Η εικόνα σήμερα:

- Αθροιστικά οι ΑΠΕ κατέχουν ισχυρό ποσοστό στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας σε όρους τόσο εγκατεστημένης ισχύος όσο και ηλεκτροπαραγωγής

Percentage of Generated Electricity from Renewables (1992)



Percentage of Generated Electricity from Renewables (2021)



Ο συντελεστής δυναμικότητας

Ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μιας εγκατάστασης (ή ενός συστήματος εγκαταστάσεων) προς τη μέγιστη που θα μπορούσε να παραχθεί με βάση την εγκατεστημένη ισχύ σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

- Αναφέρεται συνήθως σε ετήσια κλίμακα
- Αποτελεί την ταυτότητα κάθε έργου ή πηγής ενέργειας

Οι συντελεστές δυναμικότητας διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των διαφόρων μορφών ενέργειας. Γενικά παρατηρείται ότι:

- Πηγές ενέργειας **μη ελεγχόμενης** παραγωγής → Μικρότεροι συντελεστές δυναμικότητας (ηλιακή, αιολική ενέργεια, μικρά υδροηλεκτρικά)
- Πηγές ενέργειας **ελεγχόμενης** παραγωγής → Μεγαλύτεροι συντελεστές δυναμικότητας (πυρηνική ενέργεια, ορυκτά καύσιμα)

Συντελεστές δυναμικότητας ηλιακής ενέργειας

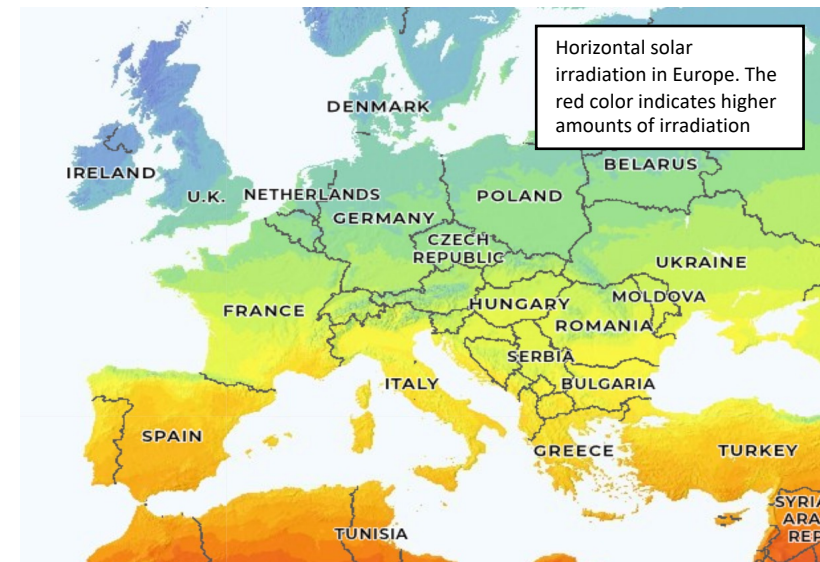
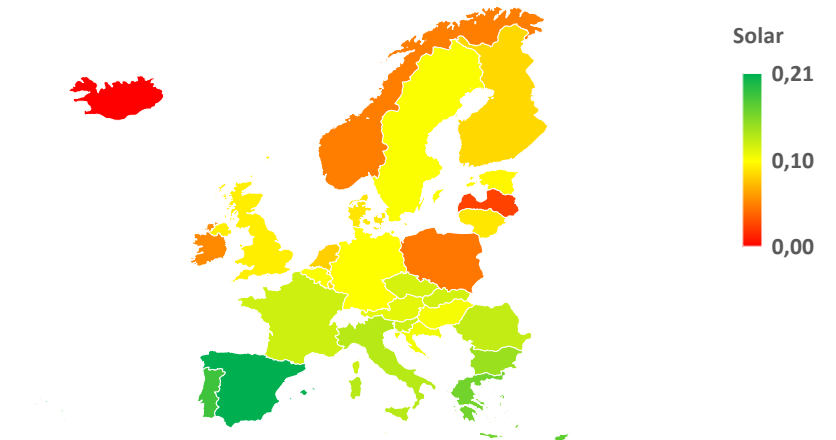
Ηλιακή ενέργεια → Μη ελεγχόμενη παραγωγή

Παρατηρούνται πολύ μικροί συντελεστές δυναμικότητας σε σχέση με άλλες πηγές. Άμεση εξάρτηση από:

- Κύκλο ημέρας - νύχτας (μεταβαλλόμενη διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας)
- Κλιματικές συνθήκες (συννεφιά, περίοδος ηλιοφάνειας)
- Γεωγραφική θέση (μικρά γεωγραφικά πλάτη → περισσότερη προσπίπτουσα ακτινοβολία)

Οι χώρες της νότιας Ευρώπης επιτυγχάνουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές στους συντελεστές δυναμικότητας

Average Capacity Factor of Solar (2012-2021)



Συντελεστές δυναμικότητας αιολικής ενέργειας

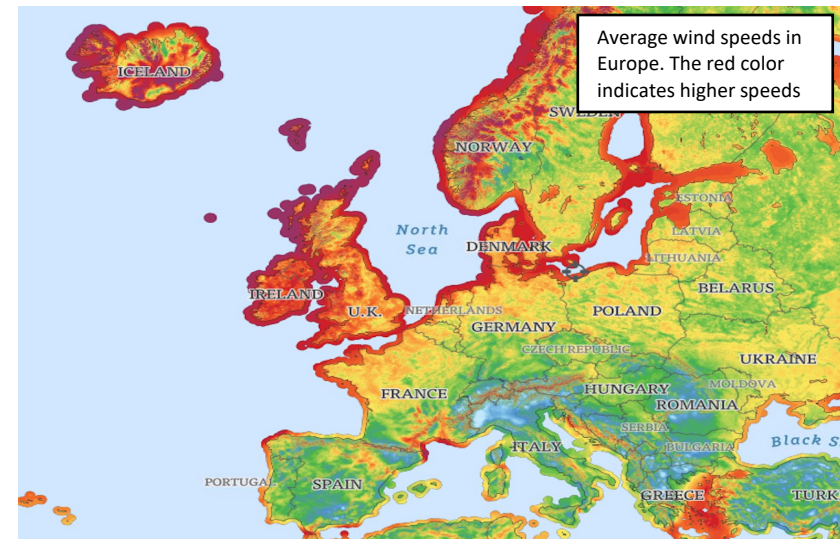
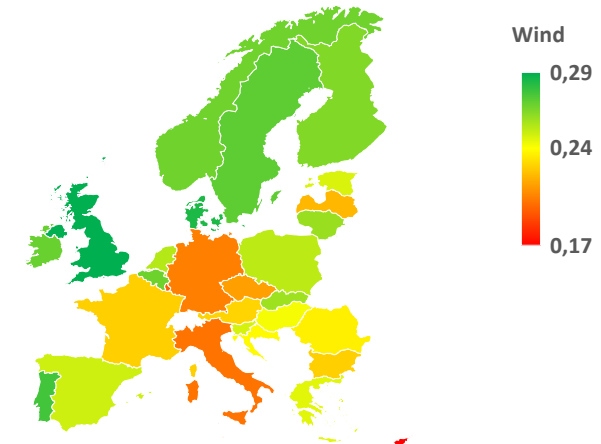
Αιολική ενέργεια → Μη ελεγχόμενη παραγωγή

Οι συντελεστές δυναμικότητας εξαρτώνται πρωτίστως από την ταχύτητα του ανέμου. Καθοριστικοί παράγοντες είναι:

- Διαστάσεις ανεμογεννητριών
- Υπεράκτια αιολικά πάρκα (μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου πάνω από τη θάλασσα)
- Γεωγραφική θέση (περιοχές με μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου όπως η Βόρεια Θάλασσα και το Αιγαίο Πέλαγος)

Μεγαλύτερες τιμές συντελεστών δυναμικότητας παρατηρούνται σε χώρες της Ευρώπης με μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό (Ηνωμένο Βασίλειο, Δανία, Ελλάδα)

Average Capacity Factor of Wind (2012-2021)



Συντελεστές δυναμικότητας στην ελεγχόμενη παραγωγή

Στις πηγές με ελεγχόμενη παραγωγή ενέργειας η τιμή του συντελεστή δυναμικότητας είναι συνήθως αποτέλεσμα του επιχειρησιακού σχεδιασμού του κάθε έργου και ευρύτερα της ενεργειακής πολιτικής που ακολουθείται.

Μεγάλα υδροηλεκτρικά: Διαφορετική προσέγγιση από κάθε χώρα, σημαντική ευελιξία ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους χάρη στη δυνατότητα αποθήκευσης

- Λειτουργία ως έργα βάσης → Μεγάλοι συντελεστές δυναμικότητας (πχ. Νορβηγία)
- Λειτουργία ως έργα αιχμής → Μικροί συντελεστές δυναμικότητας (πχ. Ελλάδα)

Ορυκτά καύσιμα: Κυρίως έργα βάσης με συνεχή λειτουργία σε ορισμένο ποσοστό της ονομαστικής ισχύος → Μεγάλοι συντελεστές δυναμικότητας

Πυρηνική ενέργεια: Κατά πλειοψηφία έργα βάσης, συνεχής λειτουργία σε πλήρη ισχύ με μικρές διακοπές συντήρησης και ανεφοδιασμού → Πολύ μεγάλοι συντελεστές δυναμικότητας

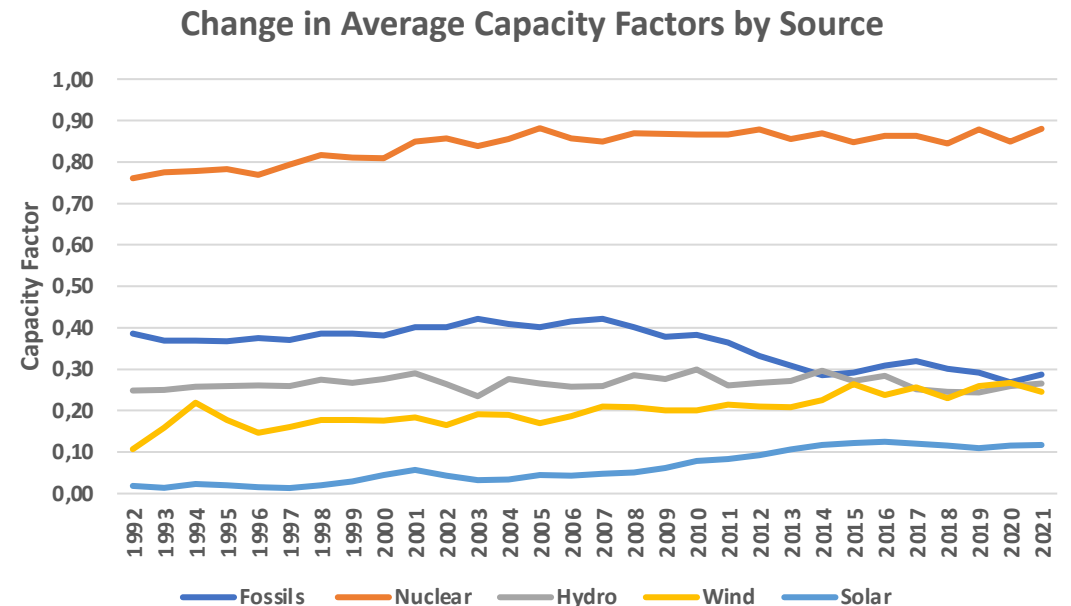
Μεταβολή των συντελεστών δυναμικότητας

Ορυκτά καύσιμα: Σημαντική μείωση των συντελεστών δυναμικότητας εξαιτίας της μείωσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ειδικά μετά την μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα Ευρωπαϊκά συστήματα

Υδροηλεκτρικά: Παρατηρούνται σταθερές τιμές χωρίς σημαντικές μεταβολές

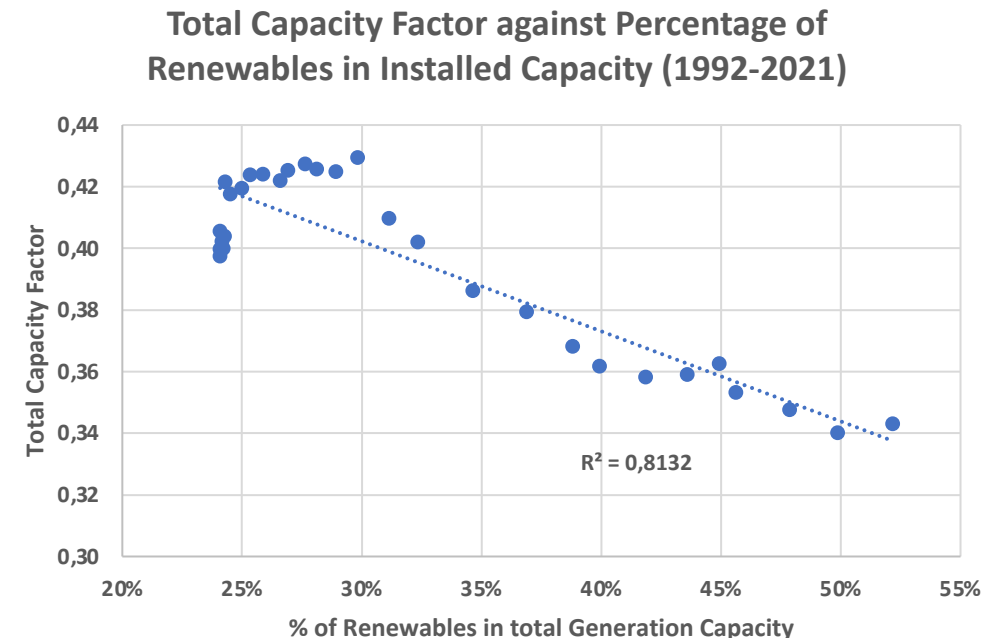
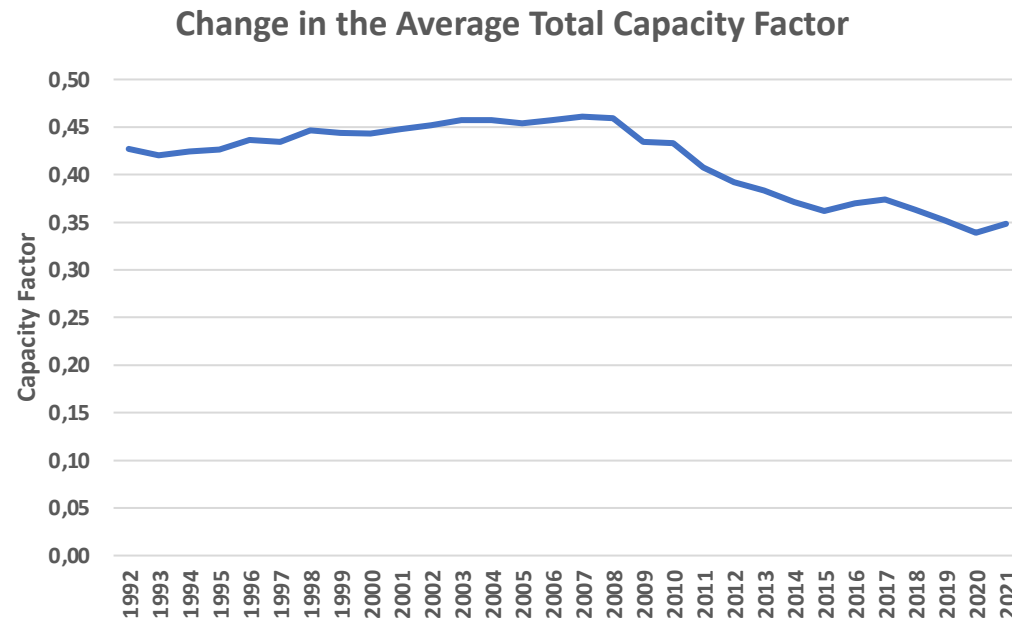
Αιολική και ηλιακή ενέργεια: Σημαντική αύξηση κυρίως λόγω των τεχνολογικών βελτιώσεων → Αύξηση αποδοτικότητας, παραγωγή μεγαλύτερων ποσών ενέργειας

Πυρηνική ενέργεια: Μικρή αύξηση που οφείλεται στην αύξηση της παραγωγής κατά την δεκαετία του 1990 ως πρώτη προσπάθεια αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων



Μεταβολές στον μέσο συντελεστή δυναμικότητας

- Σημαντική μείωση του μέσου συντελεστή δυναμικότητας των υπό μελέτη χωρών ειδικά μετά το 2010.
- Μεγάλη αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος (λόγω της ταχείας ενσωμάτωσης των ΑΠΕ) χωρίς την αντίστοιχη αύξηση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ ενσωμάτωσης ΑΠΕ και συντελεστών δυναμικότητας

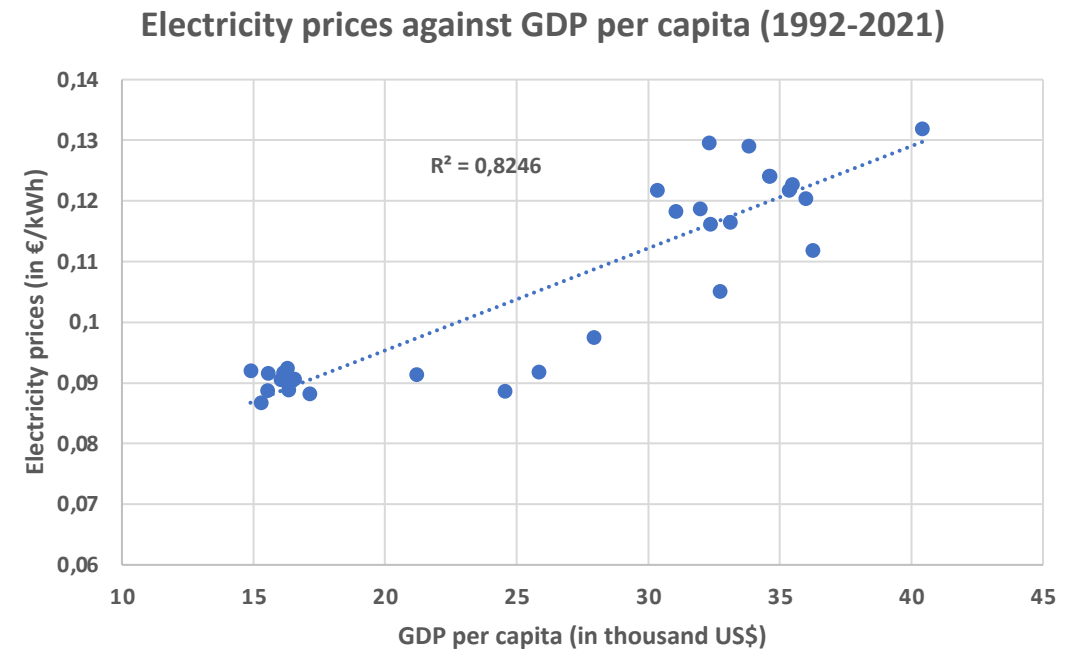


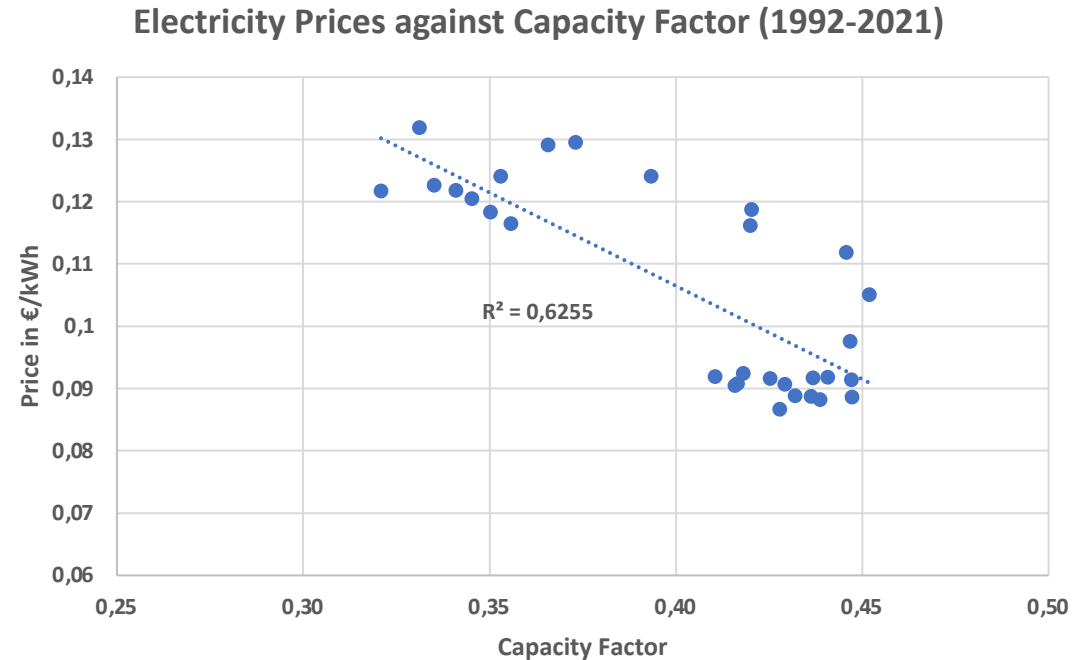
Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψιν πλήθος παραγόντων

Επιρροή του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος

- ΑΕΠ → Δείκτης οικονομικής ανάπτυξης
- Αύξηση του κατά κεφαλήν ΑΕΠ αποτελεί δείκτη βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου
- Διεύρυνση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (πχ. βιομηχανία) και αύξηση ζήτησης σε ενέργεια → Άνοδος των τιμών
- Αποδεικνύεται η ύπαρξη πολύ ισχυρής θετικής συσχέτισης μεταξύ κατά κεφαλήν ΑΕΠ και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας





Συμπεράσματα

Από την μελέτη των ευρύτερων μεταβολών στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα:

- Σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς σύνθεση του μείγματος ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των χωρών της Ευρώπης
- Ενιαία τάση ενσωμάτωσης των ΑΠΕ (με μεγάλους ρυθμούς) στα ηλεκτρικά συστήματα με στόχο την σταδιακή αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων
- Κυμαινόμενη φύση των ΑΠΕ (αβεβαιότητα στην παραγωγή) → Όχι πλήρης παροπλισμός των συμβατικών καυσίμων
- Δυσανάλογη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος χωρίς αντίκρισμα στη ζήτηση για ενέργεια
- Τελικά μικρότεροι συντελεστές δυναμικότητας → Επίπτωση στις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας

Ερευνητικές προοπτικές

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής δημιουργούνται ορισμένες προοπτικές για περεταίρω έρευνα:

1. Βελτιστοποίηση στη διαχείριση της παραγωγής και προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και τη χαμηλή ικανότητα αποθήκευσης σε μεγάλη κλίμακα
2. Αξιολόγηση των επιπτώσεων της αύξησης στη χρήση των ανανεώσιμων πηγών στη σταθερότητα των ηλεκτρικών συστημάτων, και την ενεργειακή ασφάλεια σε εθνικό και Ευρωπαϊκό επίπεδο
3. Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των ευρωπαϊκών ενεργειακών στρατηγικών για την απομάκρυνση από τα ορυκτά καύσιμα
4. Διερεύνηση της επιρροής του πολέμου στην Ουκρανία στις συνιστώσες της ηλεκτρικής ενέργειας και στην ενεργειακή ασφάλεια στην Ευρώπη

ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

ΣΤΕΡΓΙΟΣ ΒΛΑΧΟΓΙΑΝΝΗΣ

Ιούλιος 2024