

ΚΑΛΑΦΑΤΗΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ-ΟΘΩΝΑΣ

«Διερεύνηση των δυνατοτήτων της αγοράς με προγνωστικά μοντέλα διείσδυσης των Φωτοβολταϊκών Στέγης (Roof Top PVs) σε αστικές περιοχές της Ευρώπης»

Τομέας: Βιομηχανική Διοίκηση & Επιχειρησιακή Έρευνα

Επιβλέπων: Τόλης Αθανάσιος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2025



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

--- κενή σελίδα ---

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί για μένα το επιστέγασμα μιας ιδιαίτερα απαιτητικής πορείας, καθώς οι σπουδές μου εξελίχθηκαν παράλληλα με συνεχή επαγγελματική δραστηριότητα. Ο συνδυασμός των απαιτήσεων της σχολής με τις υποχρεώσεις της εργασίας δεν ήταν εύκολος, γεγονός που κάνει τη σημερινή στιγμή ακόμη πιο σημαντική.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά τις δύο εταιρείες στις οποίες εργάστηκα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, την κατασκευαστική εταιρεία NOE καθώς και την Archadius, όπου εργάζομαι μέχρι και σήμερα, για την κατανόηση και τη στήριξη που επέδειξαν σε όλη αυτή τη διαδρομή. Η ευελιξία και η θετική στάση τους απέναντι στις ανάγκες της φοίτησής μου έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στο να μπορέσω να φτάσω ως εδώ.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ επίσης τους φίλους και συμφοιτητές μου, με τους οποίους μοιραστήκαμε όχι μόνο γνώσεις και εμπειρίες, αλλά και τις προκλήσεις και τις δυσκολίες αυτών των χρόνων. Η αλληλοστήριξη και η συντροφικότητα ήταν πολλές φορές το στοιχείο που έκανε τη διαφορά.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στην οικογένειά μου, που με στήριξε αθόρυβα αλλά ουσιαστικά σε κάθε στάδιο της προσπάθειας, προσφέροντάς μου το πλαίσιο σταθερότητας που χρειάστηκα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Αθανάσιο Τόλη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για την ουσιαστική καθοδήγηση και υποστήριξή του σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η συνέπειά του, η διαθεσιμότητά του και οι εβδομαδιαίες του παρατηρήσεις λειτούργησαν καταλυτικά στη διαμόρφωση και την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης. Η συνεργασία μας αποτέλεσε για μένα την πιο ουσιαστική και θετική εμπειρία καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

--- κενή σελίδα ---

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περιεχόμενα	5
Έποψη	8
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Σκοπός και Αντικείμενο της Εργασίας	9
1.2 Κίνητρο και Ερευνητικά Ερωτήματα	10
1.3 Δομή της Εργασίας	11
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	12
2.1 Η Διεισδυτικότητα των Φωτοβολταϊκών Στέγης στην Ευρώπη	12
2.1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση ανά Χώρα	15
2.1.2 Ανάλυση των Αποτελεσμάτων ανά Χώρα	22
2.2 Σημασία και Προκλήσεις στην Πρόγνωση της Εξέλιξης.....	26
2.3 Μέθοδοι Πρόβλεψης.....	27
2.3.1 Νευρωνικά Δίκτυα	28
2.3.2 Μαθηματικά Μοντέλα Ανάπτυξης.....	33
2.3.3 Ανάλυση Ευαισθησίας / Ελαστικότητας.....	34
3. Δεδομένα και Επεξεργασία	36
3.1 Πηγές Δεδομένων	37
3.2 Δομή και Μορφή των Χρονοσειρών	37
3.3 Επεξεργασία και Καθαρισμός Δεδομένων	38
3.4 Μετασχηματισμοί για Ανάλυση Ευαισθησίας	39
3.5 Πίνακες δεδομένων.....	40
4. Μεθοδολογία.....	44
4.1 Υλοποίηση Νευρωνικού Δικτύου	44

4.2	Περιγραφή του Growth Model.....	47
4.3	Διαφορές μεταξύ μοντέλων.....	48
4.4	Δοκιμές Ανάλυσης Ελαστικότητας	50
5.	Αποτελέσματα.....	52
5.1	Πρόβλεψη με Νευρωνικά Δίκτυα	52
	Βέλγιο	53
	Γαλλία	54
	Γερμανία	55
	Ελλάδα	56
	Ιταλία.....	57
	Ολλανδία	58
	Πολωνία.....	59
	Ισπανία	60
	Ελβετία	61
	Ηνωμένο Βασίλειο.....	62
5.2	Πρόβλεψη με Growth Model.....	63
	Βέλγιο	63
	Γαλλία	64
	Γερμανία	65
	Ελλάδα	66
	Ιταλία	67
	Ολλανδία.....	68
	Πολωνία.....	69
	Ισπανία.....	70
	Ελβετία.....	71
	Ηνωμένο Βασίλειο	72
5.3	Σύγκριση Μεθόδων.....	73

Βέλγιο.....	74
Γαλλία	75
Γερμανία	76
Ελλάδα	77
Ιταλία.....	78
Ολλανδία	79
Πολωνία.....	80
Ισπανία	81
Ελβετία	82
Ηνωμένο Βασίλειο.....	83
Επίδραση Μεταβολών (Ευαισθησία / Ελαστικότητα)	84
Βέλγιο	85
Γαλλία	87
Γερμανία	89
Ελλάδα	91
Ιταλία.....	93
Ολλανδία	94
Πολωνία.....	95
Ισπανία	97
Ελβετία	98
Ηνωμένο Βασίλειο.....	100
6. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	102
6.1 Κύρια Συμπεράσματα	102
6.1.1 Συμπεράσματα για την εξέλιξη των RTPV στην Ελλάδα	103
6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	104
Κατάλογος Βιβλιογραφικών Αναφορών	106

Έποψη

Η παρούσα εργασία μελετά την πρόβλεψη της μελλοντικής εξέλιξης της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, με έμφαση σε μεθόδους βασισμένες σε χρονοσειρές και μηχανική μάθηση, στοχεύοντας στη διερεύνηση της δυνατότητας αξιόπιστης πρόγνωσης μέσω νευρωνικών δικτύων τύπου LSTM, καθώς και μέσω παραδοσιακών μαθηματικών μοντέλων ανάπτυξης (Growth Models), για τη σύγκριση της αποδοτικότητας και της ευελιξίας των δύο προσεγγίσεων.

Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών στέγης στην Ευρώπη, συνοδευόμενο από βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση των τάσεων σε επιλεγμένες χώρες. Ιδιαίτερη πρόκληση αποτέλεσε η απουσία διαθέσιμων χρονοσειρών εγκατεστημένης ισχύος αποκλειστικά για φωτοβολταϊκά στέγης, γεγονός που οδήγησε στην ανάγκη εκτίμησης των σχετικών τιμών μέσω παραδοχών. Οι εκτιμήσεις βασίστηκαν σε συνδυασμό επίσημων πηγών, ποσοτικών μεριδίων επί της συνολικής ισχύος φωτοβολταϊκών και εμπειρικής τεκμηρίωσης, ώστε να προσεγγιστεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια η εξέλιξη του κλάδου.

Το ερευνητικό σκέλος της εργασίας βασίζεται στην εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων πρόβλεψης: αφενός ενός νευρωνικού δικτύου τύπου LSTM και αφετέρου ενός παραμετρικού μοντέλου λογιστικής ανάπτυξης (Growth Model). Αφού γίνει ο απαραίτητος καθαρισμός και μετασχηματισμός των δεδομένων ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος, κάθε μοντέλο εκπαιδεύεται ή βαθμονομείται ξεχωριστά για να παράγει προβλέψεις εξαετούς ορίζοντα. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων παρουσιάζονται συγκριτικά σε κοινά γραφήματα ανά χώρα, διευκολύνοντας την οπτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους. Τέλος, εφαρμόζεται ανάλυση ευαισθησίας $\pm 5\%$ στα ιστορικά δεδομένα, με στόχο να εκτιμηθεί ο βαθμός επίδρασης μικρών μεταβολών στην καμπύλη πρόβλεψης και να αξιολογηθεί η σταθερότητα των μοντέλων.

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με βάση την ακρίβεια, τη συμπεριφορά σε συνθήκες αβεβαιότητας και την ερμηνευσιμότητα των μοντέλων, ενώ διατυπώνονται συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, με την εργασία να προσφέρει πρακτικές ενδείξεις για τη χρήση προγνωστικών μεθόδων στην ανάλυση του ενεργειακού μετασχηματισμού και να μπορεί να αξιοποιηθεί από φορείς χάραξης πολιτικής, αναλυτές ενέργειας και ερευνητές.

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Αντικείμενο της Εργασίας

Η κλιματική κρίση και οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για απανθρακοποίηση μέχρι το 2050 καθιστούν αναγκαία τη ραγδαία διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), με ιδιαίτερη έμφαση στην αποκεντρωμένη παραγωγή. Στο πλαίσιο αυτό, τα φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης (rooftop PV) αναδεικνύονται ως κρίσιμο στοιχείο της ενεργειακής μετάβασης, καθώς προσφέρουν οφέλη όπως η μείωση ενεργειακού κόστους, η αύξηση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και η αποσυμφόρηση των δικτύων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πρόγνωση της μελλοντικής διείσδυσης των φωτοβολταϊκών στέγης σε επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες, μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής σύγχρονων μεθοδολογικών εργαλείων. Ειδικότερα, αξιοποιούνται Νευρωνικά Δίκτυα τύπου LSTM και Μαθηματικά Μοντέλα Ανάπτυξης (Growth Models), σε συνδυασμό με Ανάλυση Ευαισθησίας, ώστε να παραχθούν αξιόπιστες εκτιμήσεις για την εγκατεστημένη ισχύ έως το 2030.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί:

1. Η δημιουργία τεκμηριωμένων χρονοσειρών εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης ανά χώρα, βασισμένων σε επίσημα δεδομένα και τεκμηριωμένες παραδοχές.
2. Η πρόβλεψη της μελλοντικής εξέλιξης αυτών των τιμών μέσω νευρωνικών δικτύων και μαθηματικής μοντελοποίησης.
3. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μεθόδων πρόβλεψης.
4. Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας των εκτιμήσεων με ανάλυση ευαισθησίας και εναλλακτικά σενάρια.

Η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στη βελτίωση του ενεργειακού σχεδιασμού και στη διαμόρφωση εθνικών και ευρωπαϊκών πολιτικών υποστήριξης της αποκεντρωμένης παραγωγής, παρέχοντας ένα εργαλείο πρόβλεψης προσαρμοσμένο στις ιδιαιτερότητες κάθε χώρας.

1.2 Κίνητρο και Ερευνητικά Ερωτήματα

Η ενεργειακή μετάβαση προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις της εποχής μας. Στο πλαίσιο αυτό, τα φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης αποκτούν αυξανόμενη σημασία ως μορφή αποκεντρωμένης και βιώσιμης παραγωγής ενέργειας. Το ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία πηγάζει από την ανάγκη κατανόησης και πρόβλεψης της εξέλιξης της εγκατεστημένης ισχύος αυτών των συστημάτων, ώστε να υποστηριχθούν τεκμηριωμένα οι πολιτικές και επενδυτικές αποφάσεις σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Παρότι διατίθενται δεδομένα για τη συνολική φωτοβολταϊκή ισχύ ανά χώρα, τα στοιχεία που αφορούν αποκλειστικά τα φωτοβολταϊκά στέγης είναι ελλιπή ή ασυνεπή. Αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό ερευνητικό κενό, που η παρούσα μελέτη επιδιώκει να καλύψει με τη βοήθεια παραδοχών, βιβλιογραφικής τεκμηρίωσης και καινοτόμων μεθοδολογιών πρόβλεψης.

Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που τίθενται είναι τα εξής:

- Ποια είναι η τρέχουσα κατάσταση και ποιες οι εκτιμώμενες τιμές της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στις επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες;
- Πώς μπορεί να μοντελοποιηθεί και να προβλεφθεί η μελλοντική εξέλιξη της διείσδυσης, χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα (LSTM) και τα Growth Models;
- Πόσο ευαίσθητες είναι οι προβλέψεις στις βασικές παραδοχές και τα διαθέσιμα δεδομένα;
- Ποια είναι η συγκριτική απόδοση μεταξύ Νευρωνικών Δικτύων τύπου LSTM και παραδοσιακών μοντέλων λογιστικής ανάπτυξης (Growth Models) ως προς την προβλεπτική ακρίβεια, τη σταθερότητα και την ευαισθησία σε αβεβαιότητες;
- Ποιες ευρωπαϊκές χώρες εμφανίζουν τη μεγαλύτερη αναμενόμενη διείσδυση φωτοβολταϊκών στέγης, βάσει των προγνωστικών αποτελεσμάτων;
- Πώς μπορούν τα αποτελέσματα να αξιοποιηθούν για τη στήριξη πολιτικών για την ενεργειακή αυτονομία, την αυτοπαραγωγή και την ενίσχυση των ΑΠΕ;

Το κίνητρο της εργασίας ενισχύεται από την πραγματική ανάγκη λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο ενεργειακό τοπίο, όπου η ακρίβεια της πρόβλεψης και η ευαισθησία των μοντέλων αποκτούν καθοριστικό ρόλο.

1.3 Δομή της Εργασίας

Η εργασία είναι οργανωμένη σε επτά κεφάλαια, τα οποία παρουσιάζουν με δομημένο και προοδευτικό τρόπο τη θεωρητική τεκμηρίωση, τη μεθοδολογική προσέγγιση, την ανάλυση δεδομένων και τα αποτελέσματα της έρευνας:

- **Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή:** Παρουσιάζει τον σκοπό, το αντικείμενο και το κίνητρο της εργασίας, καθώς και τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα. Επιπλέον, περιγράφεται η συνολική διάρθρωση της μελέτης.
- **Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό Υπόβαθρο:** Περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών στέγης στην Ευρώπη, τις προκλήσεις και τη σημασία της πρόγνωσης, καθώς και την επισκόπηση των μεθοδολογικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται, όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα, τα Μαθηματικά Μοντέλα Ανάπτυξης και η Ανάλυση Ευαισθησίας.
- **Κεφάλαιο 3 – Δεδομένα και Επεξεργασία:** Εστιάζει στις πηγές δεδομένων που χρησιμοποιούνται, στη διαμόρφωση των χρονοσειρών, στις διαδικασίες καθαρισμού και μετασχηματισμού των δεδομένων, και στην προετοιμασία τους για ανάλυση.
- **Κεφάλαιο 4 – Μεθοδολογία:** Παρουσιάζει λεπτομερώς την εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων LSTM, τη διαμόρφωση των μαθηματικών μοντέλων ανάπτυξης και την υλοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας.
- **Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα:** Αναλύει τα αποτελέσματα των προβλέψεων τόσο με τα LSTM δίκτυα όσο και με τα growth models, συγκρίνει τις μεθόδους και αξιολογεί την ευαισθησία των μοντέλων σε παραδοχές και μεταβολές.
- **Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και Προτάσεις:** Συνοψίζει τα βασικά ευρήματα της έρευνας και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική μελέτη και βελτιστοποίηση των μεθόδων.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Η Διεισδυτικότητα των Φωτοβολταϊκών Στέγης στην Ευρώπη

Η διεύθυνση των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων στέγης στην Ευρώπη αποτελεί βασικό δείκτη ενεργειακής μετάβασης προς την καθαρή ενέργεια στην Ευρωπαϊκή Ένωση, καθώς επίσης και σε ένα πιο αποκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα. Τα Φ/Β σε στέγες αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της αποκεντρωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, προσφέροντας ταυτόχρονα ενεργειακή ανεξαρτησία, μείωση εκπομπών CO₂ και εξοικονόμηση κόστους για τους καταναλωτές (IEA, 2023).

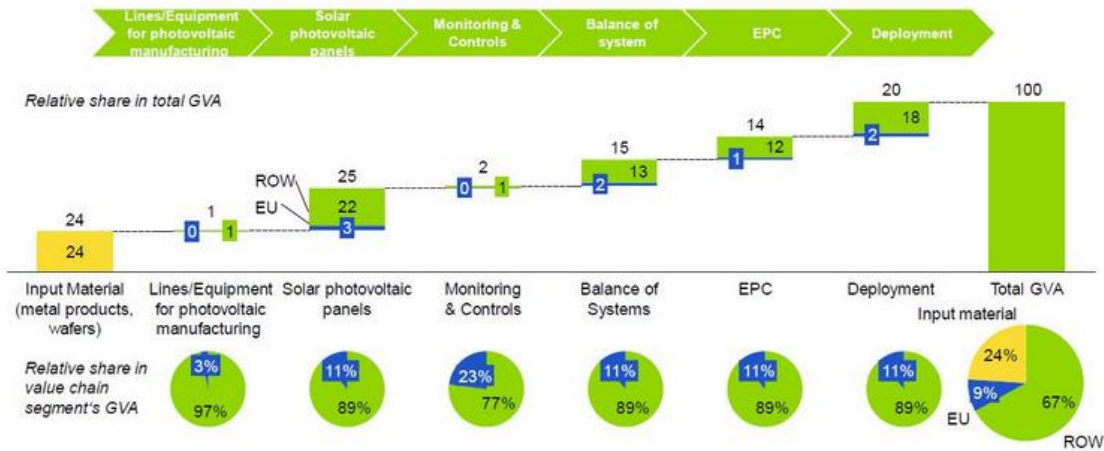
Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως προτεραιότητα την αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας, με τα φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης να διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο σε αυτήν τη στρατηγική. Η Ευρωπαϊκή Στρατηγική για την Ηλιακή Ενέργεια (EU Solar Energy Strategy¹), που παρουσιάστηκε τον Μάιο του 2022, στοχεύει στην ταχεία ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας, με ιδιαίτερη έμφαση στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες. Ένα από τα βασικά εργαλεία της στρατηγικής είναι η "European Solar Rooftops Initiative", η οποία προβλέπει την υποχρεωτική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε νέα δημόσια και εμπορικά κτίρια από το 2026 και σε νέα οικιστικά κτίρια από το 2029 (EU Solar Energy Strategy, 2022).

Η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών στέγης προσφέρει πολλαπλά οφέλη (EU Solar Energy Strategy, 2022):

- **Μείωση απωλειών μεταφοράς:** Η παραγωγή ενέργειας κοντά στο σημείο κατανάλωσης μειώνει τις απώλειες που προκύπτουν κατά τη μεταφορά μέσω του δικτύου.
- **Ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας:** Η τοπική παραγωγή ενέργειας μειώνει την εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα και ενισχύει την ανθεκτικότητα του ενεργειακού συστήματος.
- **Οικονομικά οφέλη για τους καταναλωτές:** Οι καταναλωτές μπορούν να μειώσουν τους λογαριασμούς ενέργειας και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να πωλούν την πλεονάζουσα ενέργεια στο δίκτυο.

¹ <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/package-repowereu-plan/file-eu-solar-strategy>

- **Προστασία του περιβάλλοντος:** Η αξιοποίηση των υφιστάμενων δομών (στέγες) για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών μειώνει την ανάγκη για χρήση γης και προστατεύει τη βιοποικιλότητα.



Σχήμα 2-1: Κατανομή της Ακαθάριστη Προστιθέμενης Αξίας (GVA) στην Αλυσίδα Αξίας των Φωτοβολταϊκών και η Συμμετοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (Πηγή: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52022DC0221&utm>)

Το Σχήμα 2-1 παρουσιάζει την κατανομή της ακαθάριστης προστιθέμενης αξίας (Gross Value Added - GVA) σε κάθε στάδιο της αλυσίδας αξίας των φωτοβολταϊκών (PV), καθώς και τη συγκριτική συνεισφορά της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU) έναντι του υπόλοιπου κόσμου (ROW). Αυτό το διάγραμμα υπογραμμίζει ότι παρόλο που η Ευρώπη ηγείται στη διεύθυνση φωτοβολταϊκών στέγης, μεγάλο μέρος της οικονομικής αξίας δημιουργείται εκτός της ΕΕ, κυρίως λόγω της παγκόσμιας κυριαρχίας ασιατικών χωρών στην παραγωγή ηλιακών πάνελ. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τεκμηριώσει την ανάγκη για ενίσχυση της εγχώριας παραγωγής και της τεχνολογικής κυριαρχίας της ΕΕ στο πλαίσιο της ενεργειακής αυτάρκειας.

Η στρατηγική αυτή εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο του REPowerEU², το οποίο στοχεύει στην απεξάρτηση της ΕΕ από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα πριν το 2030, μέσω της αύξησης της παραγωγής καθαρής ενέργειας και της διαφοροποίησης των ενεργειακών προμηθευτών. Συνολικά, η προώθηση των φωτοβολταϊκών στέγης αποτελεί βασικό πυλώνα της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής, συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων για το κλίμα, την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και την προώθηση της ενεργειακής δημοκρατίας.

² <https://en.wikipedia.org/wiki/REPowerEU?utm>

Σύμφωνα με την έκθεση EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027 της SolarPower Europe, το 2023 η ΕΕ εγκατέστησε 55.9 GW νέας φωτοβολταϊκής ισχύος, εκ των οποίων τα 37 GW (66%) ήταν σε στέγες (rooftop solar). Το ποσοστό αυτό αναμένεται να μειωθεί ελαφρώς στο 62% έως το 2027 λόγω της αύξησης των utility-scale εγκαταστάσεων. Παρ' όλα αυτά, η τάση παραμένει υπέρ της αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας μέσω στεγών (SolarPower Europe, 2024).

Η διείσδυση φωτοβολταϊκών σε στέγες ποικίλει μεταξύ των χωρών της ΕΕ. Παράγοντες όπως τα σχήματα net metering, οι επιδοτήσεις κεφαλαίου, η διαθεσιμότητα γης και η πυκνότητα δόμησης επηρεάζουν σημαντικά το ποσοστό διείσδυσης. Για παράδειγμα, χώρες όπως η Ολλανδία, το Βέλγιο και η Γερμανία έχουν υψηλό ποσοστό (60-70%, 55-65%, και 50-60% αντίστοιχα) λόγω περιορισμένης διαθέσιμης γης, υψηλής πυκνότητας πληθυσμού και ισχυρών προγραμμάτων επιδότησης (Solar Power Europe, 2023). Η Ολλανδία είναι πρωταγωνίστρια σε κατά κεφαλήν εγκαταστάσεις, με 40% των εγκαταστάσεων σε εμπορικές στέγες και 33% σε οικιακές. Αντίθετα, χώρες με υψηλή ηλιοφάνεια και διαθεσιμότητα γης, όπως η Ισπανία και η Ελλάδα, τείνουν να ευνοούν τα μεγάλης κλίμακας πάρκα (εγκαταστάσεις utility-scale - μεγάλης κλίμακας), με χαμηλότερη σχετική συμμετοχή Φ/Β στέγης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 30–40%. Στην Ελλάδα, το 2023, από 1.574 MW νέας ισχύος, μόνο τα 250 MW προήλθαν από net metering, με μόλις 20% εξ αυτών να είναι οικιακά.

Ωστόσο, η διείσδυσή τους παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των κρατών-μελών, λόγω διαφορών στην πολιτική ενίσχυσης, στη διαθεσιμότητα γης, στην ηλιοφάνεια, και στη δομή της αγοράς ενέργειας. Παράλληλα, η ενεργειακή κρίση 2022–2023 επιτάχυνε προσωρινά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε στέγες, ιδιαίτερα στον εμπορικό και βιομηχανικό τομέα (C&I), ο οποίος έφτασε το 35% των νέων εγκαταστάσεων το 2023. Ωστόσο, η έλλειψη σαφούς διαχωρισμού στα στατιστικά στοιχεία μεταξύ utility-scale και rooftop εγκαταστάσεων εξακολουθεί να αποτελεί περιορισμό για την ακριβή εκτίμηση διείσδυσης ανά χώρα.

Συμπερασματικά, η διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης στην Ευρώπη αποτελεί έναν από τους βασικούς δείκτες της μετάβασης προς ένα καθαρότερο και αποκεντρωμένο ενεργειακό σύστημα. Η ευρωπαϊκή στρατηγική για το κλίμα και την ενέργεια προωθεί ενεργά την αποκεντρωμένη παραγωγή, με τα φωτοβολταϊκά στέγης να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Ωστόσο, η διείσδυσή τους παρουσιάζει σημαντικές

διαφοροποιήσεις μεταξύ των κρατών-μελών, λόγω διαφορών στην πολιτική ενίσχυσης, στη διαθεσιμότητα γης, στην ηλιοφάνεια, και στη δομή της αγοράς ενέργειας.

2.1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση ανά Χώρα

Παρακάτω παρατίθεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες, εστιάζοντας στη διεύθυνση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες, με βάση τις πιο πρόσφατες διαθέσιμες πηγές:

2.1.1.1 Βέλγιο

Το Βέλγιο, με πληθυσμό περίπου 11,5 εκατομμυρίων και υψηλή πυκνότητα κατοίκησης, έχει περιορισμένες διαθέσιμες εκτάσεις για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα. Αυτό έχει οδηγήσει σε σημαντική ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες. Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών έφτασε τα 10 GW, με την πλειονότητα να αφορά οικιακές εγκαταστάσεις κάτω των 10 kW. Η πολιτική υποστήριξη, όπως οι επιδοτήσεις και τα φορολογικά κίνητρα, έχει ενισχύσει περαιτέρω την υιοθέτηση των οικιακών φωτοβολταϊκών³.

Σύμφωνα με το EnergyVill⁴, η τεχνική δυναμικότητα για φωτοβολταϊκά σε στέγες εκτιμάται στα 99,6 GW, με το μεγαλύτερο μέρος να βρίσκεται στη Φλάνδρα. Η απλοποίηση των διοικητικών διαδικασιών και η υποστήριξη μέσω πράσινων πιστοποιητικών έχουν ενισχύσει την ανάπτυξη. Η μελέτη Schardt & te Heesen (Schardt and te Heesen, 2021) αναφέρει ότι η μέση ειδική απόδοση (specific yield) των φωτοβολταϊκών σε στέγες στο Βέλγιο είναι 959 kWh/kWp, κάτι που φανερώνει ικανοποιητική απόδοση συστημάτων σε κατοικημένες περιοχές. Το Performance Ratio (PR) διατηρείται σταθερό γύρω στο 0,73, υποδηλώνοντας καλή ενεργειακή απόδοση ανεξαρτήτως κλίμακας.

2.1.1.2 Γαλλία

Η Γαλλία, με πληθυσμό περίπου 67 εκατομμυρίων, έχει επιδείξει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών έφτασε τα 24,6 GW. Η κυβέρνηση έχει θέσει στόχο την επίτευξη 60 GW μέχρι το 2030, με έμφαση στις εγκαταστάσεις σε στέγες μέσω προγραμμάτων αυτοκατανάλωσης και επιδοτήσεων.

³ <https://www.pvknowhow.com/solar-report/belgium/?utm>

⁴ <https://www.energytrend.com/news/20240326-46168.html?utm>

Σύμφωνα με τους Schardt & te Heesen (Schardt and te Heesen, 2021), η Γαλλία παρουσιάζει από τις υψηλότερες ειδικές αποδόσεις με 1102 kWh/kWp, ενισχύοντας τη σκοπιμότητα των στεγασμένων συστημάτων. Παρά τις γεωγραφικές διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία, το PR διατηρείται στο 0,73, καθιστώντας τα οικιακά συστήματα ελκυστική επιλογή στο ενεργειακό μείγμα της χώρας.

2.1.1.3 Γερμανία

Η Γερμανία, με πληθυσμό περίπου 83 εκατομμυρίων, είναι πρωτοπόρος στην υιοθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ξεπέρασε τα 100 GW, με το 38% να αφορά οικιακές στέγες και το 29% εμπορικές στέγες.

Η πολιτική υποστήριξη μέσω του νόμου EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz⁵) και τα προγράμματα net metering έχουν ενισχύσει σημαντικά τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών σε στέγες⁶. Παρά τις προκλήσεις, όπως η έλλειψη τεχνικού προσωπικού, η συμμετοχή στεγών παραμένει υψηλή. Η ειδική απόδοση φωτοβολταϊκών σε στέγες στη Γερμανία σύμφωνα με το άρθρο είναι 990 kWh/kWp, με σταθερό PR ~0,73, ενδεικτικό της αξιοπιστίας του συστήματος ακόμη και σε περιοχές με λιγότερη ηλιοφάνεια (Schardt and te Heesen, 2021).

2.1.1.4 Ελλάδα

Η Ελλάδα, με πληθυσμό περίπου 10,4 εκατομμυρίων, έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην υιοθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών έφτασε τα 7,1 GW. Η αυτοκατανάλωση μέσω net metering έχει αυξηθεί σημαντικά, με τις αιτήσεις να αυξάνονται κατά 65% μεταξύ 2022 και 2023^{7,8}.

Σύμφωνα με τον Εθνικό Σχεδιασμό για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια προβλέπεται να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο στη μετάβαση της χώρας σε καθαρές πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα, το 2050 τα φωτοβολταϊκά θα καλύπτουν το 32,5% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, με

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/German_Renewable_Energy_Sources_Act

⁶ <https://taiyangnews.info/markets/germany-exceeds-100-gw-solar-pv-capacity?utm>

⁷ <https://www.pv-magazine.com/2024/03/28/greeces-2023-pv-additions-hit-1-59-gw/?utm>

⁸ <https://caneurope.org/content/uploads/2024/04/Greece-Residential-Rooftop-Solar-Country-Profile.pdf?utm>

εγκατεστημένη ισχύ που θα φτάσει τα 40,3 GW – ποσό που αντιστοιχεί στο 53,4% της συνολικής ισχύος από ΑΠΕ (Vourdoubas, 2024).

Η υψηλή ηλιοφάνεια στην Ελλάδα καθιστά την παραγωγή ηλιακής ενέργειας εξαιρετικά αποδοτική και πλέον οικονομικά ανταγωνιστική, ακόμα και χωρίς επιδοτήσεις (Kitsoroulou, 2024). Οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πραγματοποιούνται σε ποικίλες διαμορφώσεις, με κυριότερες τις στέγες, το έδαφος και τις προσόψεις κτιρίων. Επιπλέον, νέες τεχνολογίες όπως τα διπλής όψης (bifacial) πάνελ, τα ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά, τα agrivoltaics και τα πλωτά φωτοβολταϊκά (floating PVs) προωθούνται ενεργά ως λύσεις που συνδυάζουν την αποδοτικότητα με περιορισμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Στο πλαίσιο των προβλέψεων του ΕΣΕΚ, εκτιμάται ότι η απαιτούμενη έκταση για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών το 2050 θα είναι μόλις 0,92% της συνολικής επιφάνειας της χώρας – αναλογία που αναδεικνύει τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας για εκτεταμένη χρήση χωρίς σοβαρές επιπτώσεις στις χρήσεις γης (Vourdoubas, 2024).

2.1.1.5 Ιταλία

Η Ιταλία, με πληθυσμό περίπου 59 εκατομμυρίων, έχει επιδείξει σταθερή ανάπτυξη στον τομέα των φωτοβολταϊκών. Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών έφτασε τα 30,28 GW, με το 69% να αφορά εγκαταστάσεις σε στέγες.

Η πολιτική υποστήριξη μέσω επιδοτήσεων και φορολογικών κινήτρων έχει ενισχύσει την υιοθέτηση των φωτοβολταϊκών σε οικιακές και εμπορικές στέγες⁹. Η Ιταλία κατέχει την υψηλότερη απόδοση στα συστήματα στέγης μεταξύ των αναλυθέντων χωρών στο άρθρο του Schardt & te Heesen (Schardt and te Heesen, 2021) με 1195 kWh/kWp, τεκμηριώνοντας την αποδοτικότητα των επενδύσεων σε τέτοιου τύπου εγκαταστάσεις.

2.1.1.6 Ολλανδία

Η Ολλανδία, με πληθυσμό περίπου 17,5 εκατομμυρίων, έχει υψηλή πυκνότητα κατοίκησης και περιορισμένες διαθέσιμες εκτάσεις. Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών έφτασε τα 24,4 GW, με το 53% να αφορά οικιακές εγκαταστάσεις.

Η πολιτική υποστήριξη μέσω επιδοτήσεων και η ευαισθητοποίηση του κοινού έχουν συμβάλει στην ευρεία υιοθέτηση των φωτοβολταϊκών σε στέγες¹⁰. Η απόδοση των

⁹ <https://www.pvknowhow.com/solar-report/italy/?utm>

¹⁰ <https://www.pv-magazine.com/2024/03/25/dutch-pv-additions-hit-4-82-gw-in-2023/?utm>

οικιακών συστημάτων στην Ολλανδία είναι 947 kWh/kWp, ενώ το PR παραμένει σταθερό στο 0,73, ενισχύοντας την αξιοπιστία των προβλέψεων και επενδύσεων (Schardt and te Heesen, 2021).

2.1.1.7 Πολωνία

Η Πολωνία, με πληθυσμό περίπου 38 εκατομμυρίων, έχει σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα των φωτοβολταϊκών (Tomczyk, 2025). Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών έφτασε τα 17,05 GW, με το 74% να αφορά εγκαταστάσεις από αυτοπαραγωγούς — μικροεγκαταστάσεις έως 50 kW που συνήθως τοποθετούνται σε στέγες οικιακών και μικρών εμπορικών κτιρίων (Gulkowski, 2024).

Η πολιτική υποστήριξη υπήρξε καθοριστική για αυτήν την εξέλιξη, με σημαντικά προγράμματα επιδοτήσεων, φορολογικά κίνητρα και σχήματα net metering. Ενδεικτικά, το πρόγραμμα “Mój Prąd”¹¹ («Το Ρεύμα μου») συνέβαλε στην εγκατάσταση πάνω από 1,3 εκατομμυρίων οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων μέχρι το 2023 (Gulkowski, 2024). Επιπλέον, η ανάλυση ενεργειακής απόδοσης μακράς διάρκειας για φωτοβολταϊκό σύστημα στέγης 9,6 kW στην ανατολική Πολωνία αποκάλυψε ότι η μέση ετήσια τελική απόδοση (final yield) υπερβαίνει τα 1000 kWh/kW, ενώ ο συντελεστής απόδοσης (performance ratio, PR) έφτασε το 85%, υποδεικνύοντας εξαιρετικά επίπεδα απόδοσης ακόμα και στις κλιματικές συνθήκες της χώρας (Gulkowski, 2024).

Οι θετικές επιδράσεις από φυσικά φαινόμενα —όπως η απομάκρυνση της σκόνης από τις βροχές το καλοκαίρι— ενίσχυσαν περαιτέρω την ενεργειακή απόδοση. Η Πολωνία συνδυάζει τεχνολογική πρόοδο, υποστηρικτική πολιτική και κατάλληλες κλιματολογικές συνθήκες, και γι’ αυτό το εκτιμώμενο ποσοστό φωτοβολταϊκών στέγης (ως προς τη συνολική ισχύ) δικαιολογείται γύρω στο 70–75%, βάσει των δεδομένων εγκατάστασης και αποδόσεων (Gulkowski, 2024) (Tomczyk, 2025).

2.1.1.8 Ισπανία

Η Ισπανία, με πληθυσμό περίπου 47 εκατομμυρίων, έχει ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών. Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών έφτασε τα 25,5 GW, με περίπου 2 GW να αφορούν εγκαταστάσεις αυτοκατανάλωσης. Η κατάργηση του λεγόμενου "sun tax" (2018) και η

¹¹ <https://powietrze.opolskie.pl/2021/07/20/program-dofinansowania-mikroinstalacji-fotowoltaicznych-moj-prad/?lang=en>

υιοθέτηση ευνοϊκότερων κανονισμών για την αυτοπαραγωγή συνέβαλαν σημαντικά στην αύξηση της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών σε στέγες¹².

Ειδικότερα, η θέσπιση του Νόμου για τα Πλεονάσματα του Δικτύου το 2019 και τα προγράμματα επιδοτήσεων του 2021 ενίσχυσαν τη διάδοση των συστημάτων net metering (Santiago, 2024). Η εφαρμογή πολιτικής αποζημίωσης για την περίσσεια ενέργειας βάσει μηνιαίου συμψηφισμού (1-month net billing) έχει ωστόσο περιορίσει την οικονομική απόδοση των συστημάτων, σε σχέση με σενάρια ετήσιου συμψηφισμού.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Saez et al. (Saez, 2024), αξιολογήθηκε η τεχνικοοικονομική βιωσιμότητα φωτοβολταϊκών σε στέγες σε 8134 ισπανικούς δήμους, με ανάλυση σε ωριαίο επίπεδο, βάσει δεδομένων από 25 εκατομμύρια έξυπνους μετρητές και γεωχωρικών δεδομένων για τη δομή των κτιρίων. Η ανάλυση καταδεικνύει ότι οι αγροτικές περιοχές, χάρη στην αυξημένη διαθεσιμότητα επιφάνειας στέγης, εμφανίζουν υψηλότερο δυναμικό αυτοκατανάλωσης (Saez, 2024). Ωστόσο, η κερδοφορία των συστημάτων εξαρτάται άμεσα από τις πολιτικές αποζημίωσης των πλεοναζουσών κιλοβατώραν, με το ισχύον καθεστώς να μειώνει την οικονομική βιωσιμότητα έως και 60% σε σχέση με σενάρια ευνοϊκότερης πολιτικής (π.χ. 12μηνιαίας αποζημίωσης) (Saez, 2024).

Η μελέτη επίσης αναφέρει ότι ο βέλτιστος βαθμός κάλυψης επιφάνειας στέγης (optimal rooftop occupancy) για μέγιστη οικονομική αποδοτικότητα κυμαίνεται ανάλογα με τα τοπικά χαρακτηριστικά, ενδεικτικά κυμαινόμενο από 40% έως 70% σε αστικά και ημιαστικά περιβάλλοντα (Saez, 2024). Το υψηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση των πολιτών λειτουργούν ως καταλύτες στην περαιτέρω διείσδυση.

Συνεπώς, η Ισπανία αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας όπου η συνδυασμένη επίδραση θετικών ρυθμιστικών παρεμβάσεων και ευνοϊκών φυσικών συνθηκών έχει συμβάλει σημαντικά στην εξάπλωση των φωτοβολταϊκών σε στέγες, με παράλληλη ανάγκη περαιτέρω ενίσχυσης των πολιτικών αποζημίωσης για τη διατήρηση της οικονομικής ελκυστικότητας.

2.1.1.9 Ελβετία

Η Ελβετία, με πληθυσμό περίπου 8,7 εκατομμυρίων, διαθέτει περιορισμένες διαθέσιμες εκτάσεις για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα, γεγονός που ευνοεί την

¹² <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/rooftop-solar-fever-cools-sunny-spain-2024-02-21/?utm>

εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε στέγες και προσόψεις. Σύμφωνα με το “Renewable Energy Outlook for Switzerland” (Trutnevyte et al., 2024), η ταχεία ανάπτυξη του ηλιακού φωτοβολταϊκού (PV) θεωρείται κομβικής σημασίας για την επίτευξη των εθνικών στόχων καθαρής ενέργειας έως το 2035. Το βασικότερο σενάριο προβλέπει ότι από τις συνολικές ανάγκες 35 TWh νέας ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, τουλάχιστον 25–31 TWh θα πρέπει να προέρχονται από φωτοβολταϊκά συστήματα, εκ των οποίων η πλειοψηφία θα εγκατασταθεί σε στέγες και προσόψεις.

Η κοινωνικοπολιτική αποδοχή των φωτοβολταϊκών σε στέγες στην Ελβετία είναι εξαιρετικά υψηλή, και το επενδυτικό ρίσκο για τέτοια έργα παραμένει χαμηλό – σε αντίθεση με τις εγκαταστάσεις σε ανοιχτά πεδία ή σε αλπικές περιοχές, όπου η αποδοχή είναι χαμηλότερη και το ρίσκο υψηλότερο (Mellot et al., 2024). Παράλληλα, οι αναλυτές επισημαίνουν την ανάγκη για σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και ανθρώπινο δυναμικό ώστε να αποφευχθούν τα σημεία συμφόρησης (bottlenecks) λόγω έλλειψης εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού. Η συνολική επένδυση σε οικιακά και εμπορικά συστήματα αναμένεται να προέλθει από δημόσιους φορείς, ιδιώτες και επενδυτές.

Επιπλέον, η έρευνα υπογραμμίζει πως η πλήρης κάλυψη των στόχων απαιτεί συνδυασμό φωτοβολταϊκών με άλλες τεχνολογίες (όπως αιολική ενέργεια και βιομάζα), ωστόσο τα φωτοβολταϊκά σε στέγες διατηρούν τον πρωταγωνιστικό ρόλο (Trutnevyte et al., 2024). Η πολιτική στήριξη της κυβέρνησης, με επιδοτήσεις, κίνητρα αυτοκατανάλωσης και εκστρατείες ενημέρωσης, ενισχύει την προσέγγιση αυτή. Έτσι, παρά την περιορισμένη έκταση και τα υψομετρικά εμπόδια, η Ελβετία στοχεύει σε σχεδόν πλήρως ανανεώσιμο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής έως το 2035 (Trutnevyte et al., 2024) (Mellot et al., 2024).

2.1.1.10 Ηνωμένο Βασίλειο

Το Ηνωμένο Βασίλειο, με πληθυσμό περίπου 67 εκατομμυρίων, έχει σημειώσει πρόοδο στην υιοθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, παρότι η συμμετοχή των ηλιακών στο συνολικό ενεργειακό μείγμα παραμένει μικρότερη σε σύγκριση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες με υψηλότερη ηλιοφάνεια (Book, 2024). Μέχρι το τέλος του 2023, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών έφτασε τα 16 GW, από τα οποία περίπου το 35–40% αφορά εγκαταστάσεις σε στέγες (Statista, 2024). Η κυβέρνηση έχει θέσει στόχο την τριπλασιασμό της ηλιακής ισχύος μέχρι το 2030, κυρίως μέσω του προγράμματος

"Rooftop Revolution"^{13,14}, το οποίο στοχεύει στην απλοποίηση της διαδικασίας εγκατάστασης, την παροχή φορολογικών κινήτρων και την ενίσχυση της αυτοπαραγωγής σε κατοικίες και εμπορικά κτίρια.

Σύμφωνα με την ανάλυση των Badran et al. (Badran, 2024), η συνολική δυναμική εγκατάστασης ηλιακής ενέργειας στις στέγες του ΗΒ ανέρχεται σε 218 TWh/έτος, με δυναμικό ιδιαίτερα έντονο σε περιοχές όπως η νοτιοδυτική Αγγλία και η Ουαλία. Οι συγγραφείς υπογραμμίζουν ότι οι οικιακές εγκαταστάσεις έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν έως και το 58% των ετήσιων αναγκών ενός νοικοκυριού, ενώ η αύξηση της αυτοκατανάλωσης μέσω έξυπνων μετρητών και αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις πιέσεις στο δίκτυο.

Επιπλέον, η μελέτη αναγνωρίζει τις προκλήσεις που αφορούν την πολεοδομική έγκριση, την ελλιπή ενημέρωση του κοινού και την ανάγκη για εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό (Badran, 2024). Ωστόσο, η δημόσια αποδοχή παραμένει υψηλή και η πτώση του κόστους εγκατάστασης έχει καταστήσει τις επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά στέγης ιδιαίτερα ελκυστικές για νοικοκυριά και επιχειρήσεις.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, αποτυπώσαμε αναλυτικά το κοινωνικοπολιτικό και ενεργειακό πλαίσιο που επικρατεί σε κάθε μία από τις δέκα επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες, με στόχο να κατανοήσουμε τη δυναμική και τους προσδιοριστικούς παράγοντες της διεξόδου των φωτοβολταϊκών σε στέγες. Η συστηματική ανάλυση επίσημων πηγών (IEA-PVPS, Fraunhofer ISE, SolarPower Europe, REN21, κ.ά.) και εξειδικευμένων ενεργειακών reports μας επέτρεψε να αναδείξουμε τους βασικούς μοχλούς ανάπτυξης —όπως τα προγράμματα αυτοκατανάλωσης, οι πολιτικές επιδοτήσεων, η πυκνότητα δόμησης και το θεσμικό πλαίσιο— καθώς και τα εμπόδια που διαφοροποιούν σημαντικά τα ποσοστά διεξόδου ανά χώρα.

Με βάση αυτή τη τεκμηριωμένη κατανόηση της υφιστάμενης κατάστασης, προχωράμε στην εκτίμηση των δεδομένων που αφορούν τόσο τη συνολική όσο και τη στεγασμένη φωτοβολταϊκή ισχύ για τις δέκα αυτές χώρες. Οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν για τον προσδιορισμό της αναλογίας ισχύος φωτοβολταϊκών σε στέγες ανά χώρα δεν έγιναν

¹³ https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_supply/02_market_and_industry_trends/07_solarpv/?utm

¹⁴ <https://www.theguardian.com/environment/article/2024/jul/13/labours-rooftop-revolution-to-deliver-solar-power-to-millions-of-uk-homes?utm>

αυθαίρετα· εδράζονται σε διασταυρούμενες πληροφορίες και ποιοτικά στοιχεία από επίσημες στατιστικές, κλαδικές μελέτες και επιστημονικές εκτιμήσεις. Η διαδικασία αυτή ακολούθησε μια λογική προσαρμογής και τεκμηριωμένης γενίκευσης όπου απουσίαζαν απόλυτα δεδομένα, διασφαλίζοντας έτσι ότι οι εκτιμήσεις είναι εύλογες, συνεπείς με τη διεθνή εμπειρία και κατάλληλες για χρήση στα επόμενα στάδια της ανάλυσης και πρόγνωσης.

2.1.2 Ανάλυση των Αποτελεσμάτων ανά Χώρα

Ο Πίνακας 2-1 παραθέτει τα δεδομένα συνολικής και στεγασμένης φωτοβολταϊκής ισχύος για δέκα ευρωπαϊκές χώρες, αποτυπώνοντας την έντονη ανομοιομορφία στη διείσδυση των φωτοβολταϊκών σε στέγες (rooftop PV) στην Ευρώπη. Οι χώρες με την υψηλότερη διείσδυση φωτοβολταϊκών στέγης είναι η Ολλανδία (80%), η Ιταλία (70%), το Βέλγιο (70%) και η Γερμανία (62%), όπου η συμμετοχή των Φ/Β σε στέγες επί της συνολικής φωτοβολταϊκής ισχύος είναι ιδιαίτερα υψηλή. Οι υψηλοί αυτοί δείκτες αποδίδονται κυρίως σε παράγοντες όπως η πυκνή δόμηση, η περιορισμένη διαθεσιμότητα γης για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα, καθώς και τα ισχυρά κίνητρα που προσφέρονται μέσω προγραμμάτων όπως το net metering ή τα εγγυημένα feed-in tariffs, και οι επιδοτήσεις επενδύσεων. Οι χώρες αυτές έχουν περιορισμένη διαθέσιμη γη, γεγονός που καθιστά τις στέγες ιδανική επιλογή για την εγκατάσταση Φ/Β. Ειδικά στην Ολλανδία, σύμφωνα με την CBS και την Enerdata, το 40% των εγκαταστάσεων αφορά εμπορικές στέγες και το 33% οικιακές.

Πίνακας 2-1: Εκτιμώμενη συνολική και στεγασμένη φωτοβολταϊκή ισχύς (σε GW) και ποσοστά διείσδυσης φωτοβολταϊκών σε στέγες για επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες. Τα στοιχεία προέρχονται από διεθνείς πηγές (Fraunhofer ISE, IEA-PVPS, Statista, Enerdata, CBS) και συμπληρώνονται με τεκμηριωμένες εκτιμήσεις όπου απουσιάζουν επίσημα δεδομένα.

Χώρα	Συνολική Ισχύς (GW)	Ισχύς Στέγης (GW)	Ποσοστό (%)	Πηγές/Παραδοχές
Γερμανία	82,4	51,0	62	Fraunhofer ISE, Statista
Ισπανία	39,5	8,4	21	IEA-PVPS
Ιταλία	30,3	21,1	70	IEA-PVPS
Ολλανδία	23,9	19,0	80	CBS, Enerdata
Γαλλία	24,6	12,2	50	IEA-PVPS
Ηνωμένο Βασίλειο	16,2	5,7	35	Statista, Εκτίμηση
Πολωνία	~10 (2022)	~5	50	Εκτίμηση βάσει ΕΕ
Βέλγιο	~8 (2022)	~5,6	70	Εκτίμηση, IEA-PVPS διαθέσιμο

Ελλάδα	~5 (2022)	~2,5	50	Εκτίμηση, IEA-PVPS διαθέσιμο
Ελβετία	~2,2 (2022)	~1,3	60	Εκτίμηση, IEA-PVPS διαθέσιμο

Αντιθέτως, χώρες με αφθονία διαθέσιμης γης και υψηλή ηλιοφάνεια, όπως η Ισπανία και η Ελλάδα, εμφανίζουν χαμηλότερα ποσοστά Φ/Β σε στέγες (21% και 50% αντίστοιχα, σύμφωνα με IEA-PVPS και εθνικές εκτιμήσεις), καθώς η πολιτική προώθησης των μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων είναι ισχυρότερη. Στην Ελλάδα, από τα 1.574 MW νέας ισχύος που προστέθηκαν το 2023, μόλις 250 MW προήλθαν από net metering, και εξ αυτών μόνο το 20% από οικιακές εγκαταστάσεις. Παρόμοια, στο Ηνωμένο Βασίλειο, παρά την αναπτυσσόμενη αγορά, το ποσοστό σε στέγες εκτιμάται μόλις στο 35%, καθώς η ανάπτυξη επικεντρώνεται σε εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές, χωρίς σαφή πολιτική υποστήριξη για οικιακά Φ/Β.

Η Πολωνία και η Γαλλία βρίσκονται περίπου στο μέσο της κλίμακας (50%), με την Πολωνία να παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη του οικιακού τομέα λόγω επιδοτήσεων και απλοποιημένων διαδικασιών, και τη Γαλλία να επιδιώκει ισορροπία μεταξύ στεγών και πάρκων. Τέλος, η Ελβετία, αν και μικρότερη αγορά, παρουσιάζει υψηλό ποσοστό Φ/Β σε στέγες (~60%) λόγω της γεωμορφολογίας και του περιβαλλοντικού σχεδιασμού της χώρας. Η Πολωνία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ταχείας ανάπτυξης οικιακών συστημάτων λόγω επιδοτήσεων και απλοποιημένων διαδικασιών σύνδεσης στο δίκτυο, ενώ η Ελβετία και το Ηνωμένο Βασίλειο δείχνουν μια μέση απόδοση, με σχετικά ισορροπημένη ανάπτυξη μεταξύ στεγών και άλλων τύπων εγκαταστάσεων.

Συνολικά, η ποσοστιαία συμμετοχή των Φ/Β στέγης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συνδυασμό πολιτικών κινήτρων, χωροταξικών περιορισμών, ηλιακού δυναμικού και της ωριμότητας των αγορών. Παρά τις προσπάθειες της ΕΕ για ενιαία ενεργειακή στρατηγική, οι επιμέρους εθνικές πολιτικές συνεχίζουν να επηρεάζουν καθοριστικά το μείγμα των Φ/Β εγκαταστάσεων. Σύμφωνα με την έκθεση της SolarPower Europe (2024), η αγορά των Φ/Β στέγης στην ΕΕ παρουσίασε μείωση, με το μερίδιο αγοράς των οικιακών Φ/Β να υποχωρεί στο 20% το 2024 από 28% το 2023. Η μείωση αυτή αποδίδεται κυρίως στη μείωση των τιμών ενέργειας, που μείωσε τα κίνητρα για εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων. Ωστόσο, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στην ΕΕ συνέχισε να αυξάνεται, φτάνοντας τα 55,8 GW το 2024, με τη Γερμανία να ηγείται με 14,3 GW νέων εγκαταστάσεων. Η Ιταλία, η Πολωνία και οι Κάτω Χώρες ακολούθησαν με σημαντικές προσθήκες ισχύος. Η αγορά

των Φ/Β στέγης στην Ευρώπη αναμένεται να αναπτυχθεί με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 6,1% από το 2021 έως το 2027, φτάνοντας τα 16,5 δις. δολάρια ΗΠΑ. Η Ιταλία προβλέπεται να καταγράψει τον υψηλότερο CAGR κατά την περίοδο αυτή.

Εκτός από τις απόλυτες τιμές εγκατεστημένης ισχύος σε στέγες, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συγκριτική αξιολόγηση της σχετικής διείσδυσης των φωτοβολταϊκών σε στέγες μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών. Στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται προσεγγιστικά ποσοστά συμμετοχής των φωτοβολταϊκών στεγών επί της συνολικής εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος για δεκαπέντε ευρωπαϊκές χώρες. Οι εκτιμήσεις βασίζονται σε πρόσφατες αναλύσεις (2023–2025), σε αναφορές από οργανισμούς όπως η SolarPower Europe, η Ember και η IEA-PVPS, καθώς και σε εθνικά στοιχεία. Ο πίνακας συμπληρώνεται με σύντομα σχόλια για κάθε χώρα, τα οποία εξηγούν τα ποσοστά διείσδυσης βάσει παραγόντων όπως η πυκνότητα πληθυσμού, η διαθεσιμότητα γης, η ύπαρξη επιδοτήσεων και η υφιστάμενη ενεργειακή πολιτική. Η χρήση αυτών των ποιοτικών και ποσοτικών στοιχείων επιτρέπει μια πληρέστερη κατανόηση της ετερογένειας που παρατηρείται στο ευρωπαϊκό ενεργειακό τοπίο.

Πίνακας 2-2: Εκτιμώμενα ποσοστά συμμετοχής φωτοβολταϊκών στέγης επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος σε επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες (2023–2025).

Χώρα	Εκτιμώμενο Ποσοστό Φωτοβολταϊκών σε Στέγες (%)	Σχόλια
Γερμανία	50-60%	Η μεγαλύτερη αγορά φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη. Υψηλή διείσδυση σε στέγες λόγω προγραμμάτων net metering και περιορισμένης γης.
Ολλανδία	60-70%	Πρωταγωνίστρια σε κατά κεφαλήν εγκαταστάσεις, με έμφαση σε οικιακά συστήματα λόγω πυκνοκατοίκησης.
Ιταλία	40-50%	Ισορροπία μεταξύ οικιακών και μεγάλων πάρκων, με αυξανόμενες εγκαταστάσεις σε στέγες λόγω επιδοτήσεων.
Ισπανία	30-40%	Μεγάλη έμφαση σε φωτοβολταϊκά πάρκα λόγω διαθέσιμης γης, αλλά αυξανόμενο ενδιαφέρον για στέγες.
Γαλλία	35-45%	Μικρότερο ποσοστό σε στέγες, με έμφαση σε μεγάλες εγκαταστάσεις, αλλά αυξανόμενη υιοθέτηση net metering.

Βέλγιο	55-65%	Υψηλή διείσδυση σε στέγες λόγω πυκνοκατοίκησης και κινήτρων για οικιακά συστήματα.
Αυστρία	45-55%	Ισορροπημένη αγορά, με αυξανόμενες εγκαταστάσεις σε στέγες λόγω πολιτικών ΑΠΕ.
Πολωνία	50-60%	Ραγδαία ανάπτυξη οικιακών φωτοβολταϊκών λόγω επιδοτήσεων και χαμηλού κόστους.
Ουγγαρία	40-50%	Αυξανόμενη αγορά, με ισορροπία μεταξύ στεγών και πάρκων.
Ελλάδα	30-40%	Ισχυρή ανάπτυξη φωτοβολταϊκών, αλλά μεγαλύτερο ποσοστό σε πάρκα. Τα συστήματα net metering (20% οικιακά) κερδίζουν έδαφος.
Πορτογαλία	35-45%	Αναπτυσσόμενη αγορά, με έμφαση σε πάρκα αλλά και αυξανόμενες εγκαταστάσεις σε στέγες.
Σουηδία	40-50%	Περιορισμένες εγκαταστάσεις, αλλά υψηλό ποσοστό σε στέγες λόγω πολιτικών και περιορισμένης γης.
Δανία	50-60%	Έμφαση σε μικρής κλίμακας συστήματα και οικιακές εγκαταστάσεις.
Ηνωμένο Βασίλειο	40-50%	Μέτρια ανάπτυξη, με έμφαση σε οικιακά και εμπορικά συστήματα σε στέγες.
Ανατολική Ευρώπη (π.χ. Βουλγαρία, Ρουμανία)	40-50%	Ραγδαία ανάπτυξη, με αυξανόμενο μερίδιο σε στέγες λόγω επιδοτήσεων.

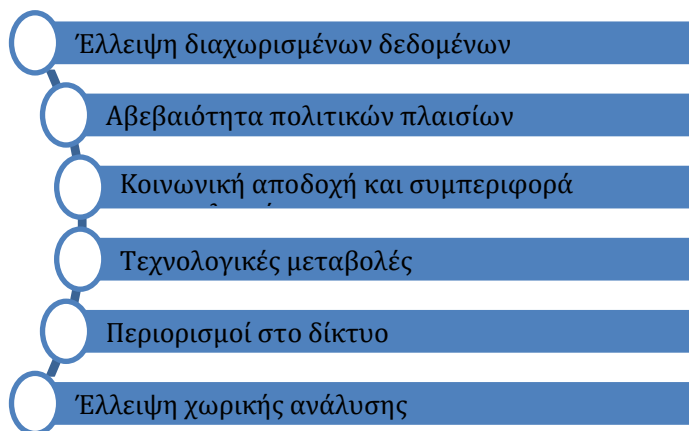
Ολοκληρώνοντας την ενότητα 2.1, είναι σαφές ότι η διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις στην Ευρώπη, ως αποτέλεσμα μιας σύνθετης αλληλεπίδρασης γεωγραφικών, κοινωνικοοικονομικών και πολιτικών παραγόντων. Παρότι η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω στρατηγικών όπως το REPowerEU προωθεί την αποκεντρωμένη παραγωγή και την ενεργειακή αυτονομία των πολιτών, η υλοποίηση αυτών των στόχων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εθνικές πολιτικές και τις ιδιαιτερότητες κάθε χώρας. Οι διαφορές στη διείσδυση των φωτοβολταϊκών σε στέγες μεταξύ χωρών όπως η Ολλανδία και η Ισπανία ή η Ελλάδα αναδεικνύουν την ανάγκη για στοχευμένες παρεμβάσεις που να λαμβάνουν υπόψη το εγχώριο δυναμικό, τις κοινωνικές συνθήκες και τις επενδυτικές δυνατότητες. Η ανάλυση που προηγήθηκε παρέχει το απαραίτητο υπόβαθρο για την πρόβλεψη της μελλοντικής

εξέλιξης της στεγασμένης φωτοβολταϊκής ισχύος ανά χώρα, η οποία αποτελεί το επίκεντρο των επόμενων κεφαλαίων.

2.2 Σημασία και Προκλήσεις στην Πρόγνωση της Εξέλιξης

Η πρόγνωση της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες αποτελεί βασικό εργαλείο για τον ενεργειακό σχεδιασμό και την πολιτική μετάβασης στην κλιματική ουδετερότητα, ιδίως υπό το πρίσμα της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και των εθνικών σχεδίων για καθαρές μηδενικές εκπομπές έως το 2050 (European Commission, 2022). Η ικανότητα πρόβλεψης της μελλοντικής εγκατεστημένης ισχύος καθιστά εφικτό τον αποτελεσματικό σχεδιασμό υποδομών, την εκτίμηση των αναγκών του ηλεκτρικού δικτύου, τη βελτιστοποίηση των επιδοτήσεων και τον έλεγχο της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Ιδιαίτερα στη συγκυρία της αποκεντρωμένης παραγωγής και των έξυπνων δικτύων, η αξιοπιστία των προγνωστικών μοντέλων καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την αποδοτικότητα των πολιτικών και την προσέλκυση επενδύσεων (Schardt & te Heesen, 2021).

Ωστόσο, η πρόγνωση της εξέλιξης των φωτοβολταϊκών στέγης εμφανίζει πολυδιάστατες προκλήσεις. Καταρχάς, παρατηρείται έλλειψη διαχωρισμένων δεδομένων: οι περισσότερες στατιστικές πηγές καταγράφουν μόνο τη συνολική φωτοβολταϊκή ισχύ ανά χώρα, χωρίς να γίνεται διάκριση μεταξύ οικιακών συστημάτων σε στέγες και μεγάλων σταθμών παραγωγής, γεγονός που δημιουργεί ασάφεια και περιορίζει τη δυνατότητα ακριβούς μοντελοποίησης (IEA-PVPS, 2023). Επιπλέον, το πολιτικό περιβάλλον είναι συχνά ασταθές. Αλλαγές σε καθεστώτα επιδότησης, κανονισμούς net metering ή φορολογικά κίνητρα μπορεί να μεταβάλλουν δραστικά τη ζήτηση, όπως αποδεικνύει η εμπειρία της Ισπανίας με την κατάργηση του «sun tax» (Rodríguez-García et al., 2024).



Σχήμα 2-2: Προκλήσεις στην πρόγνωση

Παράλληλα, κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο. Η υιοθέτηση των φωτοβολταϊκών στέγης εξαρτάται όχι μόνο από την τεχνική σκοπιμότητα ή το κόστος εγκατάστασης, αλλά και από την κοινωνική αποδοχή, τις συνήθειες των καταναλωτών, την ενημέρωση, καθώς και τη δυνατότητα χρηματοδότησης (Trutnevyte et al., 2024). Επιπλέον, τεχνολογικές εξελίξεις όπως η μείωση του κόστους των bifacial πλαισίων, η ανάπτυξη των συστημάτων αποθήκευσης και η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε οικοδομικά υλικά (BIPV), τροποποιούν συνεχώς τις παραμέτρους των μοντέλων (Schardt & te Heesen, 2021). Παράλληλα, υφίστανται και τεχνικοί περιορισμοί στο δίκτυο διανομής: τοπικά φαινόμενα κορεσμού μπορούν να επιβραδύνουν την ανάπτυξη των εγκαταστάσεων, ανεξάρτητα από την ύπαρξη κινήτρων ή τεχνικού δυναμικού (Robinson et al., 2024).

Τέλος, σημαντική πρόκληση αποτελεί η έλλειψη χωρικής ανάλυσης. Οι περισσότερες προβλέψεις βασίζονται σε εθνικά ή περιφερειακά αθροιστικά δεδομένα, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τη γεωγραφική διαφοροποίηση της ακτινοβολίας, της δόμησης ή της κοινωνικοοικονομικής δυναμικής, ενώ είναι γνωστό ότι η πρόβλεψη πρέπει να ενσωματώνει τοπικά χαρακτηριστικά για να είναι ρεαλιστική (Trutnevyte et al., 2024; Robinson et al., 2024).

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να αντιμετωπίσει αυτές τις δυσκολίες μέσα από την κατασκευή τεκμηριωμένων προσεγγιστικών χρονοσειρών εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης για δέκα ευρωπαϊκές χώρες, λαμβάνοντας υπόψη δημοσιευμένα δεδομένα και παραδοχές από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η χρήση νευρωνικών δικτύων τύπου LSTM και αναλυτικών μοντέλων ανάπτυξης (Growth Models) παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης της μελλοντικής διείσδυσης φωτοβολταϊκών σε στέγες, αξιοποιώντας τόσο πολύπλοκα χρονικά μοτίβα όσο και μακροχρόνιες τάσεις. Παράλληλα, η εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας ενισχύει την αξιοπιστία των εκτιμήσεων, επιτρέποντας την αξιολόγηση της επίδρασης κρίσιμων παραμέτρων στις προβλεπόμενες τιμές.

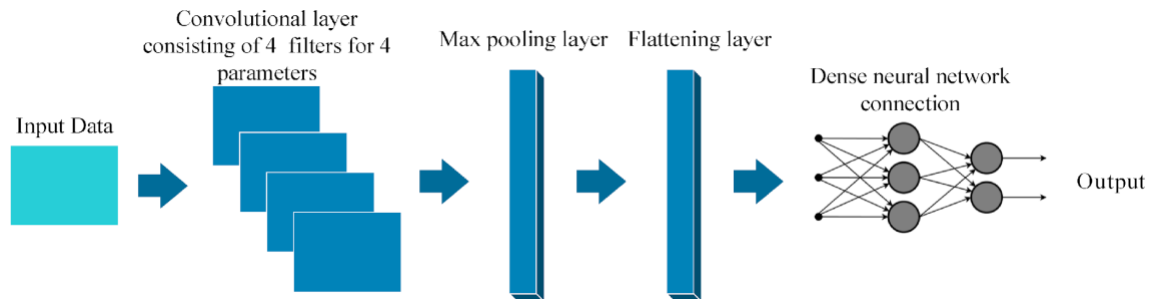
2.3 Μέθοδοι Πρόβλεψης

Η πρόγνωση της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες απαιτεί τη χρήση κατάλληλων μεθόδων, οι οποίες να είναι σε θέση να ενσωματώσουν την αβεβαιότητα, την ετερογένεια των δεδομένων και την πολυπλοκότητα της ανάπτυξης των ΑΠΕ σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν τρεις βασικές

μεθοδολογικές προσεγγίσεις: τα Νευρωνικά Δίκτυα τύπου LSTM, τα Μαθηματικά Μοντέλα Ανάπτυξης (Growth Models), και η Ανάλυση Ευαισθησίας / Ελαστικότητας.

2.3.1 Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks – ANNs) είναι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση προτύπων, την ταξινόμηση και την πρόβλεψη σε σύνολα δεδομένων. Αποτελούνται από διασυνδεδεμένους "νευρώνες", οργανωμένους σε επίπεδα, που μαθαίνουν από παραδείγματα μέσω προσαρμογής των βαρών τους με βάση κάποιο σφάλμα πρόβλεψης. Τα ANNs έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε προβλήματα όπου υπάρχουν μη γραμμικές σχέσεις, μεγάλος όγκος δεδομένων και αβεβαιότητα — χαρακτηριστικά που συναντώνται συχνά σε ενεργειακά προβλήματα.



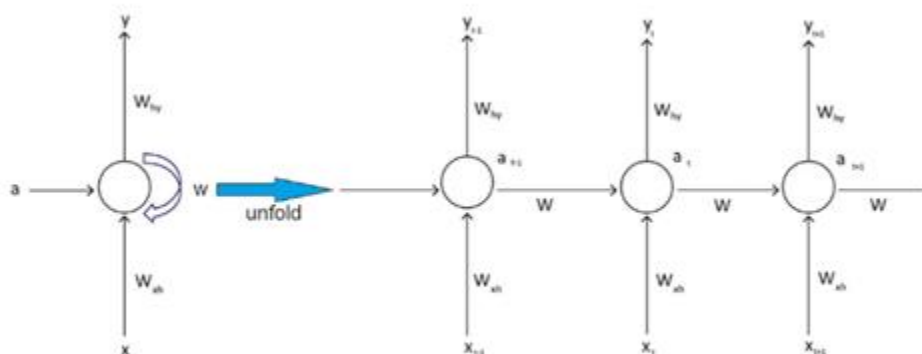
Σχήμα 2-3: Αρχιτεκτονική των Convolutional Neural Network (CNN). (Suresh, 2020)

Μια ειδική κατηγορία νευρωνικών δικτύων είναι τα επαναληπτικά νευρωνικά δίκτυα (Recurrent Neural Networks – RNNs), τα οποία ενσωματώνουν πληροφορία από προηγούμενα χρονικά βήματα, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρονοσειρές. Εξ αυτών, τα Long Short-Term Memory (LSTM) δίκτυα διακρίνονται για την ικανότητά τους να διατηρούν εξαρτήσεις μεγάλης διάρκειας στο χρόνο, μέσω εσωτερικών μηχανισμών μνήμης (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). Τα νευρωνικά δίκτυα τύπου Long Short-Term Memory (LSTM) αποτελούν ένα είδος επαναληπτικών νευρωνικών δικτύων (Recurrent Neural Networks – RNNs), τα οποία είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την πρόβλεψη χρονοσειρών με μακροχρόνιες εξαρτήσεις. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές πρόβλεψης όπου τα δεδομένα εξελίσσονται διαχρονικά, όπως στην ενεργειακή ζήτηση, τη θερμοκρασία ή την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι, μπορούν να προβλέπουν με ακρίβεια δεδομένα που επηρεάζονται από παλαιότερες χρονικές τιμές — όπως συμβαίνει με την εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών, η οποία επηρεάζεται από μακροχρόνιες τάσεις, πολιτικές, τεχνολογικές εξελίξεις και συμπεριφορές χρηστών.

2.3.1.1 RNN

Ένας τύπος τεχνητού νευρωνικού δικτύου που είναι πιο κατάλληλος για τη διαχείριση διαδοχικών εισόδων είναι το επαναλαμβανόμενο νευρωνικό δίκτυο (RNN), έχοντας χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε πολλές εφαρμογές, όπως η αναγνώριση ομιλίας και η μετάφραση κειμένων. Ο σχεδιασμός του είναι παρόμοιος με αυτόν των MLP, αλλά επιτρέπει χρονικά καθυστερημένες συνδέσεις μεταξύ κρυφών επιπέδων, επιτρέποντας στο δίκτυο να «μαθαίνει» από προηγούμενα δεδομένα, ακόμη και όταν υπάρχει σημαντική απόσταση μεταξύ τους, με τα MLP, από την άλλη πλευρά, να χρησιμοποιούν απλώς την τρέχουσα είσοδό τους για να παράγουν προβλέψεις.

Ένα στρώμα εισόδου, ένα κρυφό στρώμα και ένα στρώμα εξόδου αποτελούν ένα τυπικό αναδιπλούμενο νευρωνικό δίκτυο (SimpleRNN), το οποίο απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα μαζί με την εξέλιξή του σε μια ολόκληρη ακολουθία, με τα δεδομένα εισόδου από τον παρόντα χρόνο και το κρυφό στρώμα από τον προηγούμενο χρόνο, τα οποία έχουν την ακόλουθη μορφή, χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση του κρυφού στρώματος σε κάθε βήμα:



Recurrent Neural Networks (RNNs)

Σχήμα 2-4: Τοπολογία ενός διαδοχικού τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

Όπου:

- W_{xh} : ένας πίνακας βαρών που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του κρυφού επιπέδου με το επίπεδο εισόδου.
- W : ο πίνακας βαρών μεταξύ του ίδιου και του κρυφού επιπέδου σε διάφορα χρονικά σημεία.

- Why: ο πίνακας βαρών που συνδέει το επίπεδο εξόδου με το κρυφό επίπεδο.
- a: Η συνάρτηση ενεργοποίησης του επιπέδου

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για κάθε χρονικό βήμα σε ένα νευρωνικό δίκτυο παλινδρόμησης (RNN) είναι σχεδόν πανομοιότυπες. Αν και χρησιμοποιούνται με διαφορετικές εισόδους, οι παράμετροι W_h , y και W στο προηγούμενο σχήμα είναι οι ίδιες για κάθε χρονικό βήμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα RNN είναι απλώς μια σειρά πανομοιότυπων αντιγράφων νευρωνικών δικτύων. Τα RNN λαμβάνουν υπόψη τον χρόνο και ενσωματώνουν την τρέχουσα είσοδο και την κατάσταση του προηγούμενου βήματος σε μια συνάρτηση που δημιουργεί τη νέα τρέχουσα κατάσταση.

Ένα τυπικό νευρωνικό δίκτυο RNN λειτουργεί ως εξής: Μέσω επαναλαμβανόμενων συνδέσεων, τα δεδομένα εισόδου από την τρέχουσα μονάδα δεδομένων $x(t)$ εισέρχονται στα στρώματα σε κάθε χρονική στιγμή t , με ταυτόχρονα τις τιμές που αντιπροσωπεύουν την κατάσταση του δικτύου μια στιγμή πριν να εισάγονται επίσης από το κρυφό στρώμα $a(t-1)$. Ενώ είναι φυσιολογικό τα δεδομένα εισόδου $x(t-1)$ που λαμβάνονται στο χρόνο $t-1$ να έχουν επίδραση στην έξοδο $y(t)$ στο χρόνο t και, αργότερα, κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων συνδέσεων, ο υπολογισμός του $y(t)$ καθορίζεται από τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το κρυφό στρώμα $a(t)$ στο χρόνο t .

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τα LSTM χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση της μελλοντικής εξέλιξης της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών σε στέγες, ξεχωριστά για κάθε χώρα. Ειδικότερα, εκπαιδεύτηκαν μοντέλα σε περιβάλλον MATLAB, με είσοδο τις ιστορικές ετήσιες τιμές εγκατεστημένης ισχύος από στέγες, και έξοδο την προβλεπόμενη τιμή για τα επόμενα έτη έως το 2030. Το δίκτυο μαθαίνει να εντοπίζει τα βασικά χρονικά μοτίβα (trends), ακόμη και με περιορισμένα δεδομένα, και να πραγματοποιεί εξομάλυνση των αστάθμητων διακυμάνσεων, με την χρήση LSTM να επιλέχθηκε λόγω της ικανότητάς τους να ενσωματώνουν πολύπλοκες και μη γραμμικές σχέσεις, καθώς και της αποδεδειγμένης επιτυχίας τους σε συναφή προβλήματα πρόβλεψης ενεργειακής ζήτησης, φορτίων ή παραγωγής από ΑΠΕ (Goodfellow et al., 2016).

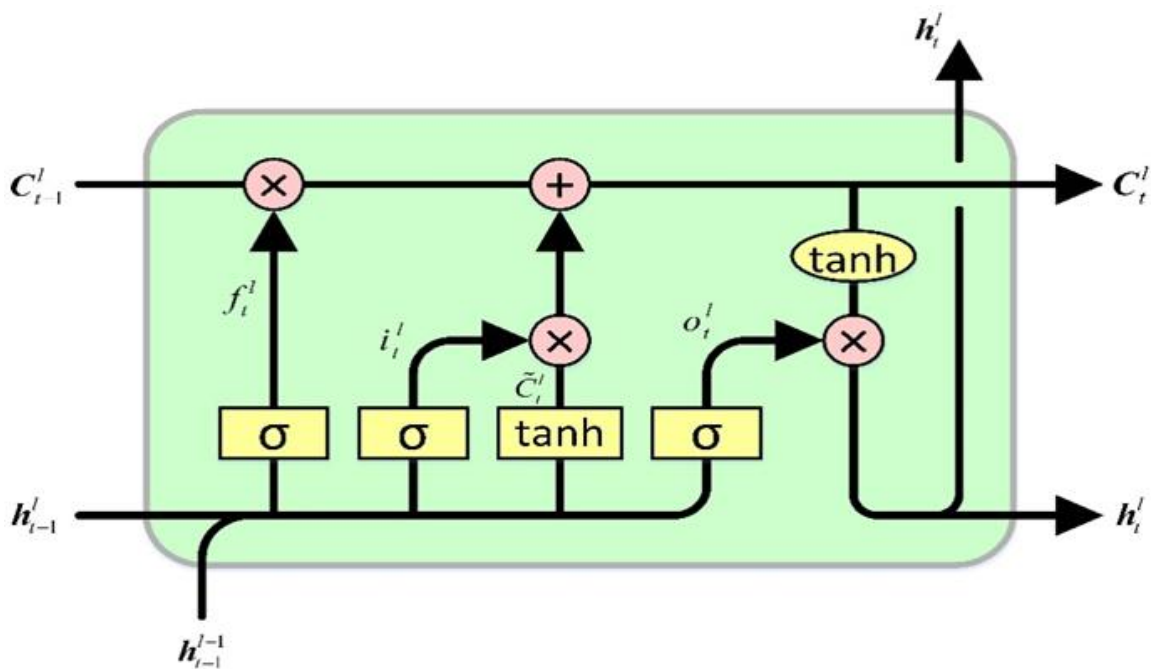
Η χρήση LSTM επιλέχθηκε λόγω της ικανότητάς τους να ενσωματώνουν πολύπλοκες και μη γραμμικές σχέσεις, καθώς και της αποδεδειγμένης επιτυχίας τους σε συναφή προβλήματα πρόβλεψης ενεργειακής ζήτησης, φορτίων ή παραγωγής από ΑΠΕ (Goodfellow et al., 2016). Επίσης, η επιλογή των LSTM βασίστηκε στην ικανότητά τους να

απομνημονεύουν σημαντικά χρονικά μοτίβα και να αντιμετωπίζουν μη γραμμικότητες που συχνά χαρακτηρίζουν την υιοθέτηση των φωτοβολταϊκών.

2.3.1.2 LSTM

Τα νευρωνικά δίκτυα μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (LSTM) είναι μια υποκατηγορία των νευρωνικών δικτύων παλινδρόμησης (RNN), τα οποία είναι χρήσιμα για μια ποικιλία εργασιών, αλλά δυσκολεύονται να μεταφέρουν τη γνώση για μεγάλες χρονικές περιόδους, έχοντας την τάση να ξεχνούν πληροφορίες από προηγούμενα χρονικά βήματα, με τους Sepp Hochreiter και Jürgen Schmidhuber να δημοσιεύουν την πρώτη τους μελέτη για το θέμα το 1997 για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, αναπτύχθηκαν τα LSTM.

Αν και τα LSTM και τα RNN είναι σχεδόν πανομοιότυπα, τα LSTM περιλαμβάνουν επιπλέον πύλες που ελέγχουν τη ροή πληροφοριών στο εσωτερικό τους σώμα, επιτρέποντάς του να προσθέτει ή να αφαιρεί πληροφορίες ανάλογα με το πόσο σχετικές είναι με το εκάστοτε θέμα. Η εσωτερική δομή ενός δικτύου LSTM απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα, το οποίο δείχνει πώς το LSTM μπορεί να χειριστεί καλύτερα τις μακροχρόνιες συσχετίσεις σε διαδοχικά δεδομένα.



Σχήμα 2-5: Απεικόνιση της δομής της εσωτερικής μονάδας ενός δικτύου LSTM

όπου:

- X: πολλαπλασιασμός των στοιχείων

- + : πρόσθεση στοιχείων
- Tanh: επίπεδο συνάρτησης NN-
- σ: επίπεδο NN της λογιστικής συνάρτησης

Ένα σημαντικό στοιχείο των μονάδων LSTM είναι η εσωτερική τους κατάσταση, γνωστή και ως κατάσταση κυττάρου, η οποία διατηρεί και μεταφέρει πληροφορίες από τα προηγούμενα στα μελλοντικά χρονικά βήματα, με τις πύλες να είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της εσωτερικής κατάστασης, ρυθμίζοντας τη ροή πληροφοριών, τον στοιχειομετρικός πολλαπλασιασμός των εξόδων των πυλών με το αντίστοιχο διάνυσμα εισόδου ρυθμίζει την ποσότητα των πληροφοριών που περνούν από το δίκτυο και την κρυφή κατάσταση να χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών μεταξύ των χρονικών βημάτων και βοηθά στη δημιουργία σημαντικών προβλέψεων.

Πύλη λήθης

Η πύλη λήθης καθορίζει εάν οι πληροφορίες από μια προηγούμενη κατάσταση του δικτύου LSTM θα πρέπει να "ξεχαστούν" ή να είναι αρκετά χρήσιμες ώστε να μεταβιβαστούν στα επόμενα στάδια του δικτύου, αξιολογώντας στην πραγματικότητα το βαθμό στον οποίο η εσωτερική κατάσταση της μονάδας επηρεάζει:

- σg: λογιστική συνάρτηση
- bf: διάνυσμα πόλωσης του δικτύου
- xt,ht-1: τις εισόδους του δικτύου, με τις τιμές τους διαμορφώνονται από πίνακες βαρών.

Πύλη εισόδου

Η πύλη εισόδου ελέγχει τη ροή των εισερχόμενων δεδομένων στο δίκτυο μέσω ενός διανύσματος, το οποίο αξιολογεί την ποιότητα των νέων δεδομένων και καθορίζει αν ανήκουν στην εσωτερική ενότητα ct.

Πύλη εξόδου

Το κύριο καθήκον της πύλης εξόδου είναι να επιλέγει ποια στοιχεία της εσωτερικής κατάστασης ct θα σταλούν στην έξοδο του δικτύου, με το τελικό διάνυσμα εξόδου να δημιουργείται με τον υπολογισμό του διανύσματος ct ως σύνθετο δύο άλλων διανυσμάτων χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση ενεργοποίησης tanh, με τις τιμές του διανύσματος να εμπίπτουν στο εύρος [-1,1][1,1].

Η πύλη εισόδου, η πύλη εξόδου και η πύλη λήθης είναι οι τρεις πρόσθετες πύλες που διαθέτουν τα LSTM σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα παλινδρόμησης (RNN), με την πρωταρχική διάκριση, βοηθώντας στη μείωση των σφαλμάτων εκπαίδευσης και στη διατήρηση της πληροφορίας για μεγάλο χρονικό διάστημα - έως και 1000 φορές στέρησης - κάτι που ένα βασικό δίκτυο RNN δεν μπορεί να επιτύχει.

2.3.2 Μαθηματικά Μοντέλα Ανάπτυξης

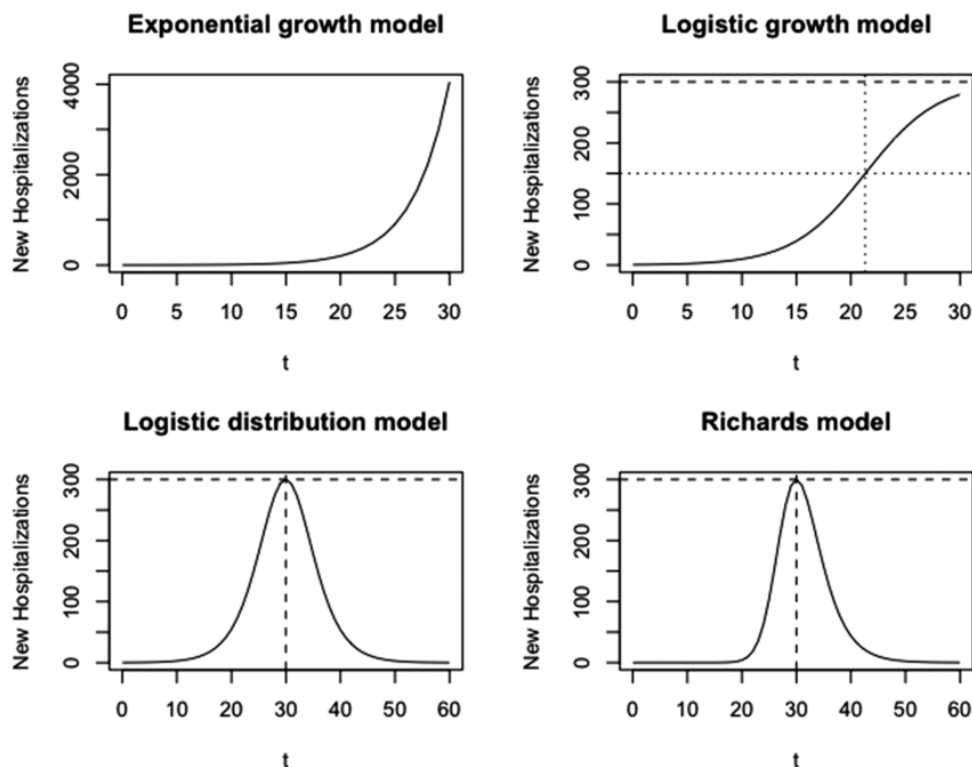
Τα Μαθηματικά Μοντέλα Ανάπτυξης αποτελούν απλές αλλά αποτελεσματικές προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση της χρονικής εξέλιξης φαινομένων όπως η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Περιλαμβάνουν εκθετικά μοντέλα, λογαριθμικά και λογιστικά (logistic), τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως όταν τα δεδομένα παρουσιάζουν σαφή τάση αύξησης με κορεσμό.

Παράλληλα με τα LSTM, χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικά μοντέλα ανάπτυξης (Growth Models), όπως εκθετικά ή λογιστικά (logistic), τα οποία βασίζονται στην παραδοχή ότι η εξέλιξη μιας τεχνολογίας ακολουθεί μια καμπύλη S ή J, με αρχική επιτάχυνση και σταδιακό κορεσμό. Τα μοντέλα αυτά είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα στην τεχνολογική πρόγνωση και στη μελέτη δυναμικών αγορών (Bass, 1969· Grubler et al., 1999).

Η εφαρμογή τους πραγματοποιήθηκε με χρήση εργαλείων MATLAB, προσαρμόζοντας καμπύλες στα ιστορικά δεδομένα για κάθε χώρα. Τα μοντέλα αυτά παρείχαν ερμηνεύσιμες καμπύλες πρόβλεψης και χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο σύγκρισης με τα αποτελέσματα των LSTM, επιτρέποντας την αξιολόγηση της συνοχής μεταξύ στατιστικής και μηχανικής μάθησης.

Τα πλεονεκτήματα των growth models περιλαμβάνουν την απλότητα, τη δυνατότητα εύκολης εφαρμογής και την θεωρητική τους βάση. Ωστόσο, περιορίζονται όταν τα δεδομένα είναι ελλιπή, ή όταν η πορεία της αγοράς δεν εμφανίζει σαφή συμπεριφορά κορεσμού. Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιήθηκαν επικουρικά και όχι αποκλειστικά.

Στο πλαίσιο της εργασίας, εφαρμόστηκαν growth models για κάθε χώρα με βάση τις ιστορικές τιμές της συνολικής και στεγασμένης ισχύος. Η παραμετροποίηση έγινε μέσω μεθόδων ελαχίστων τετραγώνων, επιτρέποντας την εξαγωγή εύκολα ερμηνεύσιμων προβλέψεων. Τα μοντέλα αυτά χρησιμεύουν κυρίως ως σύγκριση με τις πιο σύνθετες προβλέψεις των LSTM, ενώ παρέχουν ένα στατιστικό υπόβαθρο για μελλοντικές πολιτικές αποφάσεις.



Σχήμα 2-6: Οπτικοποίηση μοντέλων ανάπτυξης σε διαφορετικές φάσεις. Phase 1: exponential growth model; phase 2: logistic growth model; phase 3: logistic distribution model; phase 4: Richards model. (Nguyen, 2021)

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι αυτών των μοντέλων. Το εκθετικό μοντέλο (exponential) περιγράφει τη ραγδαία αύξηση στην αρχική φάση ανάπτυξης, ενώ το λογιστικό μοντέλο (logistic growth) ενσωματώνει κορεσμό όταν πλησιάζει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα. Τα μοντέλα λογιστικής κατανομής και Richards επεκτείνουν αυτή τη λογική προσφέροντας μεγαλύτερη ευκαμψία ως προς το σημείο κορεσμού και το σχήμα της καμπύλης. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από το στάδιο ωρίμανσης της αγοράς και τα χαρακτηριστικά της χώρας ή της περιφέρειας (Nguyen, 2021).

2.3.3 Ανάλυση Ευαισθησίας / Ελαστικότητας

Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) αποτελεί θεμελιώδη προσέγγιση στη μοντελοποίηση και πρόβλεψη, η οποία στοχεύει στην κατανόηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Gan, 2014), η τεχνική αυτή επιτρέπει την ποσοτική εκτίμηση του βαθμού με τον οποίο κάθε παράμετρος εισόδου επηρεάζει την έξοδο ενός μοντέλου. Σε δυναμικά και πολύπλοκα συστήματα, όπως οι αγορές ΑΠΕ, η ανάλυση ευαισθησίας βοηθά στον εντοπισμό κρίσιμων παραγόντων, στη βελτιστοποίηση πολιτικών και στον περιορισμό των σφαλμάτων πρόβλεψης. Η Ανάλυση Ευαισθησίας αποτελεί βασικό εργαλείο εκτίμησης της

αξιοπιστίας και της σταθερότητας των προβλεπτικών μοντέλων (Gan, 2014). Εφαρμόζεται ώστε να αποτυπωθεί η επίδραση μικρών μεταβολών στις εισόδους – όπως η αλλαγή των δεδομένων κατά $\pm 5\%$ – στην τελική πρόβλεψη (Gan, 2014).

Λόγω της αβεβαιότητας που εισάγεται από τις παραδοχές (π.χ. ποσοστό στεγών επί του συνόλου), κρίθηκε αναγκαία η εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας. Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε με επαναληπτικές προβλέψεις για κάθε χώρα, αφού πρώτα τροποποιήθηκε κατά $\pm 5\%$ το εκτιμώμενο ποσοστό συμμετοχής των φωτοβολταϊκών στέγης επί της συνολικής ισχύος. Η διαδικασία εφαρμόστηκε τόσο στα LSTM όσο και στα growth models, ώστε να αξιολογηθεί η αντοχή των μοντέλων σε μεταβολές των βασικών παραδοχών. Στη συνέχεια καταγράφηκε η απόκλιση στα προβλεπόμενα μεγέθη ισχύος.

Η τεχνική αυτή αποκαλύπτει πόσο σταθερές είναι οι προβλέψεις σε μικρές μεταβολές των εισροών, κάτι που ενισχύει τη διαφάνεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Saltelli et al., 2008). Επίσης, παρέχει τεκμηριωμένη βάση για συγκριτική αξιολόγηση πολιτικών, εφόσον δείχνει ποιες αγορές είναι πιο ευάλωτες σε μικρές αλλαγές παραμέτρων.

Η έννοια της ελαστικότητας εφαρμόζεται εδώ με την ευρύτερη έννοια: πώς μεταβάλλεται η προβλεπόμενη ισχύς εξαιτίας μιας ελεγχόμενης μεταβολής στις εισαγόμενες εκτιμήσεις, χωρίς να προϋποτίθεται γραμμικότητα ή αναλυτική συνάρτηση.

Η Ανάλυση Ευαισθησίας αποτελεί βασικό εργαλείο εκτίμησης της αξιοπιστίας και της σταθερότητας των προβλεπτικών μοντέλων. Εφαρμόζεται ώστε να αποτυπωθεί η επίδραση μικρών μεταβολών στις εισόδους – όπως η αλλαγή των δεδομένων κατά $\pm 5\%$ – στην τελική πρόβλεψη.

Η τεχνική αυτή επιτρέπει την:

- Εκτίμηση της σταθερότητας των προβλέψεων έναντι αβεβαιοτήτων ή σφαλμάτων στα ιστορικά δεδομένα,
- Ανάδειξη κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν δυσανάλογα τα αποτελέσματα,
- Κατανόηση της συμπεριφοράς των μοντέλων υπό διαφορετικά σενάρια,
- Υποστήριξη της διαμόρφωσης πολιτικής μέσω εκτιμήσεων εύρους.

Στην εργασία, η ανάλυση εφαρμόστηκε παράλληλα με τα αποτελέσματα των LSTM και των growth models, ώστε να εντοπιστεί η ευαισθησία τους στις αρχικές παραδοχές και να τεκμηριωθεί η αξιοπιστία τους σε ένα φάσμα ρεαλιστικών τιμών.

3. Δεδομένα και Επεξεργασία

Η διαδικασία συλλογής, ταξινόμησης και επεξεργασίας των δεδομένων που απαιτούνται για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης για τη διείσδυση των ηλιακών συστημάτων στέγης σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες καλύπτεται σε αυτή την ενότητα, με την η σωστή διαχείριση των δεδομένων να είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της εγκυρότητας και της ακρίβειας των ευρημάτων της μελέτης, δεδομένου ότι έχει άμεσο αντίκτυπο στις προβλέψεις και στον τρόπο ερμηνείας των τεχνικών πρόβλεψης.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA) δημοσίευσε ετήσια στοιχεία σχετικά με την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ ανά χώρα για τα έτη 2014-2024 στην έκθεσή του «Στατιστικά στοιχεία για την ικανότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας 2025», η οποία χρησίμευσε ως βάση για την έρευνα, απαιτώντας όμως την εκτίμηση του μεριδίου των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες με τη χρήση δευτερευουσών πηγών και σχετικών τεχνικών εκθέσεων, καθώς η IRENA δημοσιεύει μόνο δεδομένα σχετικά με τη συνολική φωτοβολταϊκή ισχύ, χωρίς να κάνει διάκριση μεταξύ συστημάτων σε στέγες και μεγάλων σταθμών.

Η ισοδύναμη εγκατεστημένη ισχύς για τα έτη 2014-2024 υπολογίστηκε αφού πρώτα προσδιορίστηκε το ποσοστό διείσδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες για κάθε χώρα, ενώ παράλληλα προβλέφθηκε ότι το ποσοστό αυτό θα παρέμενε σταθερό κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα ολοκληρωμένα χρονολογικά στοιχεία για την εξέλιξή του.

Προκειμένου να τροφοδοτηθούν τα δύο μοντέλα πρόβλεψης, με (α) ένα νευρωνικό δίκτυο LSTM και (β) ένα εκθετικό ή λογιστικό μοντέλο ανάπτυξης, το οποίο υπολόγισε τον σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR), και το τελικό σύνολο δεδομένων δημιουργήθηκε ως χρονοσειρά για κάθε χώρα. Ταυτόχρονα, διεξήχθη μελέτη ευαισθησίας για την αξιολόγηση του αντίκτυπου της αβεβαιότητας στις προβλέψεις, μεταβάλλοντας την αρχική χρονοσειρά κατά $\pm 5\%$.

Οι πηγές και οι ιδιότητες των δεδομένων, η μορφή και η δομή της χρονοσειράς, η διαδικασία καθαρισμού και προετοιμασίας, καθώς και οι μετασχηματισμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας καλύπτονται λεπτομερώς στις επόμενες υποενότητες.

3.1 Πηγές Δεδομένων

Η έκθεση «Στατιστικά στοιχεία για την ικανότητα παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας 2025» του Διεθνούς Οργανισμού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA) αποτέλεσε την κύρια πηγή δεδομένων για την παρούσα έρευνα, με την βάση δεδομένων να παρέχει ετήσιες πληροφορίες σχετικά με την εγκατεστημένη ικανότητα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για κάθε κράτος μέλος για τα έτη 2014-2024. Για λόγους παγκόσμιας σύγκρισης, τα δεδομένα θεωρούνται αξιόπιστα και αφορούν την εγκατεστημένη ικανότητα σε MW ανά τεχνολογία και χώρα (IRENA, 2025).

Ωστόσο, η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή δυναμικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγάλης κλίμακας και οικιακών/επιχειρησιακών συστημάτων δεν διαφοροποιείται στην έκθεση της IRENA, με δευτερεύουσες πηγές, όπως εθνικοί ρυθμιστικοί φορείς ενέργειας (όπως η Bundesnetzagentur για τη Γερμανία και η ΡΑΕ για την Ελλάδα), τεχνικές αναλύσεις από διεθνείς οργανισμούς ενέργειας (όπως η IEA PVPS) και εξειδικευμένες εκθέσεις αγοράς που περιλάμβαναν πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της αγοράς φωτοβολταϊκών ανά χρήση και τομέα, να χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ποσοστού που αντιστοιχούσε μόνο σε συστήματα στέγης.

Λογικές υποθέσεις βασισμένες σε ευρωπαϊκούς μέσους όρους ή δεδομένα από γειτονικές χώρες με συγκρίσιμο ενεργειακό προφίλ εφαρμόστηκαν σε περιπτώσεις όπου δεν ήταν δυνατό να συλλεχθούν καλά τεκμηριωμένα δεδομένα για μια συγκεκριμένη χώρα, με το παράρτημα της μελέτης να περιέχει λεπτομερή τεκμηρίωση για κάθε υπόθεση. Τέλος, προκειμένου να προετοιμαστούν τα δεδομένα για χρήση στα μοντέλα πρόβλεψης και τις μελέτες που ακολουθούν, τελικά ομογενοποιήθηκαν όσον αφορά το χρονικό διάστημα (έτη), τη μονάδα μέτρησης (MW) και τη γεωγραφική κάλυψη (εθνικό επίπεδο).

3.2 Δομή και Μορφή των Χρονοσειρών

Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη αφορούν την ετήσια εγκατεστημένη ισχύ (μετρούμενη σε μεγαβάτ) των φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης για κάθε επιλεγμένη ευρωπαϊκή χώρα από το 2014 έως το 2024, με τις πληροφορίες να παρουσιάζονται ως ετήσιες αριθμητικές σειρές με σταθερό χρονικό βήμα ενός έτους και διακρατική χρονική ευθυγράμμιση. Η συνολική εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς, όπως αναφέρθηκε από την IRENA, πολλαπλασιάστηκε με το ποσοστό των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες, όπως εκτιμήθηκε από δευτερεύουσες πηγές, για να δημιουργηθεί μια ανεξάρτητη χρονοσειρά για κάθε χώρα, έχοντας ως αποτέλεσμα μια παράγωγη

μεταβλητή που χρησιμεύει ως βάση για την πρόβλεψη των τιμών στο μέλλον και εκφράζει την εγκατεστημένη ισχύ στις στέγες.

Οι τελικές χρονοσειρές είναι διατεταγμένες σε πίνακα, με κάθε στήλη να αντιπροσωπεύει μια χώρα και κάθε σειρά ένα έτος, διατηρώντας τη διαλειτουργικότητα με τα αντίστοιχα εργαλεία λογισμικού, ενώ διευκολύνει την απλή εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο ανάπτυξης και στο νευρωνικό δίκτυο (LSTM). Επιπλέον, οι προβλέψεις για το 2025-2030 ενσωματώνονται στις ίδιες δομές, ξεχωριστά από τα ιστορικά δεδομένα, ώστε να είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση και η σύγκριση των δύο μοντέλων πρόβλεψης (ανάπτυξης και LSTM).

Τα έτη αναφέρονται στην πρώτη στήλη κάθε αρχείου δεδομένων, ενώ η αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύ σε MW αναγράφεται στη δεύτερη, με την μορφή αυτή να είναι απλή και τυποποιημένη, καθιστώντας την ευκολότερη στην ανάγνωση και την επεξεργασία με τη χρήση προγραμμάτων όπως το MATLAB.

Προκειμένου να εφαρμοστούν τεχνικές κανονικοποίησης και να διαμορφωθούν κατάλληλα οι εισόδους του νευρωνικού δικτύου, η διάταξη των δεδομένων επιτρέπει τη μετατροπή των αριθμητικών τιμών σε μονοδιάστατο διάνυσμα, με την σειρά να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επαναλαμβανόμενα μοντέλα όπως το LSTM, τα οποία χρησιμοποιούν δεδομένα από προηγούμενα χρονικά βήματα για την πρόβλεψη μελλοντικών, επειδή περιέχει συνεχείς και χρονολογικά ταξινομημένες ετήσιες τιμές. Κατά τη δημιουργία παραθύρων σταθερού μεγέθους (γνωστών και ως συρόμενα παράθυρα), τα οποία χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συνόλων εισόδου και εξόδου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, επιτρέποντας στο μοντέλο να «μαθαίνει» τη δυναμική της ανάπτυξης ή της αλλαγής της ισχύος με βάση τα προηγούμενα έτη, καθώς κάθε νέο χρονικό βήμα βασίζεται σε ένα ιστορικό προκαθορισμένου μήκους.

3.3 Επεξεργασία και Καθαρισμός Δεδομένων

Για να διασφαλιστεί η σταθερότητα των μοντέλων πρόβλεψης και η ορθότητα των αποτελεσμάτων, η προετοιμασία των δεδομένων αποτελεί βασικό βήμα, με κάθε χρονοσειρά να υποβάλλεται πρώτα σε έλεγχο πληρότητας, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν ελλείπουσες τιμές ή μηδενικές τιμές που δεν θα αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια την πραγματικότητα, αλλά αντίθετα είναι αποτέλεσμα ανεπαρκούς καταγραφής.

Για να διατηρηθεί η χρονική σειρά συνεχής σε περιπτώσεις που διαπιστώθηκαν ελλιπείς τιμές (όπως έτη χωρίς καταγεγραμμένη ισχύ), χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές γραμμικής

παρεμβολής ενώ παράλληλα το εν λόγω έτος έμεινε εκτός μελέτης για το σχετικό έθνος, εάν η έλλειψη δεδομένων θεωρήθηκε συστηματική ή ευρέως διαδεδομένη.

Οι ασυνέχειες ή οι ξαφνικές μετατοπίσεις στην τάση των δεδομένων εξετάστηκαν επίσης, επειδή μπορεί να έχουν αντίκτυπο στη σταθερότητα των νευρωνικών μοντέλων, με πολλές περιπτώσεις, η εγκυρότητα των δεδομένων να επιβεβαιώνεται με διασταύρωση πληροφοριών από εξωτερικές πηγές (όπως εκθέσεις αγοράς ή εθνικές βάσεις δεδομένων). Προκειμένου να αποφευχθεί η αριθμητική αστάθεια και να προωθηθεί η σύγκλιση του μοντέλου, όλες οι χρονοσειρές κανονικοποιήθηκαν τελικά σε παρόμοια κλίμακα πριν τροφοδοτηθούν στο δίκτυο LSTM, με την κανονικοποίηση να πραγματοποιείται με τη χρήση των ελάχιστων και μέγιστων τιμών για κάθε σειρά (κλιμάκωση min-max), αλλά το μοντέλο ανάπτυξης να χρησιμοποιεί τις απόλυτες τιμές ως είχαν προκειμένου να διατηρηθεί η ερμηνευσιμότητα των προβλέψεων στο MW.

3.4 Μετασχηματισμοί για Ανάλυση Ευαισθησίας

Ένας ελεγχόμενος μετασχηματισμός $\pm 5\%$ εφαρμόστηκε στα ιστορικά δεδομένα προκειμένου να τροποποιηθούν συγκεκριμένα και να εξεταστεί πόσο ευαίσθητα ήταν τα προβλεπόμενα μοντέλα στις αλλαγές σημαντικών παραμέτρων, όπου συγκεκριμένα, για κάθε χρονοσειρά εγκατεστημένης δυναμικότητας (ανά χώρα) δημιουργήθηκαν δύο επιπλέον εκδόσεις, μία με όλες τις ετήσιες τιμές αυξημένες κατά 5% και μία με όλες τις ετήσιες τιμές μειωμένες κατά 5%.

Σκοπός αυτών των τροποποιήσεων είναι να μοντελοποιηθούν διάφορες συνθήκες σφάλματος εισόδου ή αστάθειας κατά την καταγραφή των δεδομένων, καθιστώντας επίσης δυνατή την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του μοντέλου ανάπτυξης και των μοντέλων πρόβλεψης LSTM σε μικρές μεταβολές των αρχικών συνθηκών.

Οι νέες καταστάσεις εισήχθησαν ανεξάρτητα στα δύο μοντέλα και η διαδικασία εφαρμόστηκε συμμετρικά σε ολόκληρη τη χρονοσειρά (2014-2024), με κάθε μοντέλο να παράγει εκτιμήσεις για τα έτη 2025-2030 με βάση τις προσαρμοσμένες εισόδους. Τέλος, υπολογίστηκε η σχετική απόκλιση των αποτελεσμάτων συγκρίνοντας τις προβλέψεις με εκείνες της "αρχικής" χρονοσειράς, αξιολογώντας την ευαισθησία (ή η σταθερότητα) των μοντέλων σε μικρές μεταβολές των εισροών με τη χρήση ποσοτικών προτύπων, όντας ιδιαίτερα χρήσιμο για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων σε πρακτικές εφαρμογές.

3.5 Πίνακες δεδομένων

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών συστημάτων (σε MW) ανά έτος για την περίοδο 2014–2024 σε επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες, περιλαμβάνοντας παράλληλα μια εκτίμηση του ποσοστού που αντιστοιχεί σε φωτοβολταϊκά στέγης επί του συνόλου της εγκατεστημένης ισχύος για κάθε χώρα, βασισμένη σε δημοσιευμένα δεδομένα και σχετικές μελέτες. Ο συνδυασμός της χρονικής εξέλιξης και της διαχωρισμένης συμμετοχής των συστημάτων στέγης επιτρέπει την αξιολόγηση της συμβολής τους στη συνολική ενεργειακή μετάβαση και εντοπίζει τις διαφορές μεταξύ χωρών ως προς τον ρυθμό υιοθέτησης και ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας.

Πίνακας 3-1: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΑΝΑ ΕΤΟΣ

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΑΝΑ ΕΤΟΣ													ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΦΩΤ.ΣΤΕΓΗΣ		
α/α	ΧΩΡΑ	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	MW	%	
1	Γερμανία	37898	39222	40677	42291	45156	48912	53669	60036	67477	81737	98737	60	%	
2	Ισπανία	4697	4704	4713	4723	4764	8807	10136	13715	23311	28712	35100			30
3	Ιταλία	18594	18901	19283	19682	20108	20865	21650	22594	24555	29789	36960			70
4	Ολλανδία	1007	1526	2135	2911	4608	7228	11110	14823	19600	23904	26060			80
5	Γαλλία	6034	7138	7702	8610	9629	10729	11917	14603	17341	20542	25242			50
6	Ηνωμένο Βασίλειο	5528	9601	11914	12760	13060	13345	13551	13915	14651	15919	17620			40
7	Πολωνία	27	108	187	287	562	1539	3955	7416	12170	15809	24109			50
8	Βέλγιο	3015	3132	3329	3621	4000	4637	5573	6012	6756	8549	9780			70

9	Ελλάδα	2596	2604	2604	2606	2651	2834	3288	4277	5430	7030	9630	45
10	Ελβετία	1061	1394	1664	1906	2173	2498	2973	3655	4340	5840	6940	

Ο ακόλουθος πίνακας αποτυπώνει την εκτιμώμενη εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στέγης ανά έτος για την περίοδο 2014–2024, όπως προκύπτει από την εφαρμογή των αντίστοιχων ποσοστών διείσδυσης στις συνολικές τιμές ισχύος κάθε χώρας. Παρουσιάζει τη δυναμική ανάπτυξη αυτής της κατηγορίας μικρής κλίμακας παραγωγής σε επιλεγμένα κράτη της Ευρώπης, δίνοντας έμφαση στις διαφορές στην ταχύτητα ανάπτυξης και στις τεχνοοικονομικές στρατηγικές που ακολουθούνται, βοηθώντας την κατανόηση της επίδρασης πολιτικών κινήτρων και ρυθμιστικών πλαισίων στην υιοθέτηση φωτοβολταϊκών στέγης, καθώς και η σύγκριση διαφορετικών προσεγγίσεων ενεργειακής μετάβασης.

Πίνακας 3-2: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΕΓΗΣ ΑΝΑ ΕΤΟΣ

ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΕΓΗΣ ΑΝΑ ΕΤΟΣ													M W
α/α	ΧΩΡΑ	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
1	Γερμανία	22738.8	23533.2	24406.2	25374.6	27093.6	29347.2	32201.4	36021.6	40486.2	49042.2	59242.2	
2	Ισπανία	1409.1	1411.2	1413.9	1416.9	1429.2	2642.1	3040.8	4114.5	6993.3	8613.6	10530	
3	Ιταλία	13015.8	13230.7	13498.1	13777.4	14075.6	14605.5	15155	15815.8	17188.5	20852.3	25872	
4	Ολλανδία	805.6	1220.8	1708	2328.8	3686.4	5782.4	8888	11858.4	15680	19123.2	20848	
5	Γαλλία	3017	3569	3851	4305	4814.5	5364.5	5958.5	7301.5	8670.5	10271	12621	
6	Ηνωμένο Βασίλειο	2211.2	3840.4	4765.6	5104	5224	5338	5420.4	5566	5860.4	6367.6	7048	
7	Πολωνία	13.5	54	93.5	143.5	281	769.5	1977.5	3708	6085	7904.5	12054.5	
8	Βέλγιο	2110.5	2192.4	2330.3	2534.7	2800	3245.9	3901.1	4208.4	4729.2	5984.3	6846	

9	Ελλάδα	1168.2	1171.8	1171.8	1172.7	1192.95	1275.3	1479.6	1924.65	2443.5	3163.5	4333.5
10	Ελβετία	636.6	836.4	998.4	1143.6	1303.8	1498.8	1783.8	2193	2604	3504	4164

Οι δύο επόμενοι πίνακες παρουσιάζουν εναλλακτικά σενάρια υπολογισμού της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης, λαμβάνοντας υπόψη μια απόκλιση $\pm 5\%$ στα ποσοστά συμμετοχής που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση. Ο πρώτος πίνακας («-5%») απεικονίζει τη συντηρητική εκδοχή, ενώ ο δεύτερος («+5%») την αισιόδοξη, συμβάλλοντας στην κατανόηση της αβεβαιότητας που περιέχει κάθε εκτίμηση και δίνουν τη δυνατότητα αξιολόγησης της επίδρασης των διαφορετικών ποσοστών συμμετοχής στις τελικές τιμές.

Πίνακας 3-3: Πίνακας συντηρητικής εκτίμησης

1	Γερμανία	20843.9	21572.1	22372.35	23260.05	24835.8	26901.6	29517.95	33019.8	37112.35	44955.35	54305.35
2	Ισπανία	1174.25	1176	1178.25	1180.75	1191	2201.75	2534	3428.75	5827.75	7178	8775
3	Ιταλία	12086.1	12285.6	12533.95	12793.3	13070.2	13562.25	14072.5	14686.1	15960.75	19362.85	24024
4	Ολλανδία	755.25	1144.5	1601.25	2183.25	3456	5421	8332.5	11117.25	14700	17928	19545
5	Γαλλία	2715.3	3212.1	3465.9	3874.5	4333.05	4828.05	5362.65	6571.35	7803.45	9243.9	11358.9
6	Ηνωμένο Βασίλειο	1934.8	3360.35	4169.9	4466	4571	4670.75	4742.85	4870.25	5127.85	5571.65	6167
7	Πολωνία	12.15	48.6	84.15	129.15	252.9	692.55	1779.75	3337.2	5476.5	7114.05	10849.05
8	Βέλγιο	1959.75	2035.8	2163.85	2353.65	2600	3014.05	3622.45	3907.8	4391.4	5556.85	6357
9	Ελλάδα	1038.4	1041.6	1041.6	1042.4	1060.4	1133.6	1315.2	1710.8	2172	2812	3852
10	Ελβετία	583.55	766.7	915.2	1048.3	1195.15	1373.9	1635.15	2010.25	2387	3212	3817

Πίνακας 3-4: Πίνακας αισιόδοξης εκτίμησης

1	Γερμανία	24633.7	25494.3	26440.05	27489.15	29351.4	31792.8	34884.85	39023.4	43860.05	53129.05	64179.05
2	Ισπανία	1643.95	1646.4	1649.55	1653.05	1667.4	3082.45	3547.6	4800.25	8158.85	10049.2	12285
3	Ιταλία	13945.5	14175.75	14462.25	14761.5	15081	15648.75	16237.5	16945.5	18416.25	22341.75	27720
4	Ολλανδία	855.95	1297.1	1814.75	2474.35	3916.8	6143.8	9443.5	12599.55	16660	20318.4	22151
5	Γαλλία	3318.7	3925.9	4236.1	4735.5	5295.95	5900.95	6554.35	8031.65	9537.55	11298.1	13883.1
6	Ηνωμένο Βασίλειο	2487.6	4320.45	5361.3	5742	5877	6005.25	6097.95	6261.75	6592.95	7163.55	7929
7	Πολωνία	14.85	59.4	102.85	157.85	309.1	846.45	2175.25	4078.8	6693.5	8694.95	13259.95
8	Βέλγιο	2261.25	2349	2496.75	2715.75	3000	3477.75	4179.75	4509	5067	6411.75	7335
9	Ελλάδα	1298	1302	1302	1303	1325.5	1417	1644	2138.5	2715	3515	4815
10	Ελβετία	689.65	906.1	1081.6	1238.9	1412.45	1623.7	1932.45	2375.75	2821	3796	4511

4. Μεθοδολογία

Για την εκτίμηση της μελλοντικής διείσδυσης των ηλιακών συστημάτων στις στέγες είναι απαραίτητη η υιοθέτηση κατάλληλων μεθοδολογικών προσεγγίσεων που μπορούν να προσαρμοστούν στη δυναμική φύση των δεδομένων και στις αβεβαιότητες της αγοράς, με το παρόν κεφάλαιο να περιγράφει την μεθοδολογική προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε, η οποία στηρίχθηκε σε δύο ξεχωριστά αλλά συμπληρωματικά μοντέλα πρόβλεψης: ένα παραδοσιακό μοντέλο ανάπτυξης και ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με μακρά βραχυπρόθεσμη μνήμη.

Το σκεπτικό πίσω από την επιλογή του LSTM είναι η ικανότητά του να "μαθαίνει" από τις τάσεις του παρελθόντος και να προβλέπει μελλοντικές τιμές χρονοσειρών, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεξάρτηση των επόμενων χρονικών σημείων, λειτουργώντας καλά για θέματα όπως η ετήσια εγκατεστημένη δυναμικότητα, όταν τα δεδομένα παρουσιάζουν μια διαχρονική εξέλιξη. Ωστόσο, με βάση τον ιστορικό ρυθμό μεταβολής, το μοντέλο ανάπτυξης κάνει την πιο απλή, αλλά και πάλι ισχυρή υπόθεση ότι η ανάπτυξη ακολουθεί εκθετική ή λογαριθμική πορεία.

Η διπλή προσέγγιση παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων από άποψη ερμηνευσιμότητας και ακρίβειας, ενώ παράλληλα με σκοπό την βελτίωση της αξιοπιστίας των μοντέλων, προστέθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας για την αξιολόγηση της σταθερότητας των προβλέψεων υπό μικρές προσαρμογές, επιτρέποντας διακυμάνσεις $\pm 5\%$ στα δεδομένα εισόδου, με την εφαρμογή κάθε μοντέλου, τις επιλεγμένες παραμέτρους και την προσέγγιση της ανάλυσης ευαισθησίας να εξετάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.1 Υλοποίηση Νευρωνικού Δικτύου

Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (LSTM), το οποίο εκπαιδεύτηκε χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα χρονοσειρών από το 2014 έως το 2024, χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος σε στέγες ανά χώρα στο μέλλον, χρησιμοποιώντας τις ενσωματωμένες στο MATLAB λειτουργίες επεξεργασίας χρονοσειρών και εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων.

Αρχικά, απομονώθηκε η χρονοσειρά εγκατεστημένης ισχύος και τα δεδομένα εισήχθησαν από ένα αρχείο Excel, όπου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση της εκπαίδευσης, κανονικοποιήθηκε στη μονάδα $[0,1]$, με τη χρήση γραμμικής κλιμάκωσης με βάση τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές της σειράς. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τα δεδομένα

εισόδου, XTrain, και τα δεδομένα εξόδου, YTrain, με τη διάσπαση των δεδομένων σε διαδοχικά υποσύνολα χρησιμοποιώντας ένα συρόμενο παράθυρο σταθερού μεγέθους (5 έτη), με την αντίστοιχη έξοδο να είναι η επόμενη τιμή στη σειρά και κάθε δείγμα εισόδου είχε πέντε διαδοχικές χρονικές τιμές.

Ένα στρώμα μνήμης LSTM με 50 μονάδες, ένα πλήρως συνδεδεμένο στρώμα (fullyConnectedLayer) που οδηγεί στην έξοδο μέσω ενός στρώματος παλινδρόμησης (regressionLayer) και ένα στρώμα εισόδου ακολουθίας (sequenceInputLayer) αποτελούν τα τρία κύρια στρώματα του εφαρμοζόμενου μοντέλου LSTM, χρησιμοποιώντας την μέθοδος "adam" για την εκπαίδευση σε 300 εποχές, με αποκοπή κλίσης για την αποφυγή αστάθειας του μοντέλου και ρυθμό μάθησης 0,005.

Μετά την εκπαίδευση, προβλέφθηκαν τα επόμενα έξι έτη (2025-2030) με τη χρήση ενός κυλιόμενου συστήματος πρόβλεψης, με την επόμενη τιμή να προβλέπεται από το μοντέλο χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις πέντε τελευταίες παρατηρήσεις της κανονικοποιημένης σειράς. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε επόμενο έτος αφού αυτό προστέθηκε στην είσοδο, η οποία διαφάνειες, χρησιμοποιώντας το αντίστροφο της κανονικοποίησης για τη μετατροπή των προβλεπόμενων τιμών πίσω στην αρχική σειρά ισχύος (MW).

Τα έτη πρόβλεψης (2025-2030) και οι σχετικές τιμές ισχύος περιλαμβάνονται στο τελικό αποτέλεσμα, το οποίο αποθηκεύεται σε πίνακα, με την άμεση οπτική σύγκριση της εξέλιξης να κατέστη επίσης δυνατή με τη δημιουργία ενός γραφήματος που εμφανίζει τα ιστορικά δεδομένα και τις προβλέψεις για το συγκεκριμένο έθνος. Κάθε χώρα του δείγματος υποβλήθηκε στην ίδια διαδικασία, με αρχεία εισόδου ειδικά για κάθε έθνος.

Η επιτυχία ενός μοντέλου LSTM σε προβλέψεις χρονοσειρών εξαρτάται καθοριστικά από την επιλογή του μεγέθους του παραθύρου. Προκειμένου να καταγραφούν οι βραχυπρόθεσμες τάσεις και τα μοτίβα στην εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος, για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ένα μέγεθος πέντε, πράγμα που σημαίνει ότι κάθε δείγμα εισόδου περιέχει τιμές από τα προηγούμενα πέντε έτη, που επιτυγχάνει μια ισορροπία μεταξύ της παροχής επαρκούς ιστορικού πλαισίου και της αποφυγής υπερβολικής πολυπλοκότητας του μοντέλου, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε υπερπροσαρμογή ή να καταστήσει την εκπαίδευση δύσκολη.

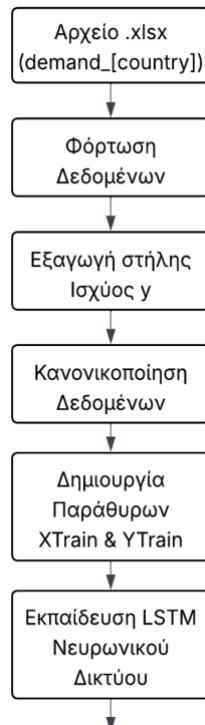
Οι 50 μονάδες LSTM που απαρτίζουν το νευρωνικό δίκτυο επιλέχθηκαν με βάση σχετικές έρευνες και πειράματα, με τις μακροχρόνιες εξαρτήσεις στις χρονοσειρές μπορούν να διατηρηθούν και να μάθουν με έναν αρκετά μεγάλο αριθμό μονάδων LSTM, αλλά οι

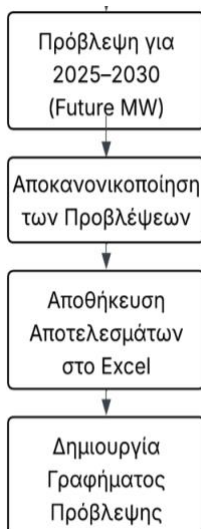
βραχυχρόνιες συσχετίσεις μπορούν ακόμα να μάθουν. Μόνο η τελευταία έξοδος της σειράς χρησιμοποιείται για πρόβλεψη όταν το επίπεδο OutputMode έχει οριστεί σε "last", καθιστώντας κατάλληλη για θέματα παλινδρόμησης όταν απαιτείται η επόμενη χρονική τιμή.

Για την εκπαίδευση χρησιμοποιήθηκε η τεχνική βελτιστοποίησης Adam, η οποία θεωρείται γενικά ως μια γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδος για τη σύγκλιση των νευρωνικών δικτύων, και επιλέχθηκε ένα όριο 300 εποχών για να εξασφαλιστεί επαρκής χρόνος εκμάθησης χωρίς υπερπροσαρμογή. Η ισορροπία μεταξύ της ταχύτητας μάθησης και της σταθερότητας κατέστη δυνατή με τον αρχικό ρυθμό μάθησης 0,005, με τις κλίσεις του μοντέλου να υποβάλλονται επίσης σε έναν περιορισμό (GradientThreshold) προκειμένου να αποφευχθούν εκρηκτικά επίπεδα που μπορεί να οδηγήσουν σε αστάθεια κατά την εκπαίδευση.

Τέλος, μπορούν να προβλεφθούν πολλά βήματα στο μέλλον χάρη στην κυλιόμενη πρόβλεψη, η οποία βασίζεται στη διαδοχική χρήση των εκτιμήσεων του μοντέλου ως νέες εισόδους και θεωρείται κατάλληλη για μεσοπρόθεσμες προβλέψεις όπως αυτές της παρούσας μελέτης (έως και έξι έτη μπροστά), παρά το γεγονός ότι είναι επιρρεπής σε σωρευτικές ανακρίβειες.

Διάγραμμα Κώδικα LSTM





Σχήμα 4-1: Διάγραμμα LSTM

4.2 Περιγραφή του Growth Model

Το μοντέλο ανάπτυξης χρησιμοποιεί την απλή αλλά αποτελεσματική προσέγγιση του σύνθετου ετήσιου ρυθμού ανάπτυξης (CAGR) για την πρόβλεψη της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος για τα έτη 2025 έως 2030, με αρχικά, το μοντέλο να ανακτά τα δεδομένα εγκατεστημένης ισχύος από το αρχείο δεδομένων, μαζί με τα έτη που αντιστοιχούν σε αυτά. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του CAGR χρησιμοποιείται ο ετήσιος ρυθμός αύξησης που ισούται με τον σταθερό ρυθμό με τον οποίο η εγκατεστημένη δυναμικότητα θα πρέπει να αυξηθεί από την αρχική τιμή κατά την περίοδο αναφοράς στην τελική τιμή.

Πολλαπλασιάζοντας την πιο πρόσφατη καταγεγραμμένη τιμή με τον σύνθετο ρυθμό αύξησης κατά τα επόμενα έτη, το μοντέλο προβλέπει τα μελλοντικά επίπεδα εγκατεστημένης δυναμικότητας χρησιμοποιώντας τον CAGR, αγνοώντας τις απότομες διακυμάνσεις ή τους εξωτερικούς παράγοντες που θα μπορούσαν να μεταβάλουν δραστικά την τάση υπέρ της παραδοχής σταθερής επέκτασης.

Τα ευρήματα της πρόβλεψης παρουσιάζονται τόσο γραφικά όσο και σε μορφή πίνακα, με τον τελευταίο να αποθηκεύεται σε αρχείο Excel για πρόσθετη χρήση ή μελέτη, διευκολύνοντας την οπτική σύγκριση των δύο σειρών αριθμών και η αξιολόγηση της συνέχειας της ανάπτυξης από το διάγραμμα, το οποίο εμφανίζει τα ιστορικά δεδομένα με μπλε κύκλους και τις προβλέψεις με κόκκινα αστέρια.

Το Μοντέλο Ανάπτυξης είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την πραγματοποίηση γρήγορων προβλέψεων των μεσοπρόθεσμων τάσεων παρά την απλότητά του, ιδίως όταν δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες αλλαγές ή θόρυβος στα δεδομένα, με την εφαρμογή ωστόσο του απαιτεί προσοχή, επειδή αγνοεί μη γραμμικές συμπεριφορές και εξωτερικές μεταβλητές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τον τρόπο με τον οποίο θα εξελιχθεί η εγκατεστημένη δυναμικότητα στο μέλλον.

Διάγραμμα Κώδικα GROWTH



Σχήμα 4-2: Διάγραμμα Growth

4.3 Διαφορές μεταξύ μοντέλων

Τα χαρακτηριστικά των δεδομένων και οι στόχοι της πρόβλεψης παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του αν θα χρησιμοποιηθεί ένα απλό Μοντέλο Ανάπτυξης ή ένα πιο περίπλοκο μοντέλο όπως το LSTM. Όταν τα δεδομένα παρουσιάζουν μια ευδιάκριτη, συνεπή τάση ανάπτυξης χωρίς απότομες ταλαντώσεις ή περίπλοκα μοτίβα, το Μοντέλο

Ανάπτυξης αποδίδει καλύτερα και μπορεί να παράγει γρήγορα, ακριβή ευρήματα που είναι επίσης απλά στην κατανόηση, εάν η χρονοσειρά είναι λογικά ομαλή και απαλλαγμένη από απότομες διακυμάνσεις ή εποχιακές επιδράσεις. Λειτουργεί καλά σε περιπτώσεις όπου η πρόβλεψη πρέπει να γίνει με μικρή χρηματοδότηση ή όπου απαιτείται σαφήνεια και απλότητα, όπως για μια γρήγορη στρατηγική αξιολόγηση ή όταν ο χρήστης δεν έχει εξειδικευμένη κατανόηση της μηχανικής μάθησης.

Ωστόσο, ως μοντέλο μηχανικής μάθησης που μπορεί να "μαθαίνει" από περίπλοκες χρονικές σχέσεις και δομές, το LSTM είναι κατάλληλο για δεδομένα που παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά, όπως σημαντικές διακυμάνσεις, εποχικότητα ή άλλα περίπλοκα μοτίβα που το μοντέλο ανάπτυξης δεν είναι σε θέση να εντοπίσει, και επειδή το LSTM μπορεί να χειριστεί τόσο τις βραχυπρόθεσμες όσο και τις μακροπρόθεσμες εξαρτήσεις, προτιμάται, ιδίως όταν η χρονοσειρά είναι ασταθής. Επιπλέον, μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα σε μη γραμμικές αλλαγές, όπως απότομες διακυμάνσεις που προκαλούνται από τεχνικές εξελίξεις, πολιτικές παρεμβάσεις ή οικονομικές καταστροφές. Για να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή, η LSTM απαιτεί προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων, σημαντικό όγκο δεδομένων για εκπαίδευση και μεγαλύτερη ικανότητα επεξεργασίας.

Η LSTM έχει πολλά να προσφέρει όταν η μακροπρόθεσμη ακρίβεια πρόβλεψης είναι σημαντική και τα δεδομένα παρουσιάζουν περίπλοκη δυναμική, με το Μοντέλο Ανάπτυξης όμως να συνεχίζει να αποτελεί μια αξιόπιστη και αποτελεσματική επιλογή για την πραγματοποίηση γρήγορων προβλέψεων με μικρότερα σύνολα δεδομένων ή σε περιβάλλοντα όπου η ερμηνευσιμότητα και η διαφάνεια είναι πιο σημαντική. Επιπρόσθετα, η απλότητα του Μοντέλου Ανάπτυξης αυξάνει την ευαισθησία του στα υποκείμενα πρότυπα, γεγονός που το καθιστά πολύτιμη "γραμμή βάσης" για τη σύγκριση και την αξιολόγηση πιο περίπλοκων μοντέλων.

Δεδομένου ότι το Μοντέλο Ανάπτυξης βασίζεται σε καθορισμένες υποθέσεις σχετικά με τον ρυθμό ανάπτυξης, δεν έχει την ικανότητα να ενσωματώνει νέα δεδομένα και να βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου μέσω συνεχούς εκπαίδευσης, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα του LSTM, όπως και να μπορεί να προσαρμόζεται και να παράγει ακριβέστερες προβλέψεις σε περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες αλλάζουν γρήγορα. Από την άλλη πλευρά, όταν η πραγματική τάση αποκλίνει από το σταθερό μοτίβο, το Μοντέλο Ανάπτυξης θα μπορούσε να υπερβάλει την ανάπτυξη ή να την υποεκτιμήσει.

Τέλος, ο συνδυασμός και των δύο μοντέλων είναι συχνά η καλύτερη πορεία δράσης από πλευράς χρήσης, με έναν συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας, ερμηνευσιμότητας και απλότητας να μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του LSTM για πιο εμπειριστατωμένες προβλέψεις και του Μοντέλου Ανάπτυξης για μια γρήγορη πρώτη εκτίμηση. Επιπλέον, η αντιπαράβολή των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων μπορεί να παράσχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το πόσο ακριβείς είναι οι προβλέψεις, καθώς και να επισημάνει τις στιγμές κατά τις οποίες η αγορά είναι ασταθής ή αλλάζει.

4.4 Δοκιμές Ανάλυσης Ελαστικότητας

Ένα σημαντικό εργαλείο για να διαπιστωθεί πόσο ευαίσθητο είναι ένα μοντέλο στις μεταβολές των κύριων παραμέτρων του είναι η ανάλυση ελαστικότητας. Διερευνούμε πώς μικρές προσαρμογές στις παραμέτρους του μοντέλου ή στα δεδομένα εισόδου επηρεάζουν τις προβλέψεις και τη συμπεριφορά του συνολικού συστήματος χρησιμοποιώντας δοκιμές ανάλυσης ελαστικότητας, επιτρέποντας να προσδιορίσουμε ποιες παράμετροι έχουν τις περισσότερες επιπτώσεις στην πρόβλεψη και να αξιολογήσουμε τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Οι δοκιμές ελαστικότητας πραγματοποιούνται με τη σκόπιμη αλλαγή μερικών επιλεγμένων παραμέτρων και την παρακολούθηση της αντίδρασης του μοντέλου, επιτρέποντάς μας να εντοπίσουμε πιθανούς κινδύνους είτε υπερπροσαρμογής είτε υποεκτίμησης σημαντικών αλλαγών στα δεδομένα. Επιπλέον, προσφέροντας συστάσεις σχετικά με τις καλύτερες ρυθμίσεις ή τακτικές που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, η ανάλυση αυτή βοηθά τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων σε ασαφείς καταστάσεις. Όταν υπάρχουν αξιοσημείωτες μεταβολές στα δεδομένα ή όταν οι προβλέψεις χρησιμοποιούνται για κρίσιμους σκοπούς, όπως η διαχείριση πόρων ή η δημιουργία πολιτικής, η σημασία των δοκιμών ανάλυσης ελαστικότητας αυξάνεται, με την ασφαλέστερη και αποτελεσματικότερη χρήση των προβλέψεων σε πρακτικές καταστάσεις να εξασφαλίζεται με τη γνώση της ευαισθησίας του μοντέλου.

Η ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τη διερεύνηση των επιπτώσεων μικρών προσαρμογών στις εισροές των μοντέλων πρόβλεψης, με συγκεκριμένα να πραγματοποιούνται πειράματα με αύξηση και μείωση της αρχικής τιμής της εγκατεστημένης ισχύος κατά 5% για κάθε χώρα και μοντέλο (LSTM και Growth-based), στοχεύοντας να προσδιοριστεί πόσο η τελική πρόβλεψη βασίζεται σε μικρές μεταβολές των προηγούμενων δεδομένων.

Επειδή τέτοιες διακυμάνσεις μπορούν εύκολα να συμβούν λόγω σφαλμάτων μέτρησης, αλλαγών πολιτικής ή περιορισμών στη συλλογή δεδομένων, η επιλογή $\pm 5\%$ καθορίστηκε με βάση τη ρεαλιστικότητα των σεναρίων, καθορίζοντας εάν τα μοντέλα είναι ανθεκτικά ή υπερβολικά ευαίσθητα σε μικρές προσαρμογές, γεγονός που θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο την αξιοπιστία τους σε πρακτικές ρυθμίσεις.

Χωρίς αλλαγή των παραμέτρων, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας κάθε ενημερωμένη έκδοση των δεδομένων ως ανεξάρτητη είσοδο στο ίδιο εκπαιδευμένο μοντέλο. Για να καταδειχθεί η ευαισθησία κάθε προσέγγισης για κάθε έθνος, σημειώθηκαν και παρουσιάστηκαν συγκριτικά οι αποκλίσεις των προβλέψεων, με τα σχετικά γραφικά στο κεφάλαιο 5 να παρουσιάζουν τα ευρήματα αυτής της ανάλυσης.

Η έρευνα ευαισθησίας συμβάλλει στην αποσαφήνιση των ορίων της αξιοπιστίας των προβλέψεων και υποστηρίζει τη συνολική αξιολόγηση των μοντέλων, όπως μπορεί επίσης να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο κατά τη λήψη αποφάσεων, ιδίως σε καταστάσεις όπου τα πράγματα είναι διαφορετικά ή αλλάζουν γρήγορα.

5. Αποτελέσματα

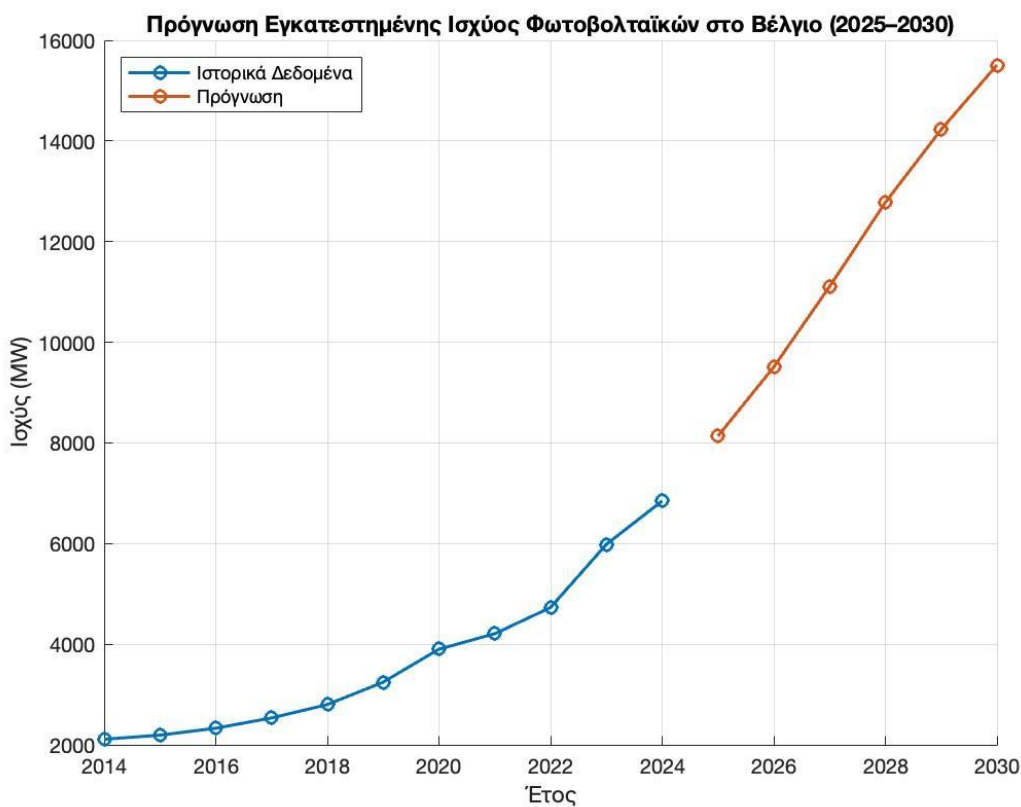
Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πρόβλεψης για τη μελλοντική εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών σε στέγες σε επιλεγμένες ευρωπαϊκές χώρες, με χρονικό ορίζοντα έως το 2030. Αρχικά, αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω της εφαρμογής των νευρωνικών δικτύων τύπου LSTM, με στόχο την αναγνώριση μη γραμμικών τάσεων και την αξιοποίηση της χρονικής εξάρτησης των δεδομένων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι προβλέψεις που εξήχθησαν από τα μαθηματικά μοντέλα ανάπτυξης (growth models), τα οποία προσφέρουν μια απλοποιημένη αλλά ρεαλιστική απεικόνιση της αναμενόμενης αύξησης. Ακολουθεί συγκριτική αξιολόγηση των δύο προσεγγίσεων, βάσει ακρίβειας, ερμηνευσιμότητας και προσαρμοστικότητας. Τέλος, εξετάζεται η επίδραση μεταβολών στα δεδομένα εισόδου μέσω ανάλυσης ευαισθησίας και ελαστικότητας, με στόχο την αποτίμηση της αξιοπιστίας των προβλέψεων και την κατανόηση της συμπεριφοράς των μοντέλων υπό συνθήκες αβεβαιότητας.

5.1 Πρόβλεψη με Νευρωνικά Δίκτυα

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πρόβλεψης που επιτεύχθηκαν με τη χρήση νευρωνικών δικτύων τύπου LSTM (Long Short-Term Memory). Τα LSTM ανήκουν στην κατηγορία των επαναληπτικών νευρωνικών δικτύων (Recurrent Neural Networks – RNNs) και διακρίνονται για την ικανότητά τους να διατηρούν μνήμη παλαιότερων χρονικών στιγμών, επιτρέποντας την αναγνώριση μακροχρόνιων εξαρτήσεων στα δεδομένα χρονοσειρών. Σε αντίθεση με τα απλούστερα μοντέλα ανάπτυξης, τα LSTM μπορούν να ενσωματώσουν και να "μάθουν" από πλήθος στατιστικών και συστημικών παραμέτρων που επιδρούν έμμεσα ή άμεσα στη δυναμική της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών – όπως οικονομικές, τεχνολογικές και πολιτικές μεταβλητές. Η αξιοποίησή τους στην εργασία αποσκοπεί στην αποτύπωση της πολύπλοκης και συχνά μη γραμμικής εξέλιξης της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών στέγης σε εθνικό επίπεδο, προσφέροντας μια περισσότερο ευέλικτη και προσαρμοστική πρόβλεψη σε σχέση με τα κλασικά μαθηματικά μοντέλα ανάπτυξης.

Βέλγιο

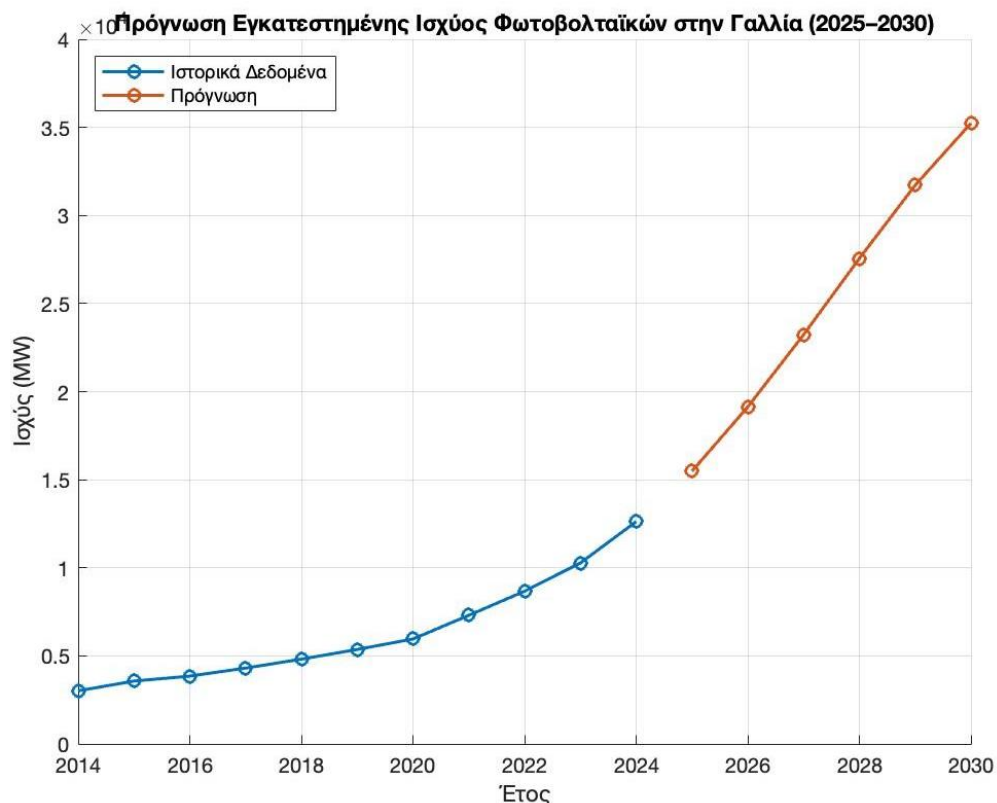
Το Σχήμα 5-1 παρουσιάζει τη χρονοσειρά της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στο Βέλγιο, όπως εκτιμήθηκε με τη χρήση LSTM. Τα ιστορικά δεδομένα δείχνουν έντονα αυξητική τάση μετά το 2019, αντανακλώντας τη θεσμική και τεχνολογική ώθηση που δόθηκε στις αποκεντρωμένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Το μοντέλο LSTM, αξιοποιώντας αυτή τη χρονική δυναμική, προβλέπει ραγδαία άνοδο κατά την περίοδο 2025–2030, με την ισχύ να ξεπερνά τα 15 GW ως το τέλος της δεκαετίας. Η προβλεπόμενη καμπύλη καταδεικνύει την ικανότητα των LSTM να ανιχνεύουν μη γραμμικά μοτίβα σε χρονοσειρές και να αποτυπώνουν συστηματικά την αναπτυξιακή τροχιά, η οποία ενδέχεται να επηρεάζεται από πολλούς εξωτερικούς παράγοντες όπως πολιτικές ενίσχυσης, τιμές εξοπλισμού και κοινωνική αποδοχή.



Σχήμα 5-1: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στο Βέλγιο για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Τα ιστορικά δεδομένα καλύπτουν την περίοδο 2014–2024, ενώ η πρόβλεψη επεκτείνεται έως το 2030.

Γαλλία

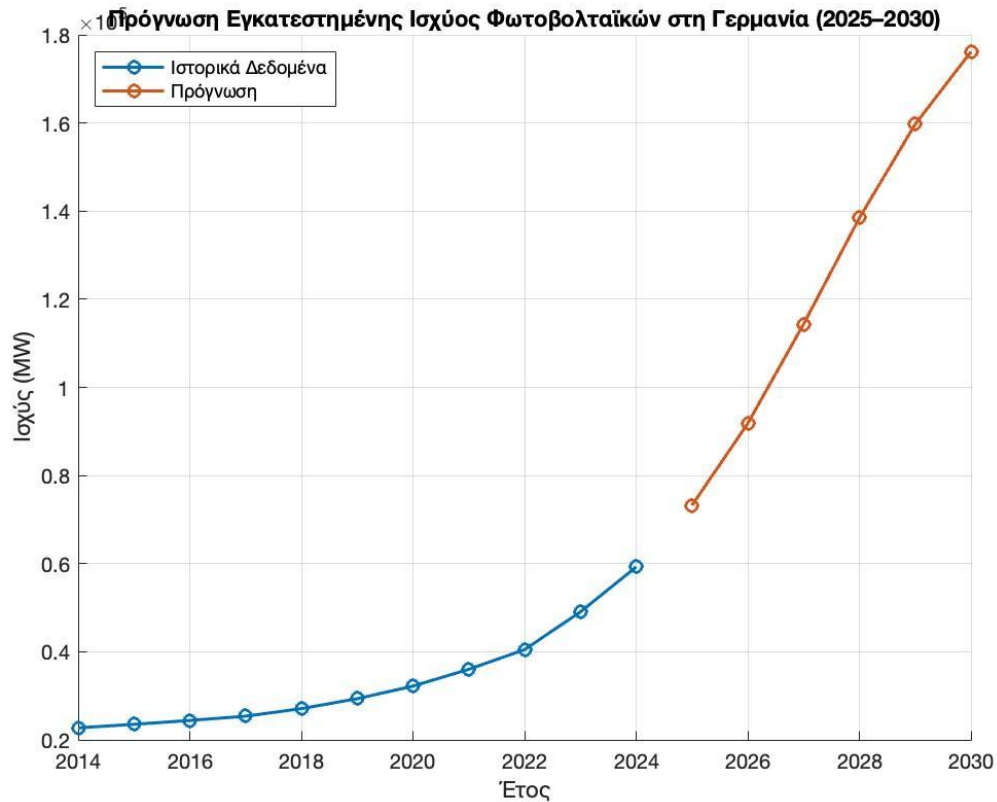
Η καμπύλη δείχνει σταθερή και προοδευτικά αυξανόμενη τάση στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στη Γαλλία, με την πρόβλεψη να εμφανίζει επιτάχυνση της ανάπτυξης μετά το 2024. Η πρόβλεψη του LSTM αντανακλά την εντεινόμενη υποστήριξη που παρέχει η γαλλική πολιτεία σε προγράμματα αυτοπαραγωγής και net metering, καθώς και τη στρατηγική στόχευση των 60 GW συνολικής εγκατεστημένης ισχύος έως το 2030. Η απόκριση του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα καταδεικνύει την ικανότητά του να αποτυπώνει με ακρίβεια την υποκείμενη αναπτυξιακή δυναμική, προβλέποντας σημαντική αύξηση από περίπου 1,6 GW το 2025 σε πάνω από 3,5 GW το 2030 στον τομέα των φωτοβολταϊκών στέγης.



Σχήμα 5-2: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στη Γαλλία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Τα ιστορικά δεδομένα εκτείνονται από το 2014 έως το 2024 και η πρόβλεψη αφορά την περίοδο 2025–2030.

Γερμανία

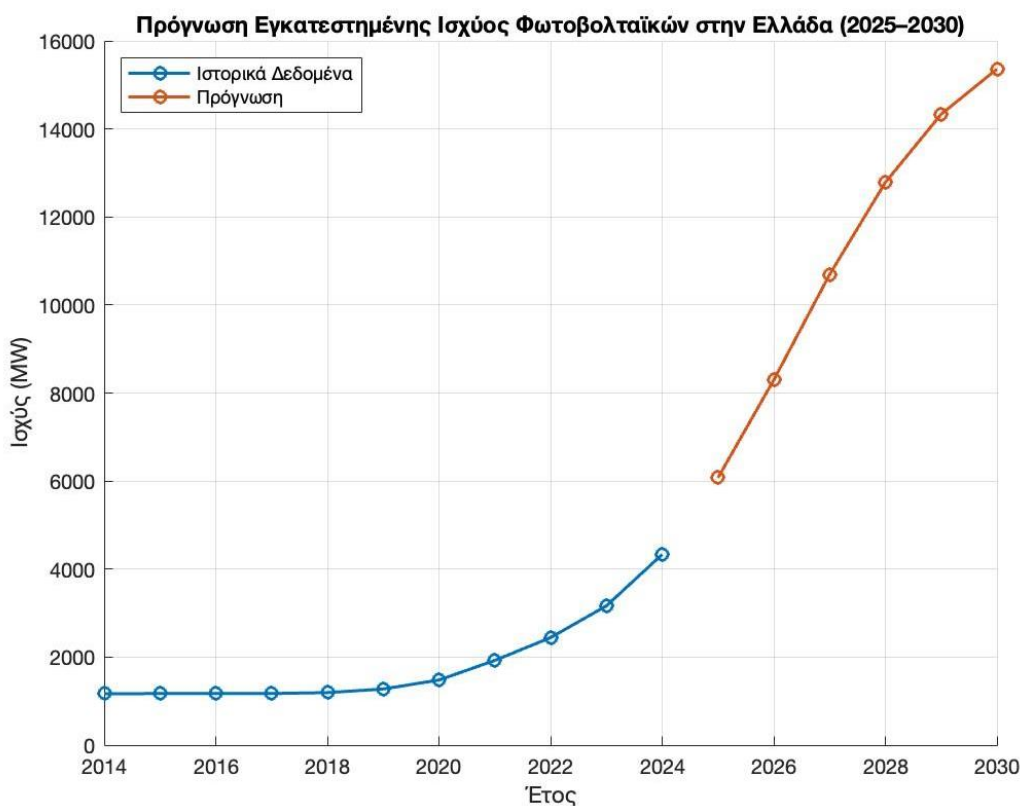
Το διάγραμμα απεικονίζει την εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης στη Γερμανία, βασισμένο σε πρόβλεψη με χρήση LSTM. Το μοντέλο καταγράφει τη συνεχή αυξητική τάση της τελευταίας δεκαετίας και προβλέπει σημαντική επιτάχυνση στην ανάπτυξη μετά το 2025. Η προβλεπόμενη ισχύς σχεδόν τριπλασιάζεται μέχρι το 2030, ξεπερνώντας τα 1,7 εκατ. kW. Η απόκριση αυτή αντανακλά την επιτυχία των πολιτικών ενίσχυσης μέσω του νόμου EEG και των προγραμμάτων net metering που ευνοούν την αυτοπαραγωγή. Το LSTM αξιοποιεί με ακρίβεια τις ιστορικές τάσεις και τις χρονικές εξαρτήσεις, προσφέροντας μια ρεαλιστική προβολή για τη γερμανική αγορά φωτοβολταϊκών στέγης, η οποία θεωρείται η πιο ώριμη στην Ευρώπη.



Σχήμα 5-3: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στη Γερμανία για την περίοδο 2025–2030 με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Τα ιστορικά δεδομένα αφορούν την περίοδο 2014–2024, ενώ η πρόβλεψη εκτείνεται έως το 2030.

Ελλάδα

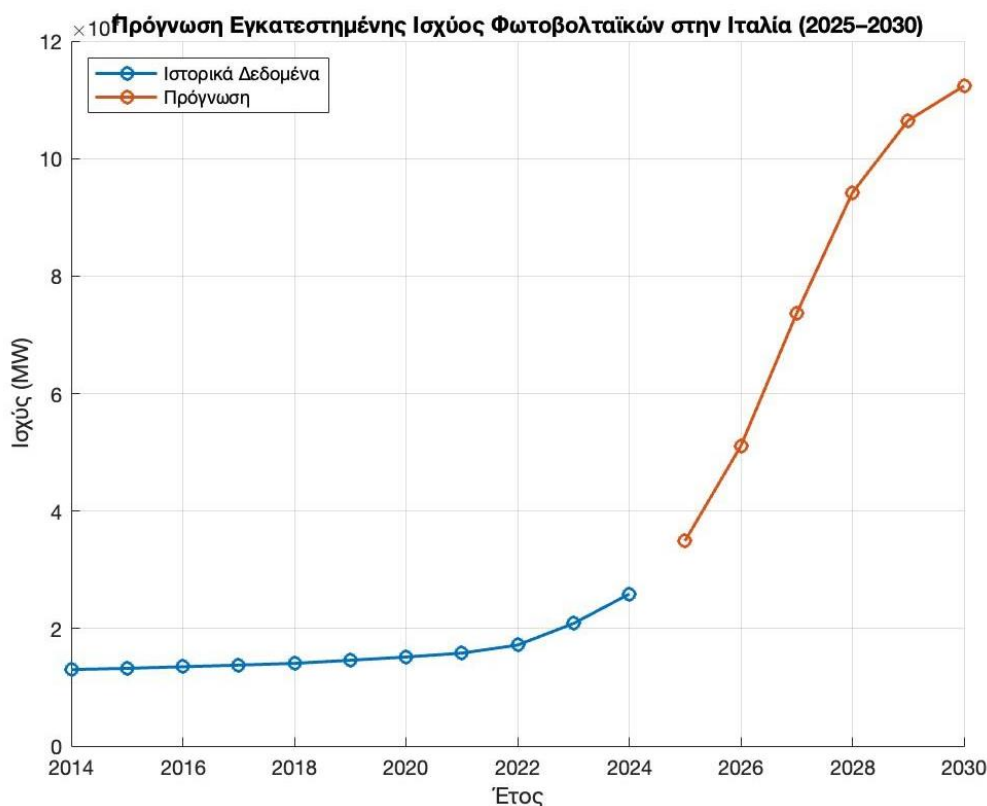
Το Σχήμα 5-4 παρουσιάζει τη χρονολογική εξέλιξη της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος στην Ελλάδα, εστιάζοντας κυρίως στις εγκαταστάσεις σε στέγες. Το μοντέλο LSTM καταγράφει σταθερή τάση επιτάχυνσης μετά το 2020, αντανακλώντας την αύξηση των αιτήσεων αυτοπαραγωγής και την υποστήριξη μέσω του σχήματος net metering. Η πρόβλεψη εμφανίζει σημαντική άνοδο από περίπου 4,3 GW το 2024 σε πάνω από 15 GW έως το 2030, προσεγγίζοντας ταχύτερα τον ευρωπαϊκό μέσο όρο. Το LSTM αξιοποιεί την υποκείμενη ιστορική δυναμική, λαμβάνοντας υπόψη τη θεσμική σταθερότητα, τις επενδύσεις σε μικρής κλίμακας έργα και τις τεχνολογικές εξελίξεις, και παράγει μια αισιόδοξη αλλά τεκμηριωμένη πρόβλεψη για τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών στέγης στην ελληνική ενεργειακή στρατηγική.



Σχήμα 5-4: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Τα ιστορικά δεδομένα καλύπτουν την περίοδο 2014–2024 και η πρόβλεψη επεκτείνεται έως το 2030.

Ιταλία

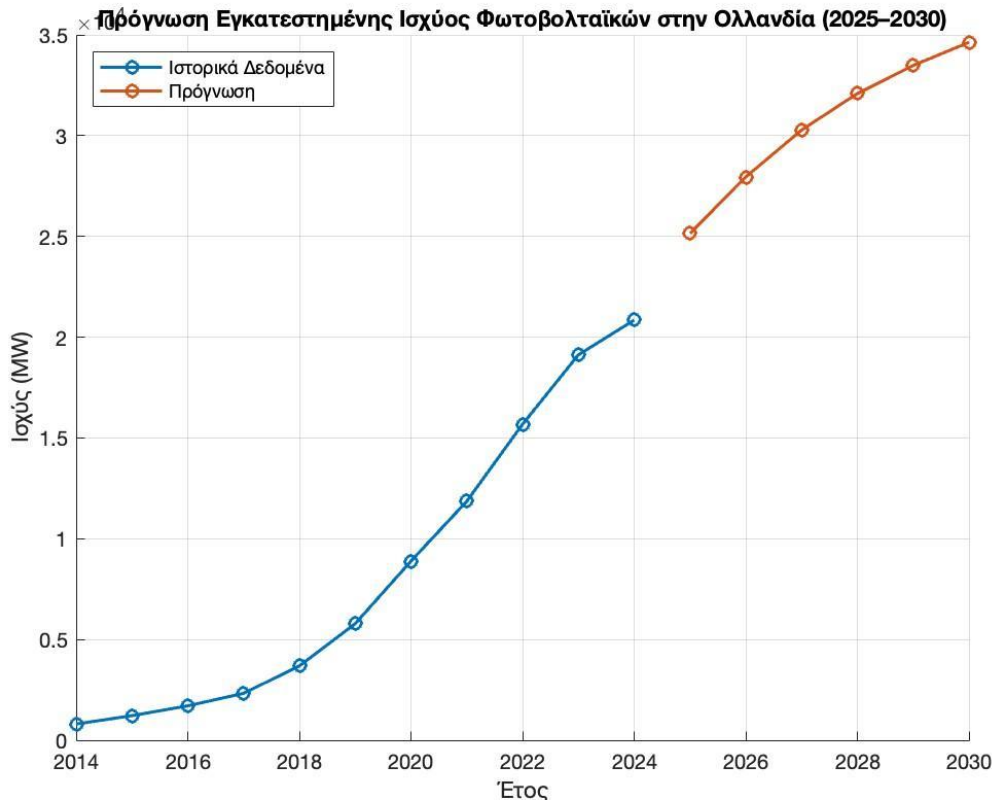
Το γράφημα στο Σχήμα 5-5 καταγράφει την εξελικτική πορεία της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην Ιταλία, σύμφωνα με το μοντέλο πρόβλεψης LSTM. Μετά από μια σχετικά ήπια αύξηση μέχρι το 2020, η ιταλική αγορά παρουσιάζει σαφείς ενδείξεις επιτάχυνσης από το 2021 και μετά, πιθανώς ως αποτέλεσμα φορολογικών κινήτρων και επιδοτήσεων όπως το Superbonus 110%. Το μοντέλο LSTM εντοπίζει αυτό το μεταβαλλόμενο μοτίβο και προβλέπει έντονη ανάπτυξη έως το 2030, με την ισχύ να ξεπερνά τα 11 GW. Η προβλεπόμενη καμπύλη υπογραμμίζει τη δυναμική που έχει αποκτήσει η αυτοπαραγωγή στην Ιταλία, καθώς και τη δυνατότητα των LSTM να ανιχνεύουν μεταβολές στην αναπτυξιακή τάση που σχετίζονται με εξωτερικές παρεμβάσεις ή τεχνολογικές εξελίξεις.



Σχήμα 5-5: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στην Ιταλία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Τα ιστορικά δεδομένα καλύπτουν τα έτη 2014–2024, ενώ η πρόβλεψη επεκτείνεται έως το 2030.

Ολλανδία

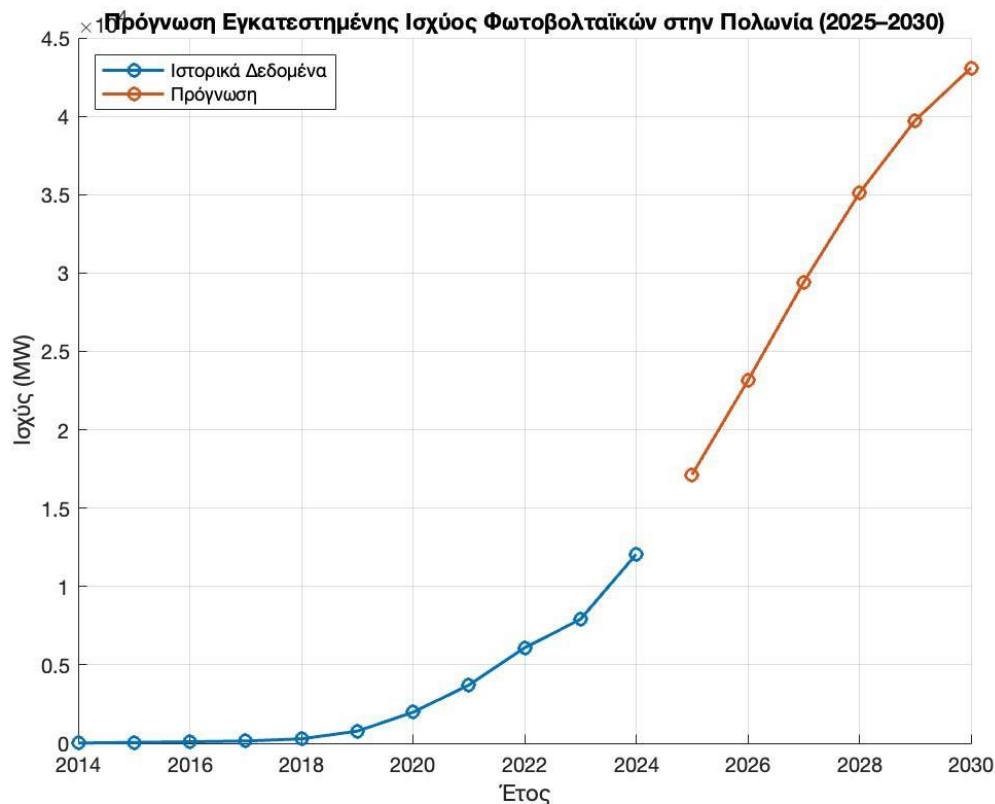
Το Σχήμα 5-6 καταγράφει την εντυπωσιακή αύξηση της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος στην Ολλανδία, ιδιαίτερα μετά το 2018. Η πρόβλεψη του LSTM δείχνει συνεχιζόμενη αύξηση, αν και με ελαφρώς μειούμενο ρυθμό ανάπτυξης, αντανακλώντας μια αγορά που προσεγγίζει σταδιακά το στάδιο κορεσμού. Η ισχύς προβλέπεται να φτάσει τα 3,5 εκατ. kW το 2030, με σταθερή ανάπτυξη στις εγκαταστάσεις σε στέγες – κυρίως λόγω της υψηλής πυκνότητας κατοίκησης, της περιορισμένης διαθεσιμότητας γης και της πολιτικής ενίσχυσης της αυτοπαραγωγής. Το μοντέλο LSTM αξιοποιεί με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της αναπτυξιακής πορείας της χώρας, προσαρμόζοντας την καμπύλη πρόβλεψης σε συνθήκες ώριμης αγοράς.



Σχήμα 5-6: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στην Ολλανδία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Η χρονοσειρά των ιστορικών δεδομένων εκτείνεται από το 2014 έως το 2024, ενώ η πρόβλεψη καλύπτει την περίοδο 2025–2030.

Πολωνία

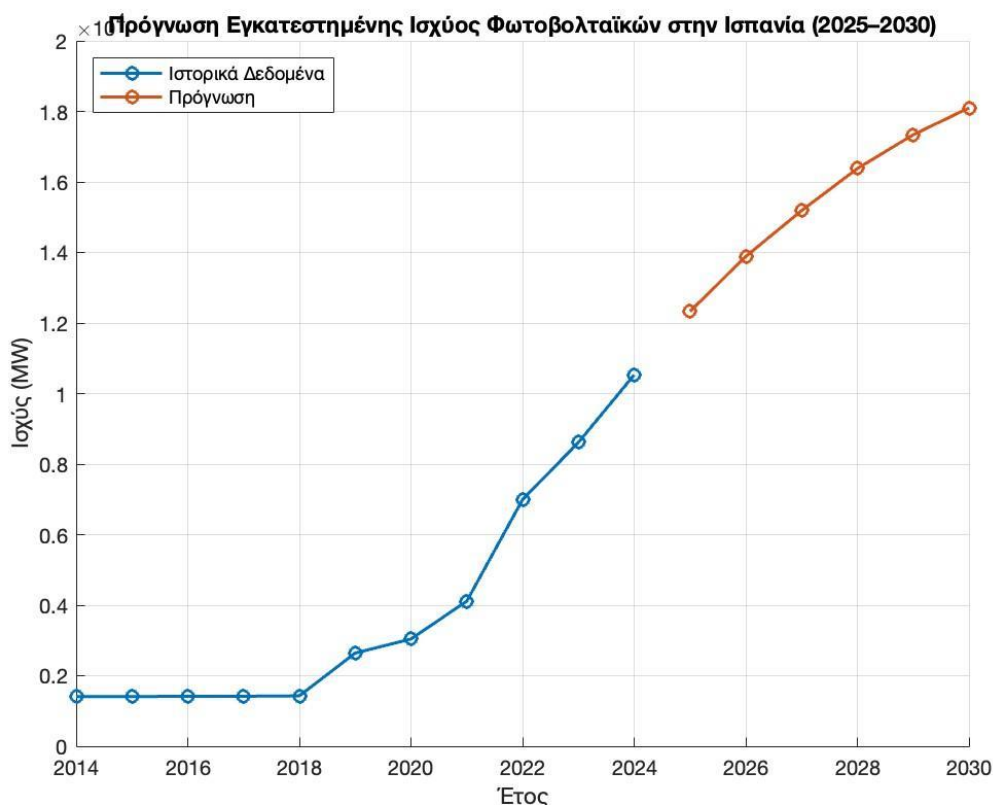
Το γράφημα στο Σχήμα 5-7 αποτυπώνει τη ραγδαία ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής ισχύος στην Πολωνία, η οποία ξεκίνησε ουσιαστικά μετά το 2019. Το LSTM δίκτυο κατέγραψε με ακρίβεια την απότομη επιτάχυνση των τελευταίων ετών, αποδίδοντάς την σε κυβερνητικά προγράμματα ενίσχυσης της αυτοπαραγωγής, όπως το “Mój Prąd”, καθώς και στην πτώση του κόστους των οικιακών εγκαταστάσεων. Η πρόβλεψη υποδεικνύει ότι η συνολική ισχύς μπορεί να ξεπεράσει τα 4,3 εκατ. kW το 2030, με έμφαση στις εγκαταστάσεις σε στέγες. Το μοντέλο ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στην εκθετική φάση της αγοράς, υποδεικνύοντας την αναμενόμενη συνέχιση της δυναμικής επέκτασης υπό την προϋπόθεση διατήρησης των πολιτικών κινήτρων.



Σχήμα 5-7: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στην Πολωνία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Η πρόβλεψη βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα για τα έτη 2014–2024 και προεκτείνεται έως το 2030.

Ισπανία

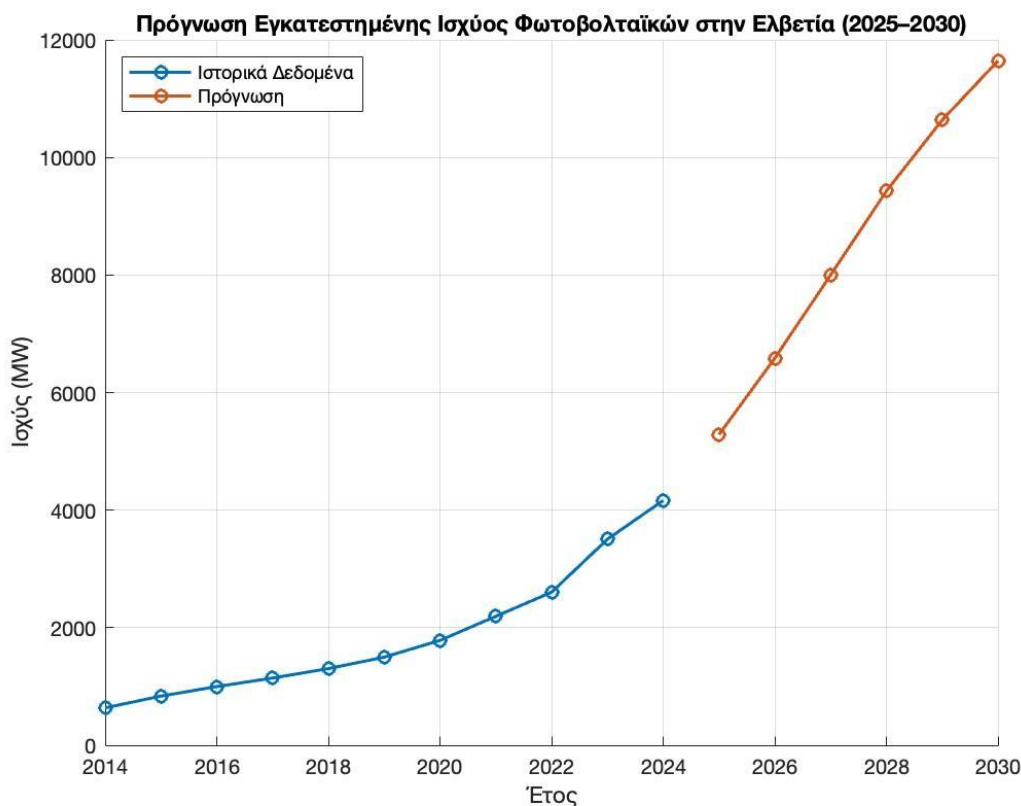
Η καμπύλη της Ισπανίας καταδεικνύει μια καθαρή φάση ανάπτυξης, με έντονη ανοδική πορεία κυρίως από το 2020 και μετά. Η κατάργηση του “sun tax” και οι μεταρρυθμίσεις υπέρ της αυτοπαραγωγής με net metering συνέβαλαν στην ταχεία αύξηση των φωτοβολταϊκών σε στέγες. Το LSTM δίκτυο, εκπαιδευμένο στα ιστορικά δεδομένα, αποτυπώνει αυτή τη μετάβαση και προβλέπει συνεχιζόμενη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος με ηπιότερο ρυθμό σε σχέση με χώρες όπως η Πολωνία. Η πρόβλεψη υποδηλώνει σταθερή ενίσχυση της αγοράς, σε συμφωνία με την πολιτική στόχευση για ενίσχυση της αποκεντρωμένης παραγωγής.



Σχήμα 5-8: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στην Ισπανία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Η ανάλυση βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα (2014–2024) και προβλέπει τη μελλοντική τάση εγκαταστάσεων έως το 2030.

Ελβετία

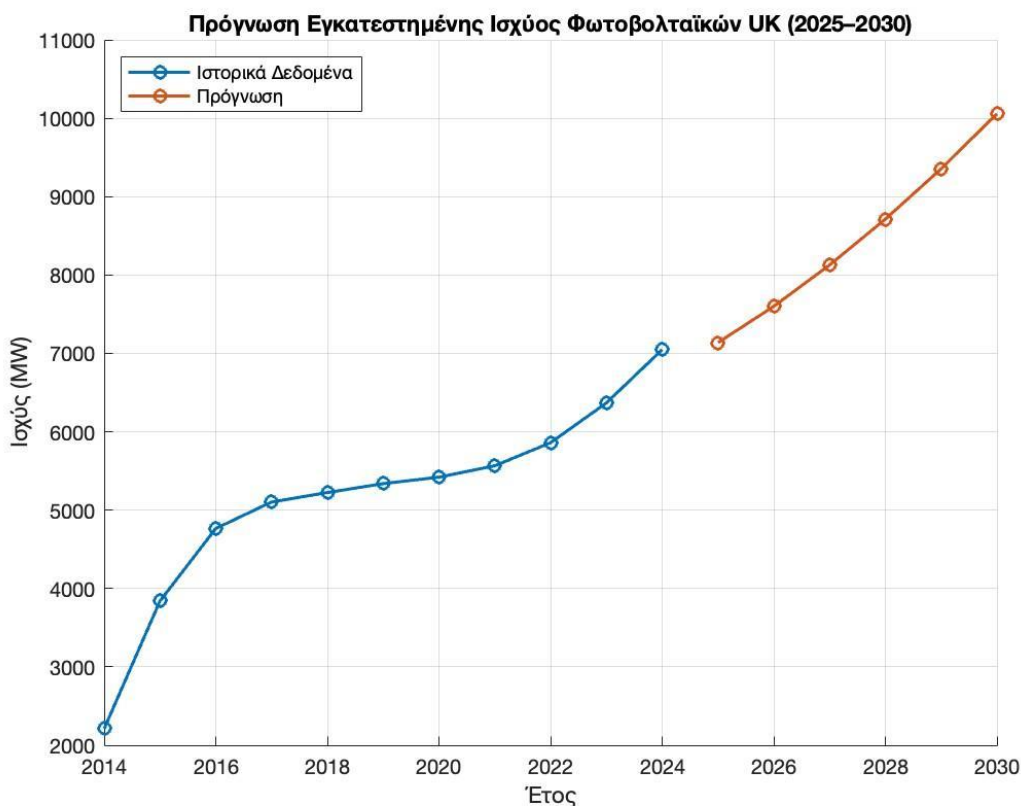
Η καμπύλη της Ελβετίας παρουσιάζει αρχικά ήπια αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος μέχρι το 2020, ακολουθούμενη από μία πιο έντονη ανόρθωση από το 2021 και έπειτα. Αυτό σχετίζεται με τις πρόσφατες εθνικές πολιτικές ενίσχυσης της αυτοπαραγωγής και της αποκεντρωμένης ενεργειακής παραγωγής. Η πρόβλεψη του LSTM υποδεικνύει σταθερή ανάπτυξη για την περίοδο 2025–2030, με την ισχύ να υπερδιπλασιάζεται. Η χρήση του LSTM επιτρέπει την αποτύπωση των χρονικών εξαρτήσεων, ενσωματώνοντας τη σταδιακή πολιτική και τεχνολογική ώθηση στην αγορά. Η ήπια αλλά συνεχής αύξηση αντανακλά και τη χωροταξική πραγματικότητα της Ελβετίας, όπου η διαθεσιμότητα κατάλληλων επιφανειών αποτελεί πρόκληση.



Σχήμα 5-9: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στην Ελβετία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Στην καμπύλη απεικονίζονται τα ιστορικά δεδομένα (2014–2024) και η προβλεπόμενη εξέλιξη για τα επόμενα έτη.

Ηνωμένο Βασίλειο

Η καμπύλη του Ηνωμένου Βασιλείου δείχνει αρχικά μία φάση κορεσμού μεταξύ 2018 και 2021, αντανακλώντας τη σχετική αδράνεια της αγοράς μετά την παύση των επιδοτήσεων τύπου Feed-in Tariff. Ωστόσο, μετά το 2021 διαφαίνεται εκ νέου τάση ανάκαμψης, με αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, γεγονός που αποδίδεται σε νέα προγράμματα όπως το “rooftop revolution” και τις προτεραιότητες του Net Zero Strategy. Η πρόβλεψη του LSTM αποτυπώνει αυτή τη δυναμική, με συνεχή αύξηση έως το 2030, αντανακλώνοντας την ενίσχυση της αυτοκατανάλωσης, την πώση του κόστους εγκατάστασης και τη βελτίωση των τεχνολογιών αποθήκευσης. Η προβλεπόμενη τάση καταγράφει μέτρια αλλά σταθερή ανάπτυξη, υποδηλώνοντας ένα πιο ώριμο και σταθερό πλαίσιο πολιτικής.



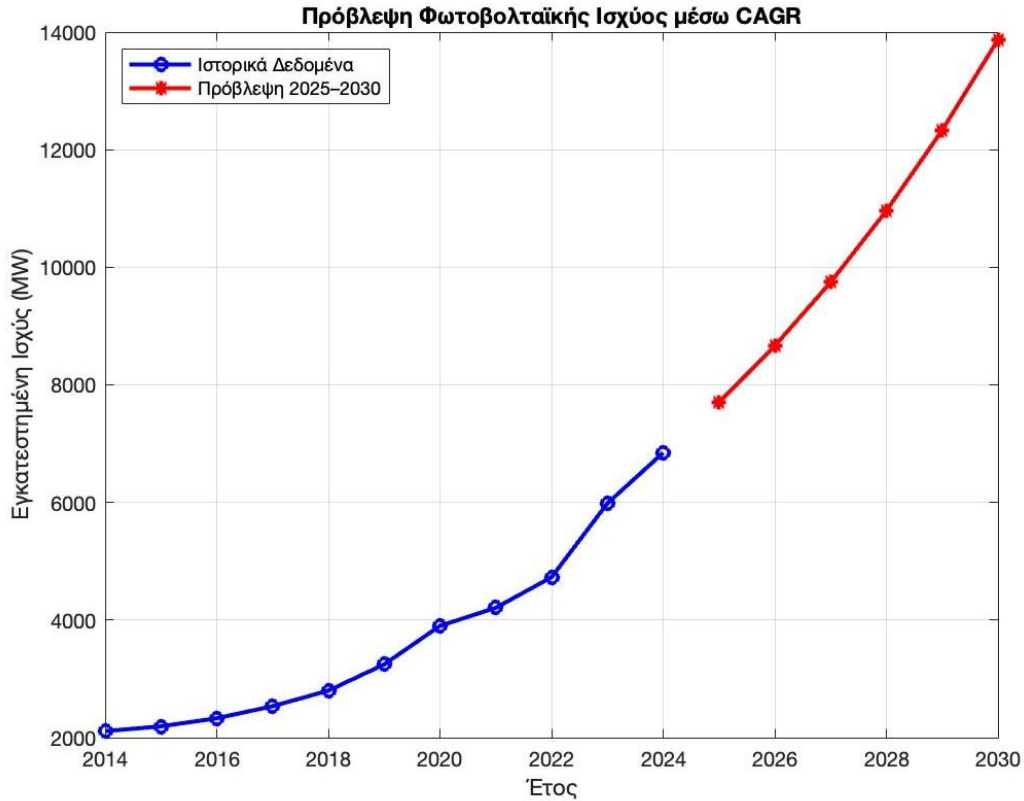
Σχήμα 5-10: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στο Ηνωμένο Βασίλειο (UK) για την περίοδο 2025–2030, με χρήση Νευρωνικού Δικτύου τύπου LSTM. Η γραμμή με μπλε δείχνει τα ιστορικά δεδομένα, ενώ η γραμμή με πορτοκαλί χρώμα απεικονίζει τις προβλέψεις του μοντέλου.

5.2 Πρόβλεψη με Growth Model

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πρόβλεψης της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών σε στέγες με τη χρήση Μαθηματικών Μοντέλων Ανάπτυξης (Growth Models), όπως το εκθετικό και το λογιστικό μοντέλο. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε απλοποιημένες παραδοχές για τη μορφή της καμπύλης ανάπτυξης και χρησιμοποιούν τα ιστορικά δεδομένα για να προσεγγίσουν τη μελλοντική εξέλιξη του φαινομένου. Αν και δεν λαμβάνουν υπόψη πολύπλοκους κοινωνικοοικονομικούς ή τεχνολογικούς παράγοντες, προσφέρουν μια ερμηνεύσιμη και συχνά επαρκώς ακριβή προσέγγιση, ιδίως σε περιβάλλοντα με σταθερές τάσεις. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ χρησιμεύουν ως συγκριτικό υπόβαθρο για τις προβλέψεις που παράγονται από τα Νευρωνικά Δίκτυα LSTM. Η σύγκριση των δύο μεθόδων γίνεται στο υποκεφάλαιο 5.3.

Βέλγιο

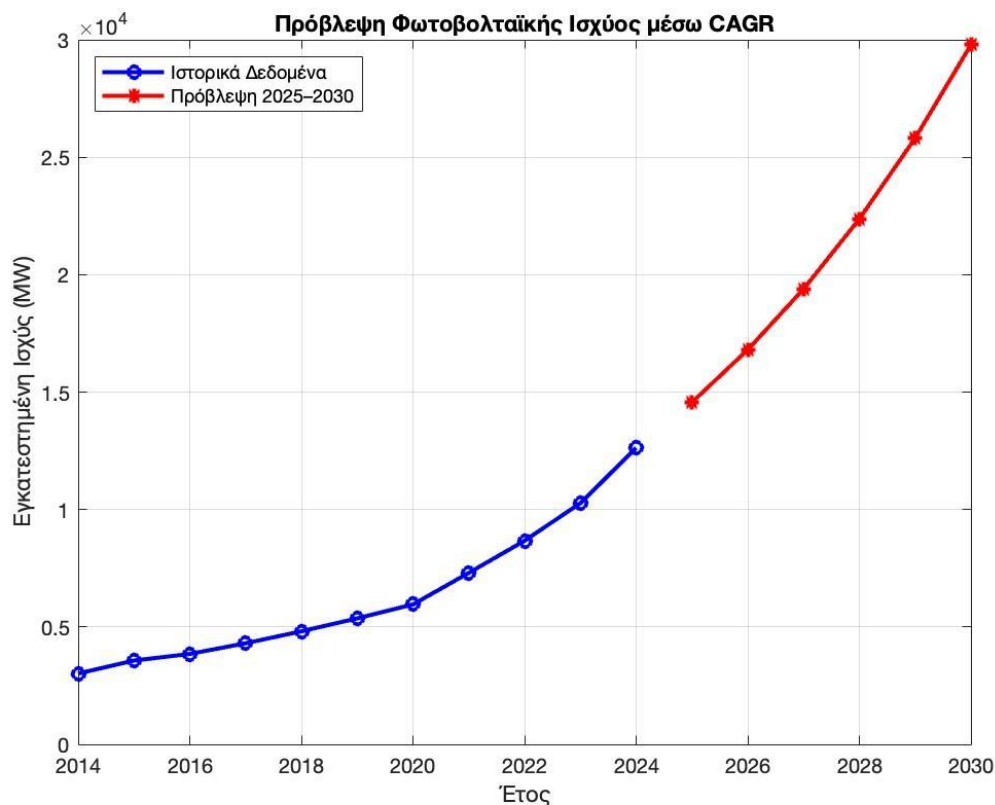
Το Σχήμα 5-11 απεικονίζει την πρόβλεψη της μελλοντικής εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στο Βέλγιο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο CAGR (Compound Annual Growth Rate). Με βάση την παρατηρούμενη σταθερή και επιταχυνόμενη ανοδική τάση της περιόδου 2014–2024, υπολογίστηκε ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης, ο οποίος εφαρμόστηκε για την εξαγωγή των προβλέψεων έως το 2030. Η καμπύλη πρόβλεψης ακολουθεί εκθετική μορφή, υποδεικνύοντας την πιθανότητα συνέχισης της αναπτυξιακής δυναμικής, υπό την παραδοχή σταθερών εξωτερικών παραγόντων και πολιτικών. Το μοντέλο αυτό προσφέρει μια απλή αλλά ερμηνεύσιμη προσέγγιση στην κατανόηση της μελλοντικής διείσδυσης, αν και δεν ενσωματώνει εξωτερικές μεταβλητές, όπως πολιτικές αλλαγές ή τεχνολογικές εξελίξεις.



Σχήμα 5-11: Πρόβλεψη Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταϊκών στο Βέλγιο για την περίοδο 2025–2030, μέσω της μεθόδου μέσου ετήσιου ρυθμού ανάπτυξης (CAGR). Τα μπλε σημεία αντιστοιχούν στα ιστορικά δεδομένα 2014–2024, ενώ τα κόκκινα στη χρονική πρόβλεψη 2025–2030.

Γαλλία

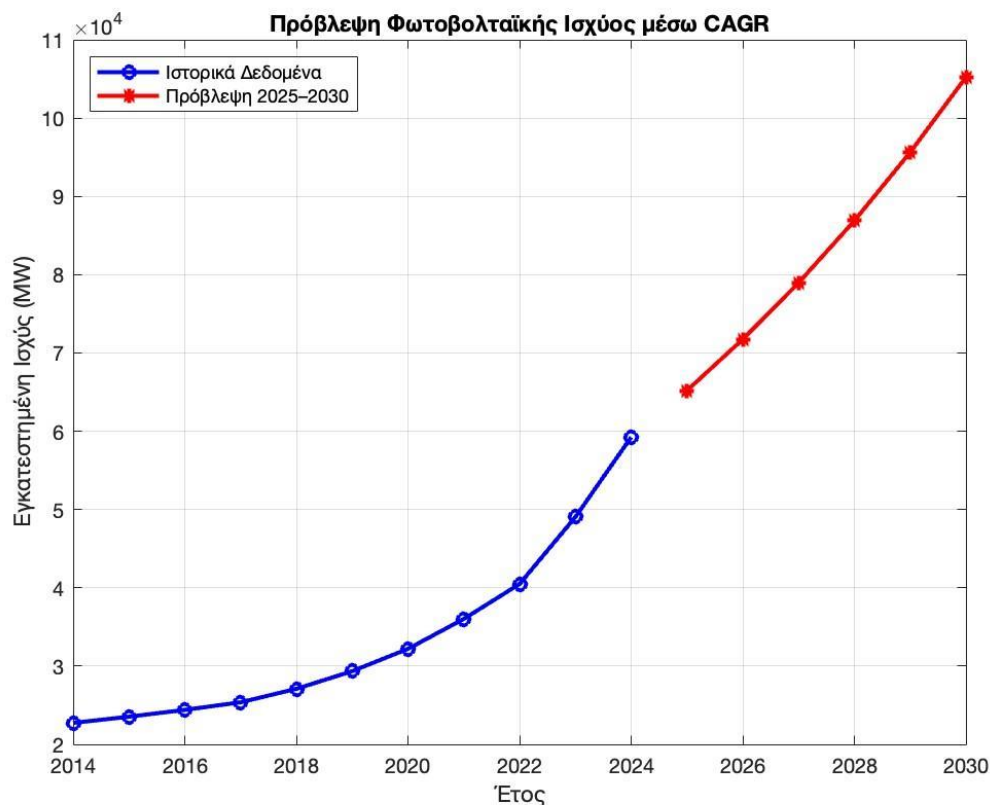
Η πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στη Γαλλία μέσω του μοντέλου CAGR παρουσιάζει μια σταθερή εκθετική πορεία αύξησης κατά την περίοδο 2025–2030. Η καμπύλη ακολουθεί τη δυναμική των προηγούμενων ετών, επιβεβαιώνοντας την τάση επιτάχυνσης της ηλιακής ανάπτυξης στη χώρα. Το μοντέλο, βασισμένο αποκλειστικά στον ιστορικό ρυθμό μεταβολής, υποθέτει ότι οι συνθήκες ανάπτυξης (πολιτικές, τεχνολογικές, οικονομικές) θα παραμείνουν σταθερές, προσφέροντας μια συνεπή και εύκολα ερμηνεύσιμη εκτίμηση. Παρότι αγνοεί εξωγενείς παράγοντες, χρησιμεύει ως χρήσιμο εργαλείο βάσης για συγκριτικούς σκοπούς με πιο πολύπλοκα μοντέλα πρόβλεψης όπως τα LSTM.



Σχήμα 5-12: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στη Γαλλία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση του μοντέλου εκθετικής ανάπτυξης (CAGR). Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά τις εκτιμήσεις για τα επόμενα έτη βάσει του μέσου ετήσιου ρυθμού αύξησης που προέκυψε από τα ιστορικά δεδομένα (2014–2024), τα οποία παρουσιάζονται με μπλε γραμμή.

Γερμανία

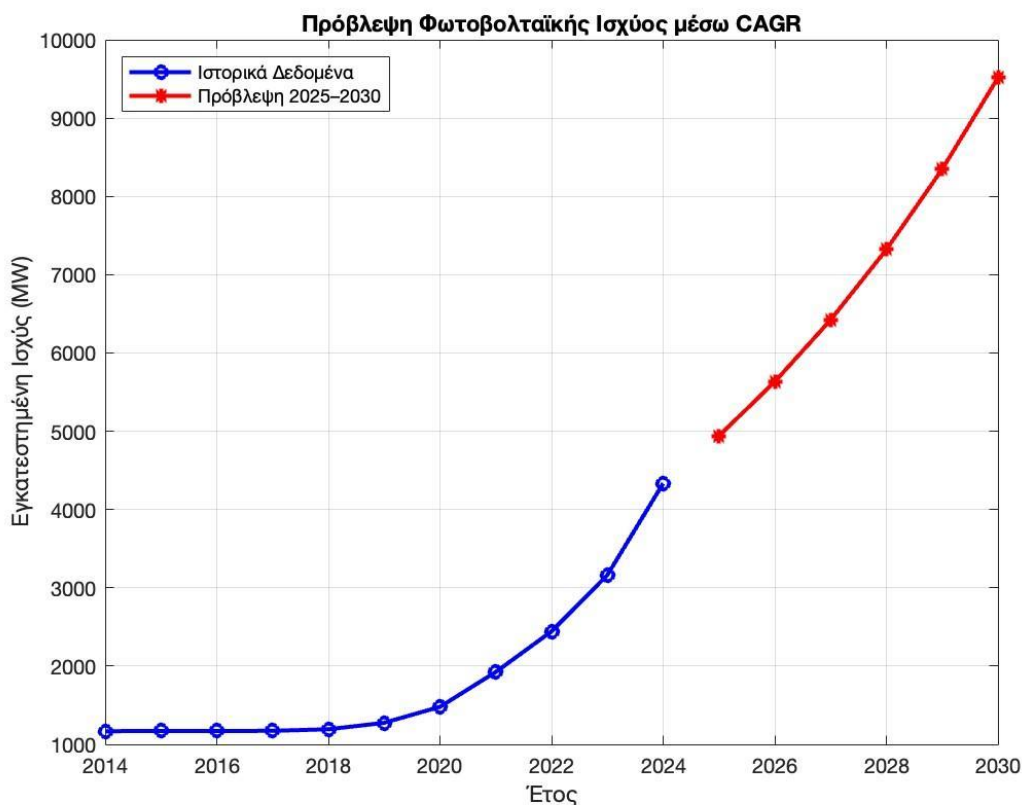
Η Γερμανία, ως πρωτοπόρος στην ηλιακή ενέργεια, παρουσιάζει μια ισχυρή ανοδική τάση στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών. Η προβολή με βάση το CAGR (Compound Annual Growth Rate) δείχνει μια συνεχιζόμενη επιτάχυνση στην ανάπτυξη κατά την περίοδο 2025–2030, αντανακλώντας τις συνεχιζόμενες πολιτικές στήριξης, τις τεχνολογικές καινοτομίες και την αυξανόμενη κοινωνική αποδοχή. Το μοντέλο CAGR, παρότι δεν λαμβάνει υπόψη εξωγενείς παράγοντες ή μεταβλητές, επαρκεί για να δώσει μια γενική εικόνα της αναμενόμενης εξέλιξης, καθιστώντας το χρήσιμο σημείο αναφοράς έναντι πιο σύνθετων μοντέλων, όπως τα LSTM.



Σχήμα 5-13: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στη Γερμανία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση του μοντέλου μέσου ετήσιου ρυθμού αύξησης (CAGR). Τα ιστορικά δεδομένα παρουσιάζονται με μπλε γραμμή, ενώ οι προβλέψεις εμφανίζονται με κόκκινη γραμμή.

Ελλάδα

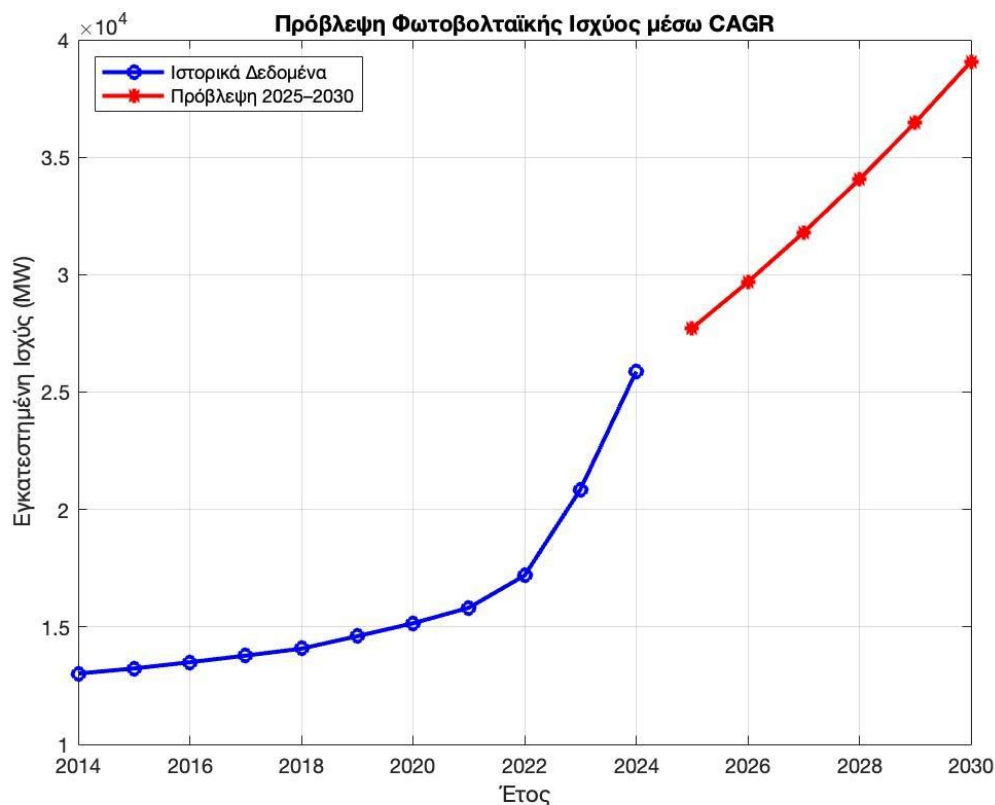
Η Ελλάδα εμφανίζει έντονα αυξητική τάση στην ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, ειδικά την τελευταία τετραετία. Η πρόβλεψη με βάση το μοντέλο CAGR υποδεικνύει σταθερή επιτάχυνση της εγκατεστημένης ισχύος κατά την περίοδο 2025–2030, αντανakλώντας τη θεσμική ενίσχυση, την ώθηση των συστημάτων αυτοπαραγωγής και την πτώση του κόστους εγκατάστασης. Αν και το μοντέλο δεν ενσωματώνει ρητά τις επιδράσεις πολιτικών ή κοινωνικών μεταβλητών, αποτυπώνει ικανοποιητικά την αναμενόμενη δυναμική του κλάδου, αποτελώντας εργαλείο σύγκρισης με πιο προηγμένες μεθόδους, όπως τα LSTM.



Σχήμα 5-14: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα για την περίοδο 2025–2030, με χρήση του μοντέλου CAGR (Compound Annual Growth Rate). Τα ιστορικά δεδομένα απεικονίζονται με μπλε γραμμή, ενώ οι προβλέψεις με κόκκινη.

Ιταλία

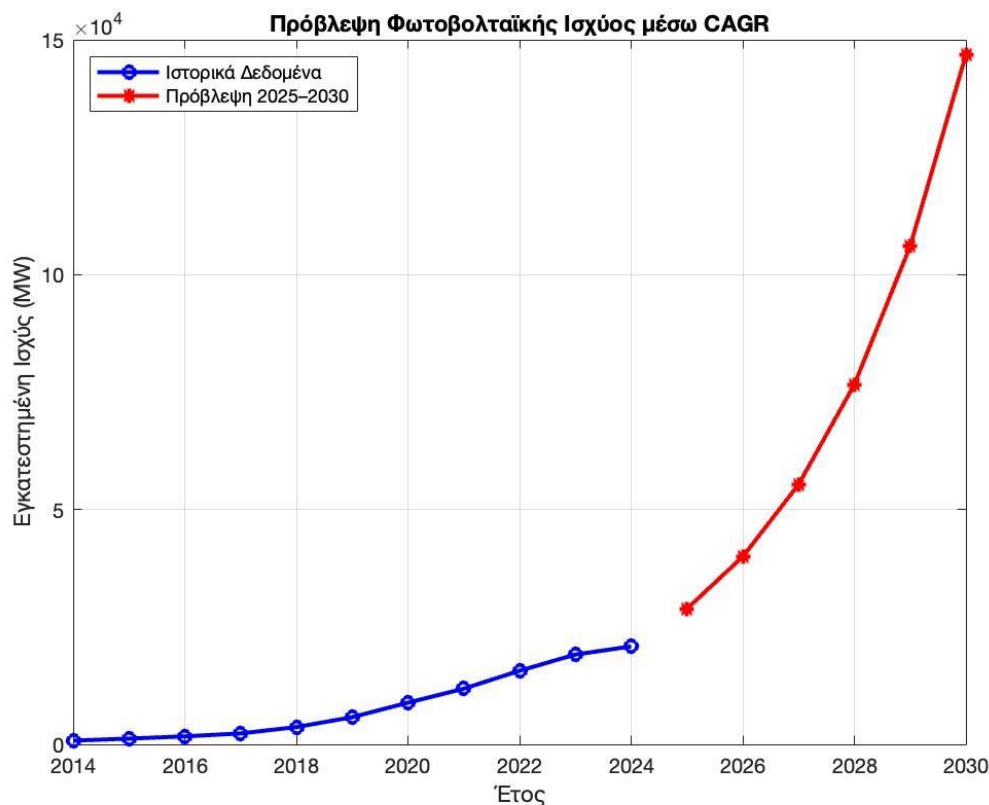
Η Ιταλία παρουσιάζει μια σταθερή και σταδιακά επιταχυνόμενη αύξηση στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, με τις πολιτικές αυτοπαραγωγής και επιδοτήσεων να ενισχύουν την αγορά. Η καμπύλη που προκύπτει από το μοντέλο CAGR υποδεικνύει μια σταθερή μελλοντική ανάπτυξη, η οποία, παρόλο που βασίζεται σε μέση ετήσια αύξηση και όχι σε δυναμικά χαρακτηριστικά, συμβαδίζει με τις παρατηρούμενες τάσεις. Η πρόβλεψη αυτή μπορεί να αποτελέσει ρεαλιστική προσέγγιση για τις μελλοντικές ανάγκες σχεδιασμού και ενεργειακής πολιτικής, ειδικά σε περιοχές με παγιωμένο ρυθμό εγκαταστάσεων.



Σχήμα 5-15: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην Ιταλία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση του μοντέλου CAGR (Compound Annual Growth Rate). Τα ιστορικά δεδομένα (2014–2024) απεικονίζονται με μπλε γραμμή, ενώ οι προβλέψεις με κόκκινο.

Ολλανδία

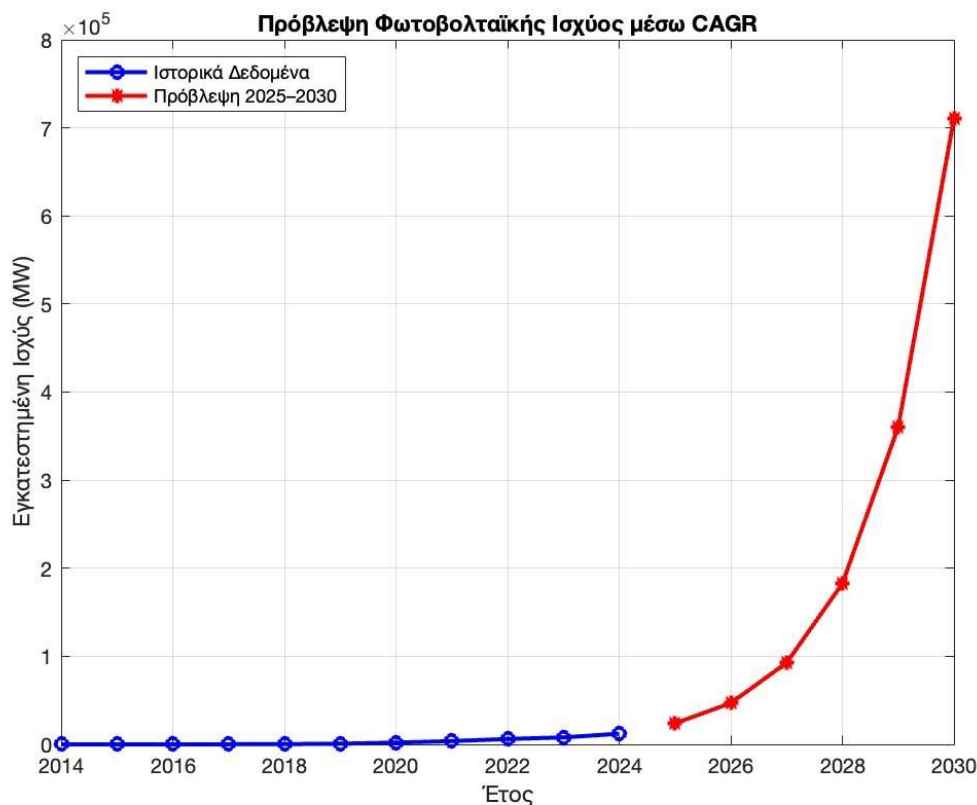
Η Ολλανδία παρουσιάζει έντονη και διαρκώς αυξανόμενη ανάπτυξη στον τομέα των φωτοβολταϊκών, κυρίως λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου και της ευνοϊκής πολιτικής για εγκαταστάσεις σε στέγες. Το μοντέλο CAGR προβλέπει ταχεία επιτάχυνση στην εγκατεστημένη ισχύ μέχρι το 2030, γεγονός που αντανακλά τόσο την ώριμη αγορά όσο και τις αυξανόμενες δημόσιες και ιδιωτικές επενδύσεις στον τομέα. Η εκθετική μορφή της προβλεπόμενης καμπύλης ενισχύει την εικόνα μιας χώρας με ισχυρή αναπτυξιακή δυναμική στον τομέα των αποκεντρωμένων ΑΠΕ.



Σχήμα 5-16: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην Ολλανδία για την περίοδο 2025–2030, με χρήση του μοντέλου CAGR (Compound Annual Growth Rate). Τα ιστορικά δεδομένα (2014–2024) αποτυπώνονται με μπλε γραμμή, ενώ οι προβλεπόμενες τιμές με κόκκινη.

Πολωνία

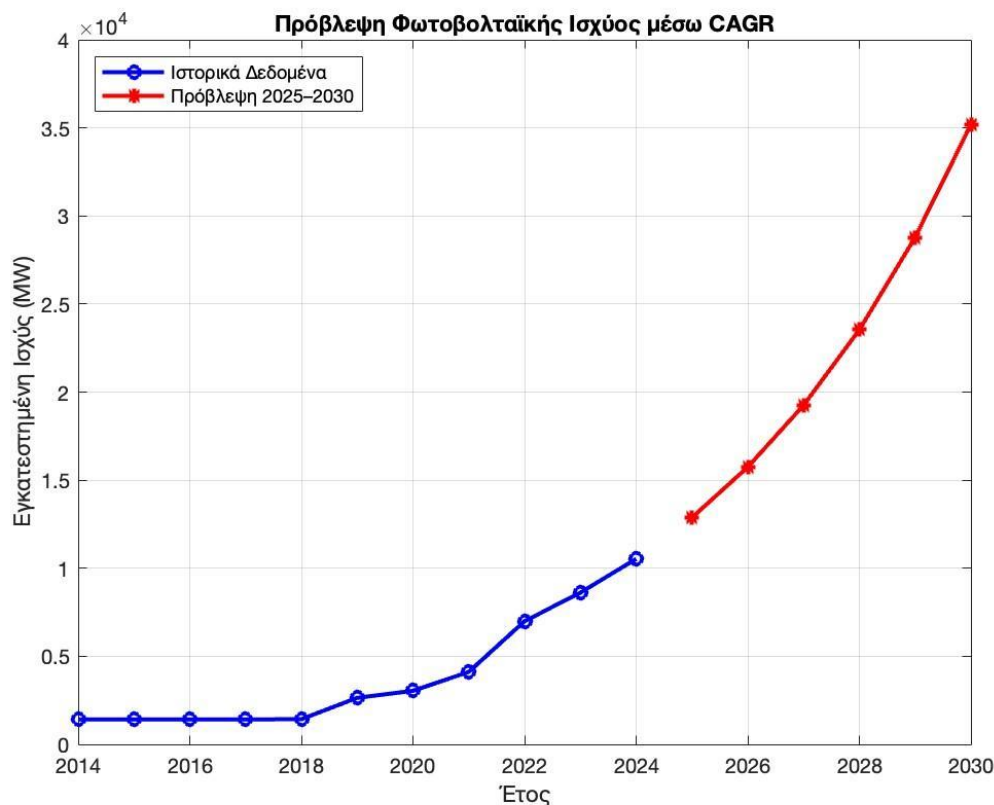
Η καμπύλη για την Πολωνία παρουσιάζει εξαιρετικά έντονη εκθετική αύξηση στην προβλεπόμενη ισχύ μετά το 2025. Αυτή η πρόβλεψη αντανακλά τον δυναμικό χαρακτήρα της πολωνικής αγοράς φωτοβολταϊκών, η οποία τα τελευταία έτη υποστηρίζεται από ισχυρά προγράμματα επιδότησης και net metering. Παρ' όλα αυτά, η πολύ απότομη αύξηση που προκύπτει από το μοντέλο CAGR εγείρει ερωτήματα αξιοπιστίας και ενδεχόμενης υπερεκτίμησης, καθώς δεν ενσωματώνει εξωτερικούς περιοριστικούς παράγοντες όπως πολιτικές αλλαγές, κορεσμούς στο δίκτυο ή εμπόδια στην εγκατάσταση. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα πρέπει να αξιολογηθούν με προσοχή, κυρίως συγκριτικά με πιο ευέλικτα ή δυναμικά μοντέλα, όπως τα LSTM.



Σχήμα 5-17: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην Πολωνία για την περίοδο 2025–2030 με χρήση του μοντέλου CAGR (Compound Annual Growth Rate). Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στα ιστορικά δεδομένα (2014–2024), ενώ η κόκκινη αποτυπώνει τις εκτιμώμενες τιμές.

Ισπανία

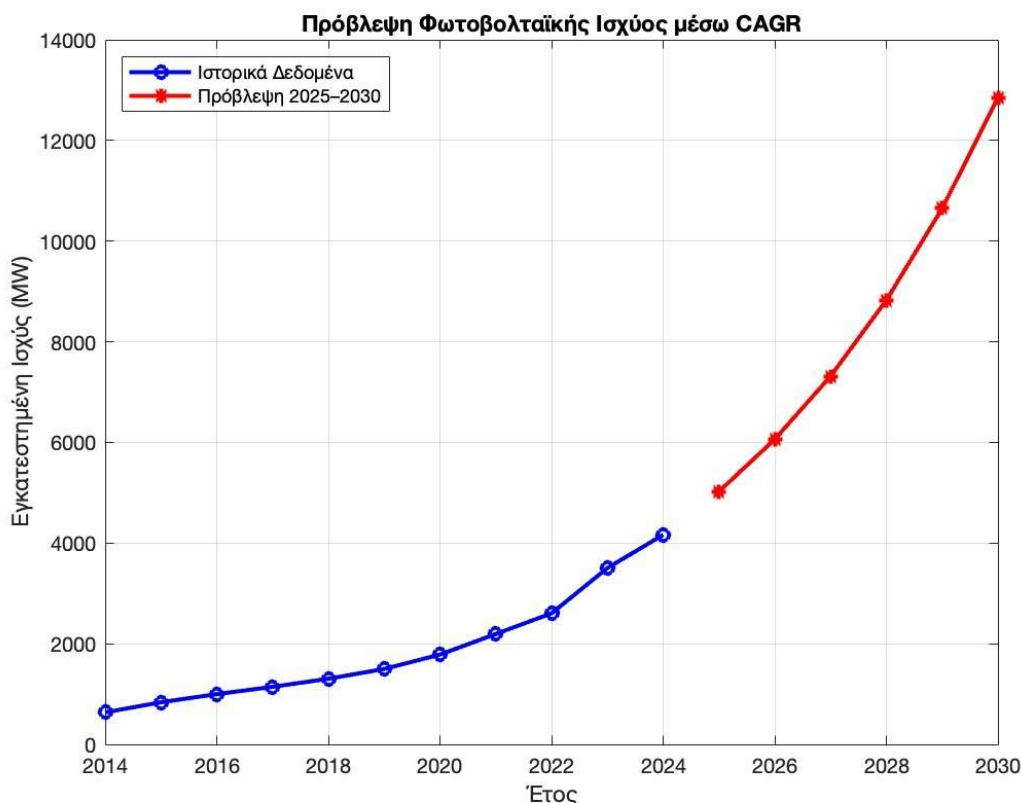
Η καμπύλη ανάπτυξης της Ισπανίας παρουσιάζει σταθερή αύξηση στην εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ, η οποία επιταχύνεται στην προβλεπόμενη περίοδο 2025–2030. Η χρήση του μοντέλου CAGR (Compound Annual Growth Rate) καταδεικνύει έναν ρυθμό ανάπτυξης που αντικατοπτρίζει την άρση πολιτικών εμποδίων (όπως ο “sun tax”) και τη σταδιακή ενίσχυση των μέτρων υπέρ της αυτοκατανάλωσης. Παρότι το CAGR δίνει μια σαφή εικόνα της γενικής τάσης, δεν λαμβάνει υπόψη δυναμικές μεταβλητές (τεχνολογική πρόοδος, ρυθμιστικές αλλαγές κ.λπ.), κάτι που το καθιστά μερικώς περιορισμένο σε σχέση με πιο ευέλικτες προσεγγίσεις όπως τα LSTM. Παρ’ όλα αυτά, η προβλεπόμενη τάση είναι ρεαλιστική και συνεπής με την πολιτική ατζέντα της Ισπανίας για την ενίσχυση των ΑΠΕ.



Σχήμα 5-18: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην Ισπανία για την περίοδο 2025–2030 με χρήση του μοντέλου CAGR. Η μπλε γραμμή απεικονίζει τα ιστορικά δεδομένα (2014–2024), ενώ η κόκκινη τις εκτιμήσεις για τα επόμενα έτη.

Ελβετία

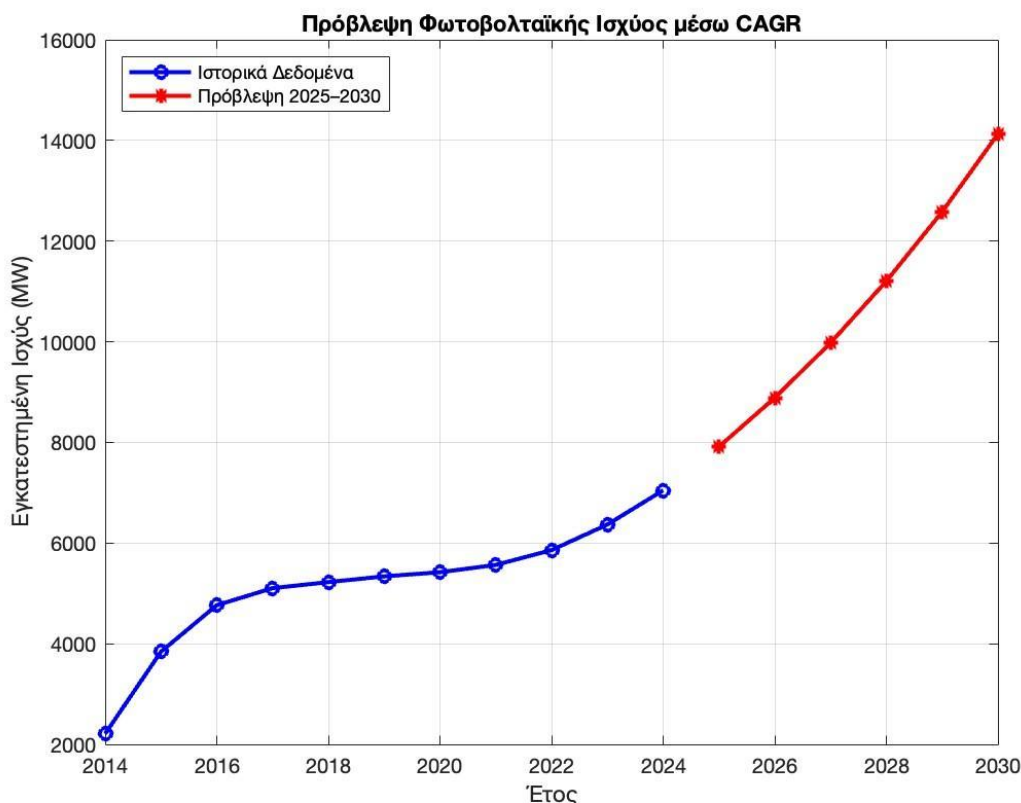
Το διάγραμμα αποτυπώνει τη σταδιακή αλλά σταθερή αύξηση της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος στην Ελβετία κατά την περίοδο 2014–2024, ακολουθούμενη από επιταχυνόμενη ανάπτυξη την περίοδο πρόβλεψης 2025–2030. Η πρόβλεψη βασίζεται στον μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης (CAGR) και αντανακλά τη συνεπή υποστήριξη της χώρας προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδίως στο πλαίσιο αποκεντρωμένων λύσεων όπως τα συστήματα στέγης. Αν και η προσέγγιση δεν λαμβάνει υπόψη σύνθετες παραμέτρους (πολιτικές μεταβολές, τεχνολογικές καινοτομίες κ.λπ.), αποδίδει ρεαλιστικά την τάση, ειδικά σε ένα σταθερό πολιτικοοικονομικό περιβάλλον όπως της Ελβετίας.



Σχήμα 5-19: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος στην Ελβετία για την περίοδο 2025–2030 μέσω του μοντέλου CAGR. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει τα ιστορικά δεδομένα, ενώ η κόκκινη γραμμή την εκτίμηση μελλοντικής ανάπτυξης.

Ηνωμένο Βασίλειο

Το Σχήμα 5-20 απεικονίζει την ιστορική και προβλεπόμενη εξέλιξη της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος στο Ηνωμένο Βασίλειο. Μετά από μια περίοδο σχετικής στασιμότητας μεταξύ 2016 και 2022, η τάση παρουσιάζει επιτάχυνση από το 2023 και μετά. Η πρόβλεψη με βάση το μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης (CAGR) δείχνει μια ισχυρή αναπτυξιακή δυναμική μέχρι το 2030, φτάνοντας περίπου τα 14 GW. Αυτό συνάδει με τις κυβερνητικές επιδιώξεις για ενίσχυση της αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας και τις πρωτοβουλίες όπως η «rooftop revolution». Αν και το μοντέλο CAGR δεν ενσωματώνει πολιτικούς ή τεχνολογικούς παράγοντες, προσφέρει μια σαφή εικόνα των μακροχρόνιων τάσεων της αγοράς.



Σχήμα 5-20: Πρόβλεψη της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος στο Ηνωμένο Βασίλειο για την περίοδο 2025–2030 μέσω του μοντέλου CAGR. Η μπλε γραμμή δείχνει τα ιστορικά δεδομένα, ενώ η κόκκινη γραμμή την εκτίμηση μελλοντικής ανάπτυξης.

5.3 Σύγκριση Μεθόδων

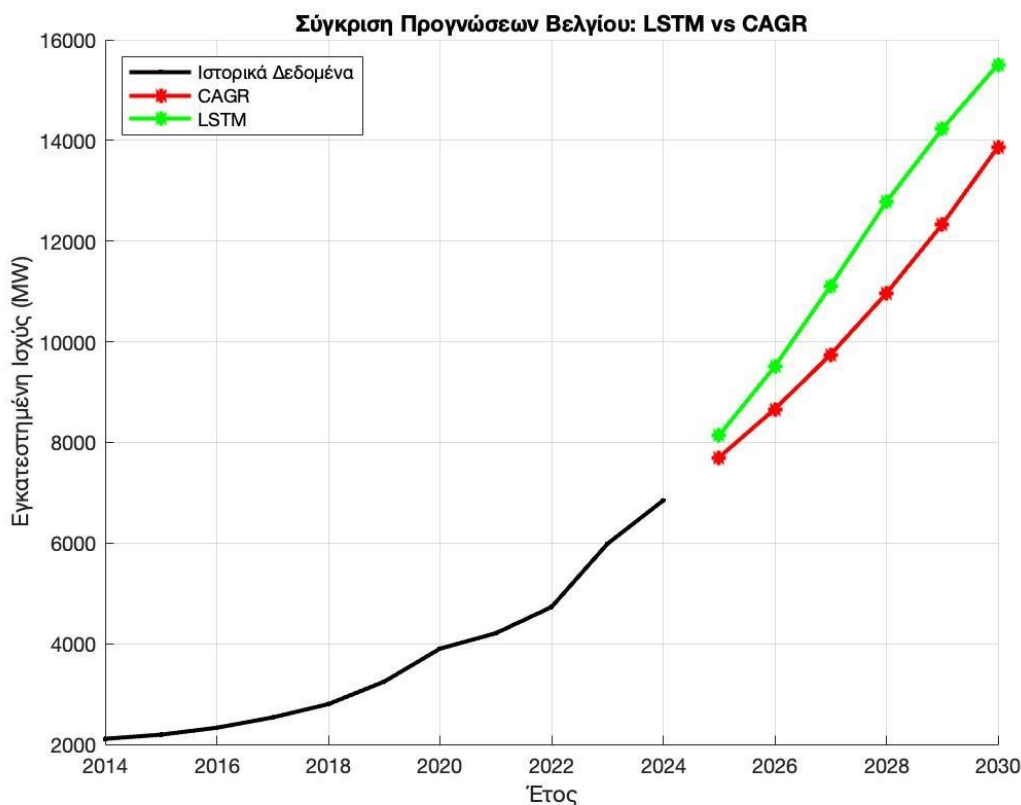
Σε αυτή την ενότητα επιχειρείται η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο μεθοδολογικές προσεγγίσεις πρόβλεψης: τα Νευρωνικά Δίκτυα τύπου LSTM και το Μαθηματικό Μοντέλο Ανάπτυξης μέσω CAGR (Compound Annual Growth Rate). Ο στόχος είναι να αναδειχθούν οι διαφορές στην εκτιμώμενη πορεία της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος ανά χώρα, αλλά και να αξιολογηθεί η συμπεριφορά κάθε μεθόδου ως προς την ευαισθησία, την ακρίβεια και τη ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων. Για όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν ισχύει η ίδια οπτική κωδικοποίηση:

- Η **μαύρη γραμμή** αντιστοιχεί στα ιστορικά δεδομένα εγκατεστημένης ισχύος,
- Η **κόκκινη γραμμή** απεικονίζει την πρόβλεψη βάσει CAGR,
- Η **πράσινη γραμμή** παρουσιάζει την πρόβλεψη με τη χρήση LSTM.

Μέσα από τη σύγκριση αυτή μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των μεθόδων, τις αποκλίσεις στις τιμές πρόβλεψης και τη χρησιμότητα της καθεμιάς σε διαφορετικά πλαίσια εφαρμογής.

Βέλγιο

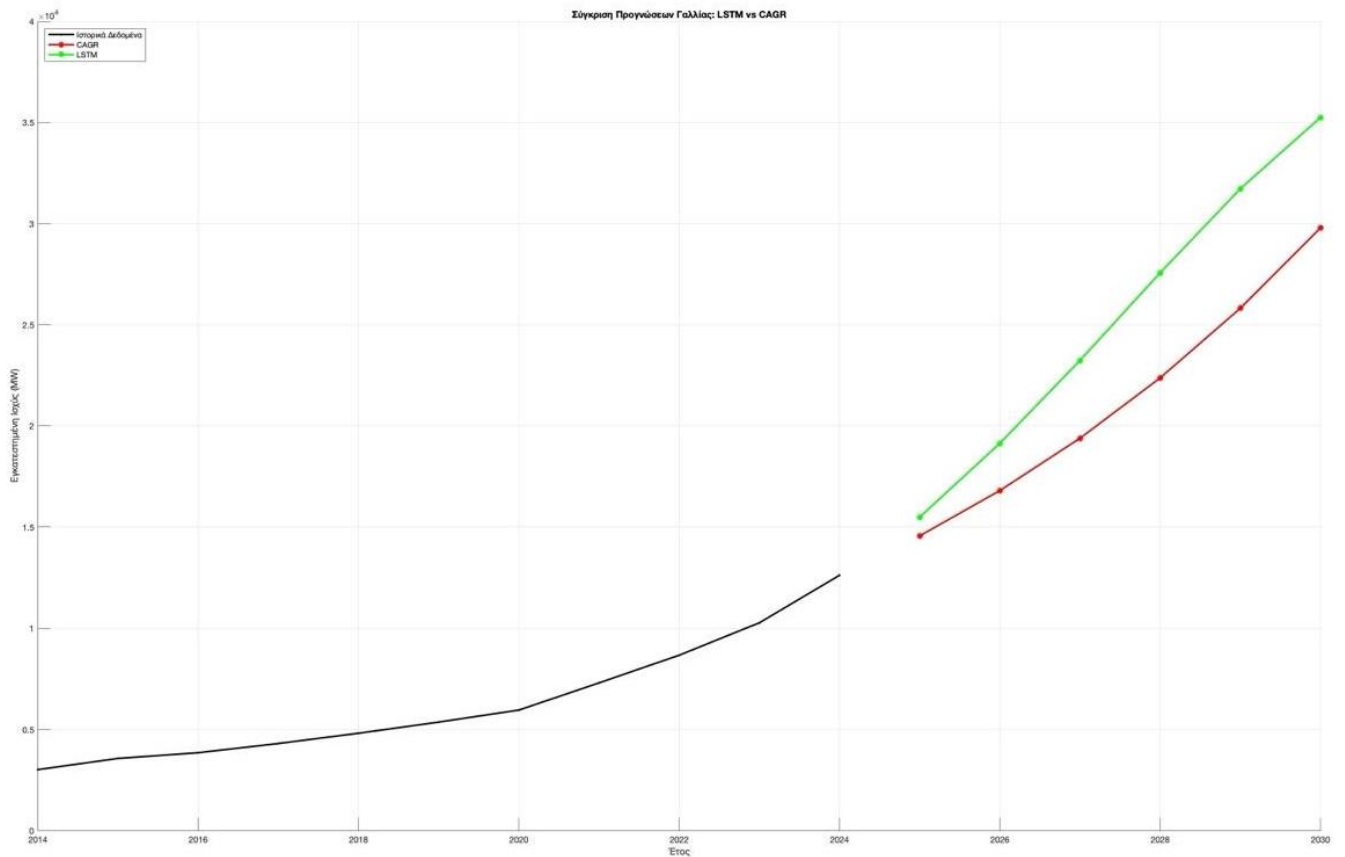
Στη Γαλλία, οι προβλέψεις του μοντέλου LSTM εμφανίζουν μια πιο επιταχυνόμενη πορεία ανάπτυξης συγκριτικά με το CAGR, ιδιαίτερα μετά το 2027. Η διαφοροποίηση αυτή αντικατοπτρίζει την προσδοκώμενη ενίσχυση των πολιτικών υπέρ της αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας και τη σταδιακή άρση των γραφειοκρατικών εμποδίων. Το LSTM φαίνεται να "συλλαμβάνει" αυτή την αναμενόμενη ώθηση πιο ρεαλιστικά, σε αντίθεση με το CAGR που προεκτείνει τη μεσοπρόθεσμη δυναμική με γραμμικό σχεδόν ρυθμό. Αν και οι δύο καμπύλες συγκλίνουν αρχικά, το LSTM τείνει να καταγράφει μεγαλύτερη τελική ισχύ, υποδηλώνοντας ότι το πλαίσιο αυτοκατανάλωσης και οι τοπικές πρωτοβουλίες πιθανώς να επιταχύνουν την υιοθέτηση μετά το 2027.



Σχήμα 5-21: Σύγκριση προγνώσεων φωτοβολταϊκής ισχύος στο Βέλγιο με LSTM και CAGR (2025–2030).

Γαλλία

Στο Σχήμα 5-22 αποτυπώνεται η διαφορά στην πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στη Γαλλία μεταξύ των δύο μεθόδων. Η πρόβλεψη με LSTM παρουσιάζει σαφώς μεγαλύτερη αύξηση σε σχέση με το CAGR, αντανακλώντας την επιταχυνόμενη δυναμική της γαλλικής αγοράς λόγω νέων πολιτικών ενίσχυσης αυτοκατανάλωσης και αυξημένων επενδύσεων σε στέγες. Αντίθετα, η καμπύλη CAGR διατηρεί μια πιο γραμμική και σταδιακή ανοδική πορεία. Η απόκλιση μεταξύ των μοντέλων διευρύνεται προς το τέλος της περιόδου, κάτι που καταδεικνύει την ικανότητα του LSTM να συλλαμβάνει τάσεις που σχετίζονται με μεταβολές πολιτικής και τεχνολογικής υιοθέτησης.



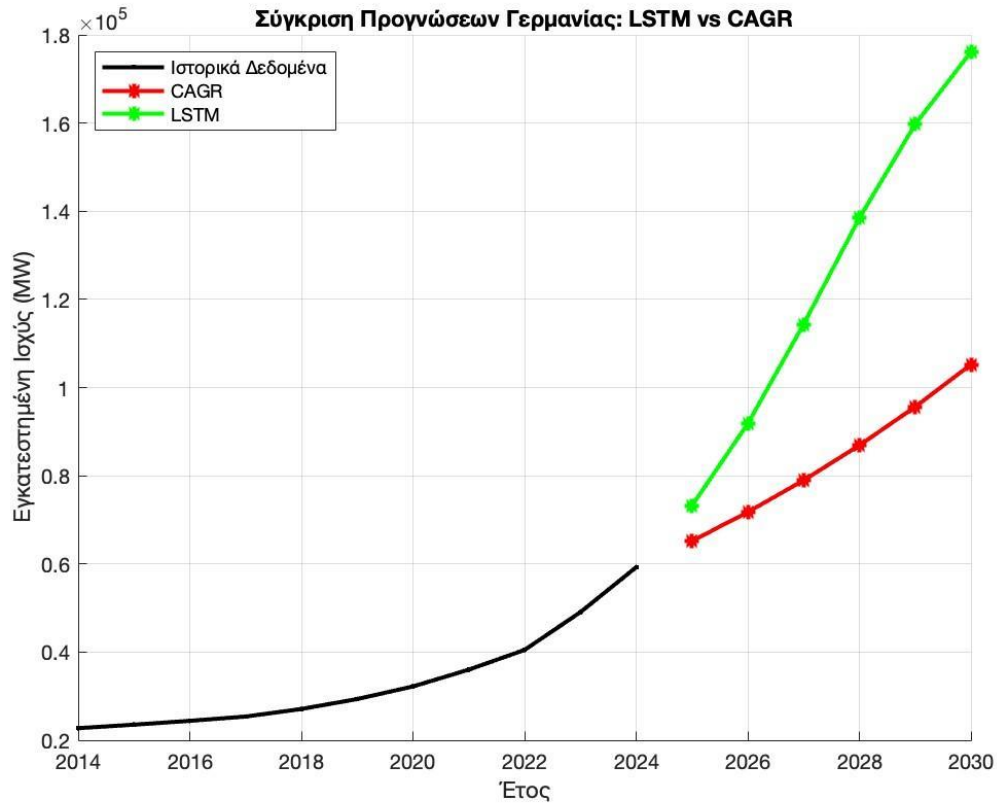
Σχήμα 5-22: Σύγκριση προγνώσεων φωτοβολταϊκής ισχύος στη Γαλλία με LSTM και CAGR (2025–2030).

(2025–2030).

Γερμανία

Η πρόβλεψη για τη Γερμανία αποκαλύπτει αισθητή απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων, ιδίως προς το τέλος της εξεταζόμενης περιόδου. Το LSTM εκτιμά σημαντικά υψηλότερη εγκατεστημένη ισχύ έως το 2030, παρουσιάζοντας έντονη εκθετική δυναμική. Η απόκλιση αυτή αντανάκλα την ικανότητα του LSTM να ενσωματώνει πολύπλοκες, μη γραμμικές εξελίξεις — όπως η επιτάχυνση της πολιτικής στήριξης (π.χ. αναθεώρηση του EEG), η τεχνολογική πρόοδος και η κοινωνική αποδοχή της αυτοπαραγωγής. Αντίθετα, το CAGR προτείνει έναν πιο σταθερό και εξομαλυμένο ρυθμό ανάπτυξης, ο οποίος πιθανώς υποεκτιμά τις πρόσφατες εξελίξεις της ώριμης και καινοτόμου αγοράς φωτοβολταϊκών της

Γερμανίας. Συνολικά, το LSTM εμφανίζεται περισσότερο προσαρμοσμένο στην πολυπαραγοντική πραγματικότητα της αγοράς, αποτυπώνοντας με μεγαλύτερη ευαισθησία την ενδεχόμενη επιτάχυνση της διείσδυσης φωτοβολταϊκών στέγης.

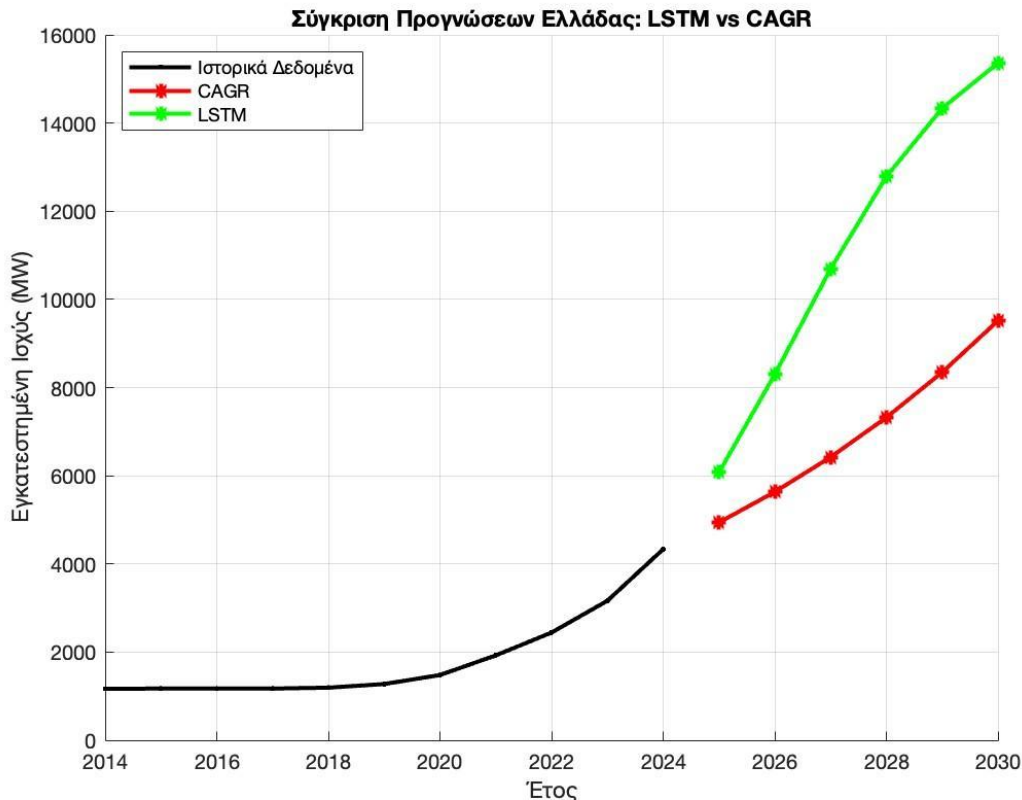


Σχήμα 5-23: Σύγκριση προβλέψεων Γερμανίας με LSTM και CAGR.

Ελλάδα

Στο γράφημα που παρουσιάζεται η πρόγνωση για την Ελλάδα στο Σχήμα 5-24 παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων, με το LSTM να προβλέπει εντονότερη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών κατά την περίοδο 2025–2030. Η δυναμική αυτή ενδεχομένως αντανακλά την αυξημένη επίδραση πρόσφατων πολιτικών ενίσχυσης της αυτοπαραγωγής (όπως οι επιδοτήσεις για net metering και το «Φωτοβολταϊκά στη Στέγη»), τις επενδύσεις σε αποθήκευση ενέργειας, αλλά και την αυξανόμενη κοινωνική αποδοχή των ΑΠΕ. Το LSTM φαίνεται να καταγράφει αυτές τις παραμέτρους με μεγαλύτερη ευαισθησία, αποδίδοντας προβολές που είναι πιο ευθυγραμμισμένες με τις τρέχουσες εξελίξεις. Αντίθετα, το CAGR εμφανίζεται

συντηρητικότερο, ακολουθώντας μια πιο εξομαλυμένη εκθετική τροχιά. Η απόκλιση των δύο μεθόδων γίνεται εντονότερη μετά το 2027, υποδεικνύοντας ότι το LSTM εκτιμά περαιτέρω επιτάχυνση στη διείσδυση των φωτοβολταϊκών, σε αντίθεση με το σταδιακό ρυθμό αύξησης που υποθέτει το CAGR.

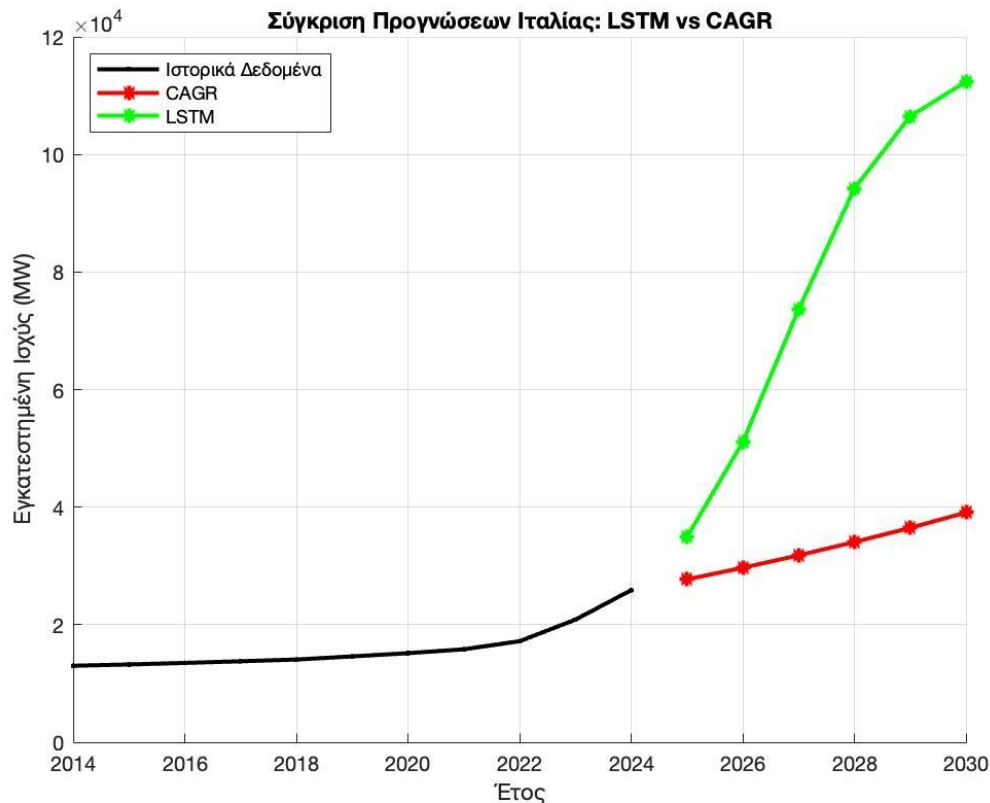


Σχήμα 5-24: Σύγκριση προβλέψεων εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ελλάδα (2025–2030).

Ιταλία

Στην περίπτωση της Ιταλίας, η απόκλιση μεταξύ των προβλέψεων των δύο μοντέλων είναι εντυπωσιακή. Το LSTM προβλέπει απότομη και επιταχυνόμενη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από το 2025 και μετά, υποδεικνύοντας μια ισχυρή δυναμική που φαίνεται να συλλαμβάνει τις πρόσφατες θεσμικές παρεμβάσεις, τα κίνητρα αυτοπαραγωγής και την αύξηση της ενεργειακής ζήτησης σε συνδυασμό με την πολιτική σταθερότητα στον χώρο των ΑΠΕ. Αντίθετα, το CAGR παρουσιάζει σχεδόν γραμμική και περιορισμένη αύξηση, αδυνατώντας να αντανakλά τις μη γραμμικές αλλαγές της ιταλικής αγοράς. Η ικανότητα του LSTM να ενσωματώνει παράγοντες όπως οι τάσεις πολιτικής στήριξης, η διαθεσιμότητα τεχνολογιών αποθήκευσης και η ωρίμανση του net metering

φαίνεται να του δίνει πλεονέκτημα σε συνθήκες ταχείας μετάβασης. Η απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων επιβεβαιώνει ότι η ιταλική αγορά ενδέχεται να εισέλθει σε φάση επιτάχυνσης που το απλό CAGR δεν μπορεί να προβλέψει επαρκώς.

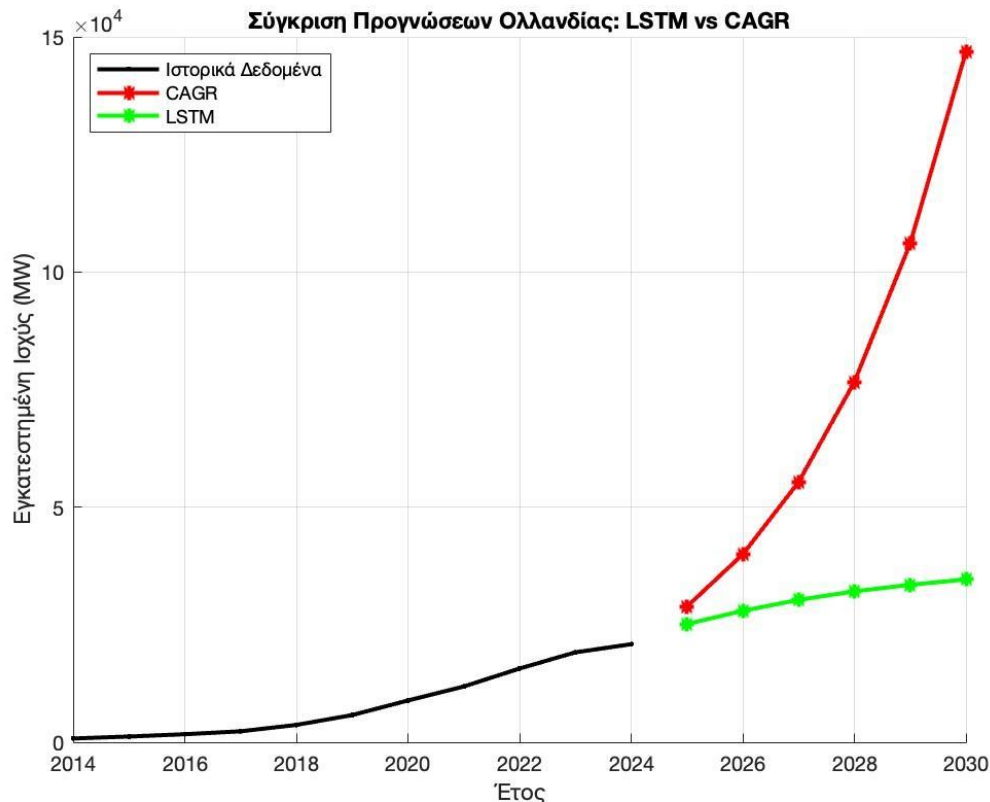


Σχήμα 5-25: Σύγκριση προβλέψεων εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ιταλία (2025–2030).

Ολλανδία

Η Ολλανδία αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση, καθώς το μοντέλο CAGR προβλέπει εντυπωσιακά ταχύτερη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από ό,τι το LSTM. Η καμπύλη του CAGR εμφανίζει έντονα εκθετικό χαρακτήρα, ο οποίος ενδέχεται να προκύπτει από την πολύ ισχυρή αύξηση που παρατηρήθηκε στα τελευταία ιστορικά δεδομένα — οδηγώντας σε υπερεκτίμηση της μελλοντικής τάσης. Αντίθετα, το LSTM εμφανίζεται πιο συγκρατημένο, προβλέποντας σταθεροποίηση και επιβράδυνση της ανάπτυξης έως το 2030. Αυτή η αποκλίνουσα συμπεριφορά υποδεικνύει ότι το LSTM πιθανώς ενσωματώνει κορεσμό στην αγορά στέγης ή πολιτικές αβεβαιότητες, όπως η σχεδιαζόμενη σταδιακή

κατάργηση του προγράμματος net metering. Επομένως, η πρόβλεψη του LSTM θεωρείται πιθανώς πιο ρεαλιστική, ειδικά σε μία χώρα που έχει ήδη φτάσει υψηλά επίπεδα διείσδυσης και όπου τα θεσμικά όρια ενδέχεται να περιορίσουν περαιτέρω ανάπτυξη χωρίς νέα πολιτικά μέτρα.

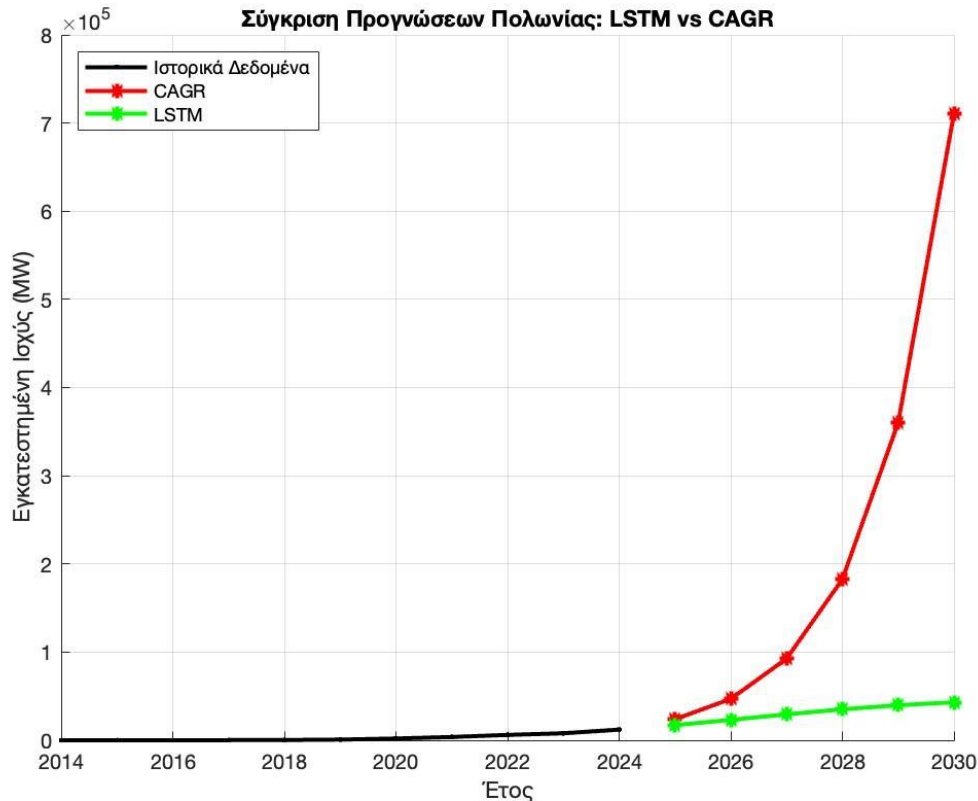


Σχήμα 5-26: Σύγκριση προβλέψεων εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ολλανδία (2025–2030).

Πολωνία

Η Πολωνία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων πρόβλεψης. Το CAGR εκτιμά μια σχεδόν εκρηκτική ανάπτυξη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης, φτάνοντας σε τιμές που ξεπερνούν τα 700.000 MW έως το 2030 – τιμές που δεν θεωρούνται ρεαλιστικές στο πλαίσιο των φυσικών, τεχνικών και πολιτικών περιορισμών της χώρας. Αυτή η εκτίμηση πιθανότατα οφείλεται σε πρόσφατες υψηλές ετήσιες αυξήσεις, τις οποίες το CAGR προεκτείνει ανεξέλεγκτα. Αντίθετα, το LSTM παρέχει μια πιο μετριοπαθή πρόβλεψη, δείχνοντας σταθεροποίηση μετά από μια αρχική άνοδο. Η

συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι το LSTM έχει «μάθει» από τα μοτίβα κόπωσης σε παρόμοιες αγορές και ενσωματώνει έμμεσα πολιτικές, τεχνικές και κοινωνικές συνθήκες που θα μπορούσαν να περιορίσουν μια τόσο ταχεία εξάπλωση. Συνεπώς, η πρόβλεψη του LSTM θεωρείται εδώ πιο αξιόπιστη, ενώ το CAGR πιθανώς υπερεκτιμά την τάση λόγω του περιορισμένου βάθους ιστορικών δεδομένων.

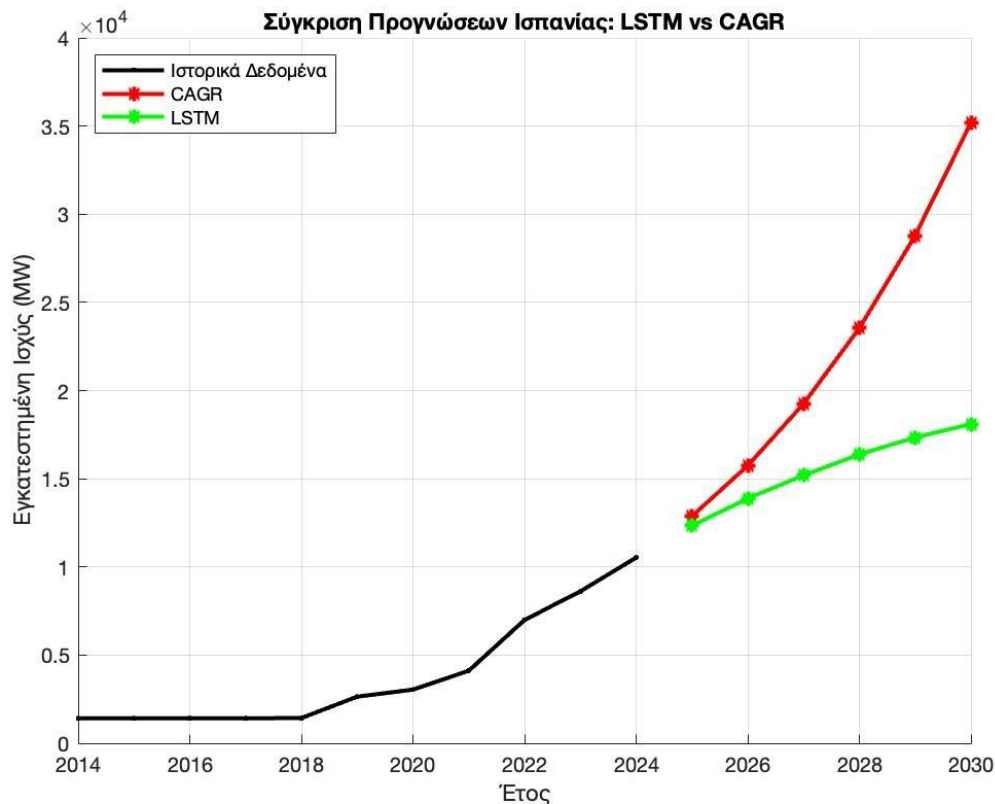


Σχήμα 5-27: Σύγκριση προβλέψεων για την Πολωνία (2025–2030).

Ισπανία

Στην περίπτωση της Ισπανίας, παρατηρείται αισθητή απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων μετά το 2026. Το μοντέλο CAGR συνεχίζει με αυξανόμενο ρυθμό, προσεγγίζοντας τα 35.000 MW έως το 2030, κάτι που αντανάκλα την απότομη αύξηση των τελευταίων ετών, αλλά ίσως αγνοεί την επίδραση πιθανών επιβραδύνσεων. Αντίθετα, το LSTM προβλέπει σημαντικά χαμηλότερες τιμές, με την αύξηση να επιβραδύνεται σταδιακά, δείχνοντας τάση σταθεροποίησης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδίδεται σε περιορισμούς της αγοράς

(π.χ. κορεσμός δικτύου ή καθυστερήσεις σε αδειοδοτήσεις) ή σε δομικά χαρακτηριστικά της αγοράς αυτοπαραγωγής στην Ισπανία, τα οποία λαμβάνονται υπόψη στο LSTM μέσω της μάθησης από ιστορικά μοτίβα. Συνεπώς, ενώ το CAGR προσφέρει μια αισιόδοξη – ίσως και υπερβολικά αισιόδοξη– προοπτική, το LSTM φαίνεται να προσεγγίζει πιο ρεαλιστικά την εξέλιξη της ισπανικής αγοράς ΦΒ στέγης.

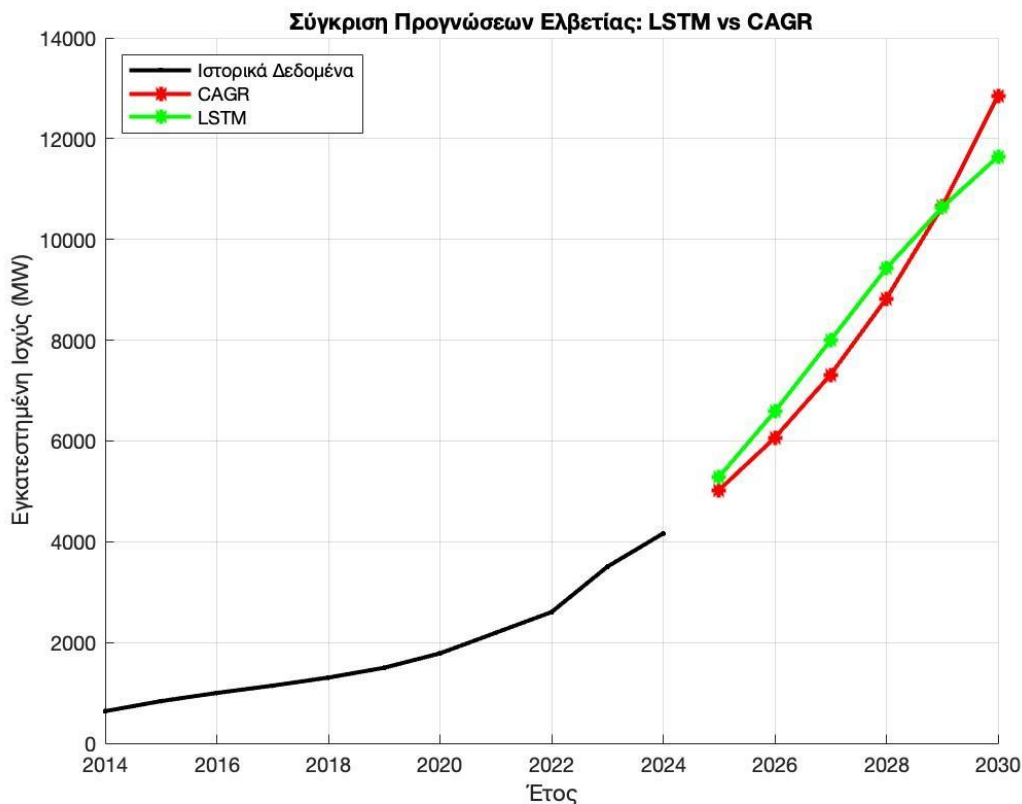


Σχήμα 5-28: Σύγκριση προβλέψεων για την Ισπανία (2025–2030).

Ελβετία

Για την Ελβετία, οι προβλέψεις LSTM και CAGR παρουσιάζουν μικρότερη μεταξύ τους απόκλιση σε σχέση με άλλες χώρες, ωστόσο η τάση διαφέρει. Το LSTM προβλέπει μια ήπια αλλά σταθερή αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, υποδηλώνοντας σταδιακή ενίσχυση της αγοράς σε ρεαλιστικά πλαίσια. Αντίθετα, το CAGR διατηρεί μια πιο αισιόδοξη προοπτική, συνεχίζοντας με αυξητικό ρυθμό που ενδέχεται να μην αντανακλά πλήρως τη σχετική στασιμότητα ή συγκράτηση της ελβετικής αγοράς τα προηγούμενα χρόνια. Η διαφορά μεταξύ των μοντέλων υποδεικνύει ότι ενώ η Ελβετία διαθέτει τεχνολογική

ωριμότητα, το LSTM φαίνεται να ενσωματώνει καλύτερα τους περιοριστικούς παράγοντες που σχετίζονται με γεωγραφικούς, κοινωνικούς ή ρυθμιστικούς περιορισμούς. Συνολικά, η προβλεπόμενη καμπύλη του LSTM ίσως να αντανάκλα πιο πιστά τον αναμενόμενο ρυθμό διείσδυσης ΦΒ σε στέγες, σε αντίθεση με τη γενική εξομάλυνση του CAGR.

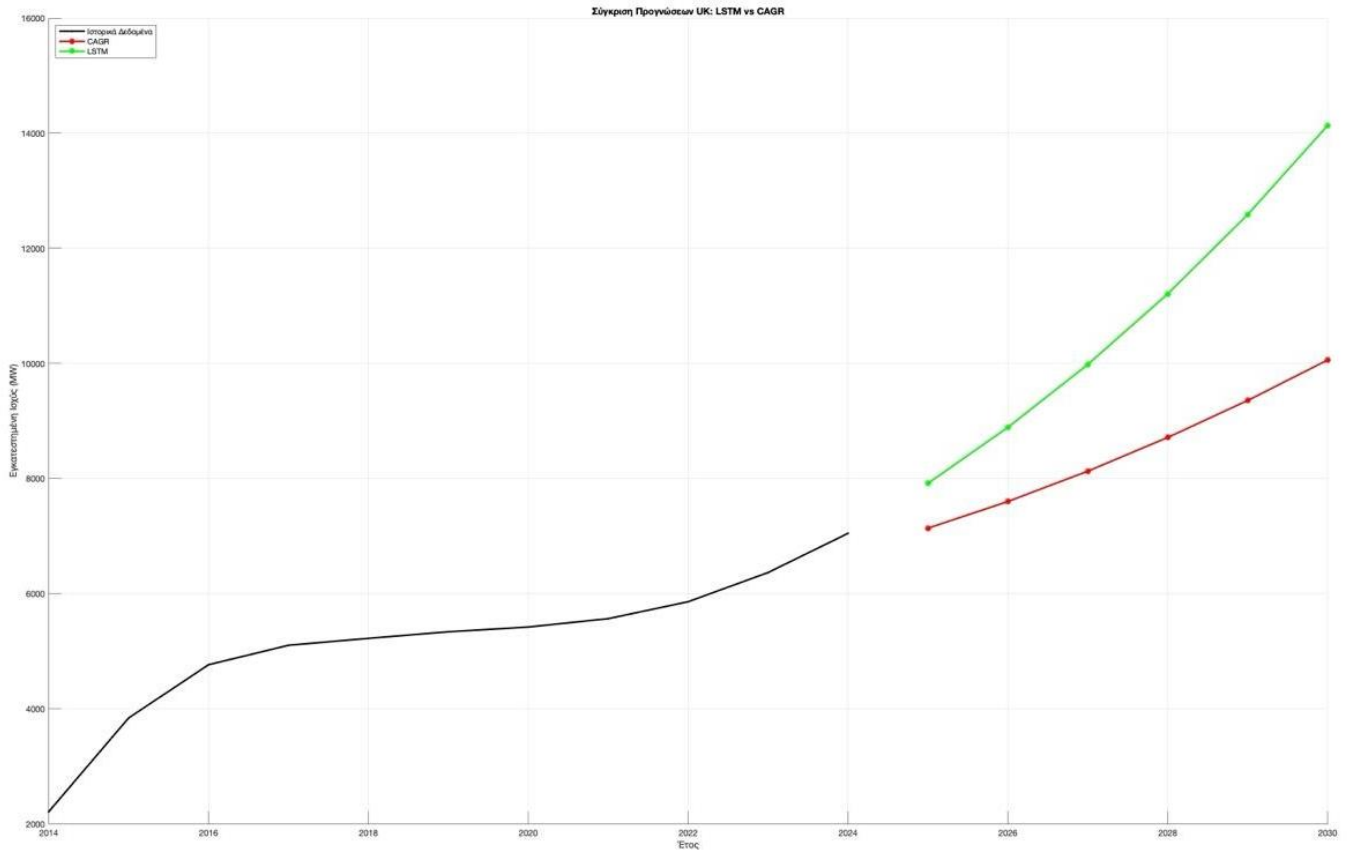


Σχήμα 5-29: Σύγκριση προβλέψεων για την Ελβετία (2025–2030).

Ηνωμένο Βασίλειο

Για το Ηνωμένο Βασίλειο, η πρόβλεψη του LSTM δείχνει μια ισχυρότερη ανοδική πορεία σε σύγκριση με το CAGR, υποδεικνύοντας μια πιθανή επανεκκίνηση της αγοράς φωτοβολταϊκών στέγης μετά από περίοδο σχετικής στασιμότητας. Η ταχύτερη αύξηση που αποτυπώνεται από το LSTM φαίνεται να λαμβάνει υπόψη το ευρύτερο πλαίσιο πολιτικών και τεχνολογικών εξελίξεων (όπως η αλλαγή τιμολογιακών πολιτικών και η στροφή προς την ενεργειακή αυτονομία), στοιχεία που ένα πιο «στατικό» μοντέλο όπως το CAGR δεν ενσωματώνει. Το τελευταίο παραμένει σε πιο ήπιους ρυθμούς, διατηρώντας

μια συνεχόμενη αλλά πιο περιορισμένη αύξηση. Η εντονότερη απόκλιση των μοντέλων προς το τέλος της περιόδου πρόβλεψης φανερώνει την ανάγκη χρήσης πιο δυναμικών και ευαίσθητων εργαλείων, όπως τα LSTM, σε αγορές με ιστορικές διακυμάνσεις και μεταβλητό ρυθμιστικό περιβάλλον όπως το ΗΒ.



Σχήμα 5-30: Σύγκριση προβλέψεων για το Ηνωμένο Βασίλειο (2025–2030).

Επίδραση Μεταβολών (Ευαισθησία / Ελαστικότητα)

Η παρούσα ενότητα εξετάζει την ευαισθησία των αποτελεσμάτων πρόβλεψης σε μικρές μεταβολές των εισόδων, με στόχο την αξιολόγηση της σταθερότητας και αξιοπιστίας των μοντέλων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας μέσω τροποποίησης του ποσοστού συμμετοχής των φωτοβολταϊκών στέγης κατά $\pm 5\%$ ανά χώρα, τόσο στο μοντέλο LSTM όσο και στο Growth Model. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση του βαθμού στον οποίο μικρές αλλαγές στα ιστορικά δεδομένα ή στις υποθέσεις εισόδου επηρεάζουν τις τελικές προβλέψεις.

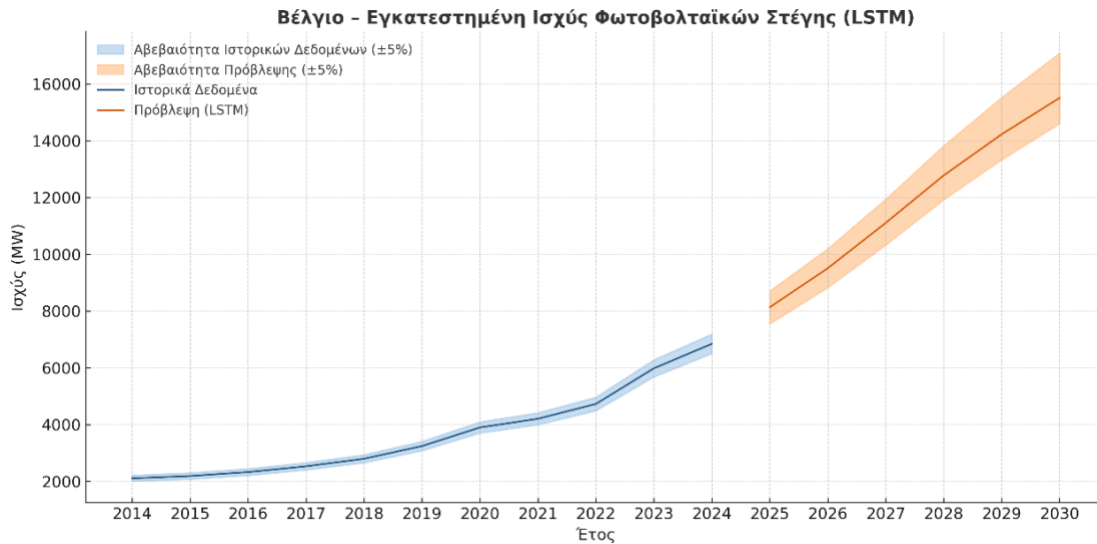
Σε κάθε διάγραμμα αυτής της ενότητας, απεικονίζονται:

- Τα ιστορικά δεδομένα, με περιθώριο αβεβαιότητας $\pm 5\%$ (**μπλε σκίαση**),
- Οι προβλέψεις του κάθε μοντέλου (πορτοκαλί για LSTM και CAGR αντίστοιχα),
- Η αντίστοιχη ζώνη αβεβαιότητας πρόβλεψης (**πορτοκαλί σκίαση $\pm 5\%$**).

Μέσω της συγκριτικής αποτίμησης της απόκρισης των δύο μεθόδων, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη ροπή τους προς αστάθεια ή υπερευαισθησία, στοιχεία κρίσιμα για τη χάραξη πολιτικής και τη λήψη αποφάσεων σε περιβάλλοντα αβεβαιότητας.

Βέλγιο

Η ανάλυση ευαισθησίας που παρουσιάζεται στα διαγράμματα 5-31 και 5-32 αφορά τη μελέτη της επίδρασης μικρών μεταβολών στην είσοδο του μοντέλου (στην προκειμένη περίπτωση, $\pm 5\%$ απόκλιση στα ιστορικά δεδομένα εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών) και πώς αυτές επηρεάζουν τις μελλοντικές προβλέψεις των μοντέλων LSTM και CAGR για το Βέλγιο. Για την περίπτωση του Βελγίου, το LSTM προβλέπει έντονα ανοδική τάση στην εγκατεστημένη ισχύ από το 2025 και μετά, ξεκινώντας περίπου από τα 6.000 MW και φτάνοντας σχεδόν τα 16.000 MW το 2030. Το γεγονός ότι η ζώνη αβεβαιότητας διευρύνεται όσο προχωράμε προς το 2030 είναι αναμενόμενο, καθώς η προβλεπτική ακρίβεια μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τα γνωστά δεδομένα. Ωστόσο, το εύρος απόκλισης παραμένει σχετικώς συμμετρικό και σταθερό (περίπου $\pm 5\%$), γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο δεν είναι υπερευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες. Η προβλεπόμενη συμπεριφορά δεν αλλάζει ριζικά ακόμη και όταν τα δεδομένα εισόδου μεταβληθούν ελαφρώς. Αυτό σημαίνει ότι το LSTM επιδεικνύει σταθερότητα και αξιοπιστία, ιδίως σε ένα περιβάλλον με αυξανόμενη στήριξη προς τις ΑΠΕ, όπου μπορεί να εκτιμήσει και να αποτυπώσει τις μη γραμμικές τάσεις της αγοράς.

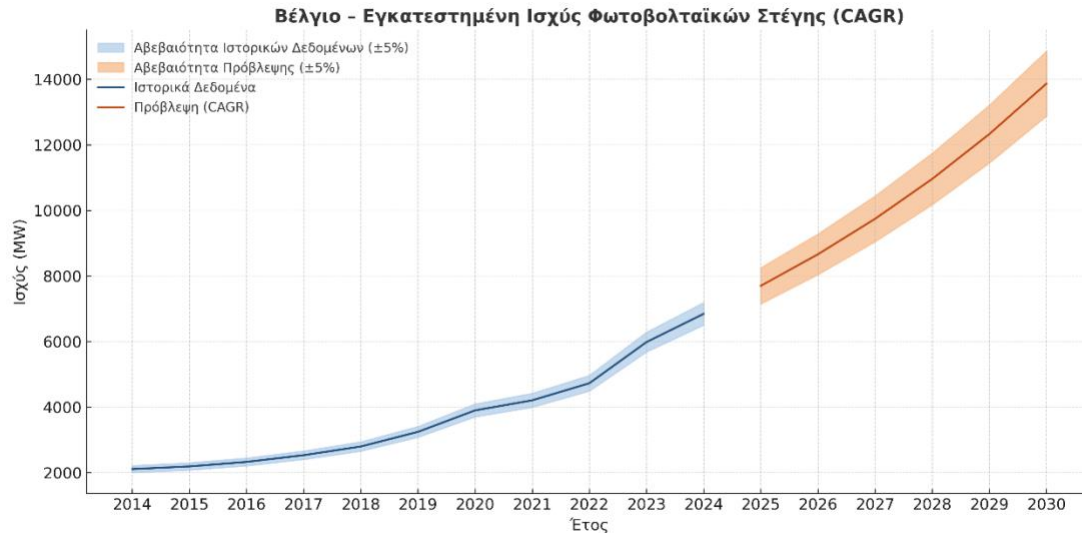


Σχήμα 5-31: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στο Βέλγιο με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

Το διάγραμμα 5-32 απεικονίζει την πρόβλεψη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στο Βέλγιο μέσω του μοντέλου CAGR (Compound Annual Growth Rate), συνοδευόμενη από ζώνες αβεβαιότητας $\pm 5\%$ τόσο για τα ιστορικά δεδομένα όσο και για τις μελλοντικές τιμές. Η καμπύλη της πρόβλεψης εμφανίζει ομαλή, εκθετικού τύπου αύξηση από το 2025 έως το 2030, η οποία προκύπτει βάσει της μέσης ετήσιας ιστορικής ανάπτυξης. Το εύρος αβεβαιότητας (πορτοκαλί περιοχή) διευρύνεται με το χρόνο, αλλά παραμένει συγκρατημένο, αποτυπώνοντας τη σταθερή φύση του υποδείγματος. Σε αντίθεση με το LSTM, το CAGR δεν λαμβάνει υπόψη πολύπλοκες παρελθοντικές ή εξωτερικές επιδράσεις (τεχνολογικές εξελίξεις, πολιτικές αποφάσεις κ.ά.), αλλά εφαρμόζει μία απλή, μη δυναμική υπόθεση σταθερού ρυθμού ανάπτυξης. Παρ' όλα αυτά, προσφέρει μια σαφή και εύκολα ερμηνεύσιμη εικόνα της γενικής τάσης.

Η ανάλυση ευαισθησίας ανέδειξε κρίσιμες διαφορές μεταξύ των δύο μεθοδολογιών πρόβλεψης. Το μοντέλο LSTM παρουσίασε υψηλότερη ευαισθησία σε μεταβολές των εισόδων, γεγονός που αντανάκλα τη δυναμική και πολυπαραγοντική φύση του. Παρά την αυξημένη πολυπλοκότητα, η προβλεπόμενη τιμή παρέμεινε εντός λογικού εύρους απόκλισης, ενισχύοντας την αξιοπιστία του μοντέλου υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Το LSTM κατόρθωσε να αποτυπώσει καλύτερα την επίδραση πολύπλοκων εξωτερικών παραμέτρων (τεχνολογική πρόοδος, πολιτικές ενίσχυσης, μακροοικονομικές τάσεις), αποδεικνύοντας ότι αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την πρόβλεψη της πορείας των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Αντίθετα, το CAGR, αν και απλούστερο και λιγότερο ευαίσθητο στις μεταβολές εισόδων, προσέφερε σταθερές

και συνεπείς προβλέψεις, με περιορισμένο εύρος απόκλισης. Η απουσία αντίδρασης σε εξωτερικούς παράγοντες μπορεί να το καθιστά πιο ασφαλές για βραχυπρόθεσμες ή συντηρητικές προβλέψεις, ειδικά σε αγορές με σχετικά σταθερές συνθήκες. Συνολικά, η παράλληλη χρήση των δύο μεθόδων προσφέρει έναν πλουραλισμό στην εκτίμηση της μελλοντικής εξέλιξης και ενισχύει τη βάση για τεκμηριωμένες και προσαρμοστικές αποφάσεις στον ενεργειακό σχεδιασμό.



Σχήμα 5-32: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στο Βέλγιο με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

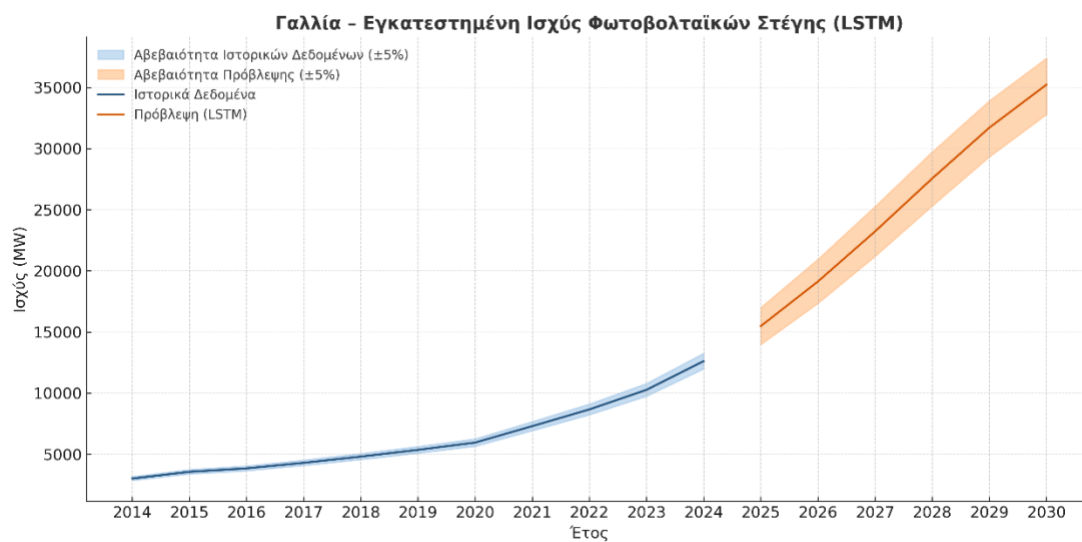
Γαλλία

Για τη Γαλλία, παρατηρείται ότι και τα δύο μοντέλα (LSTM και CAGR) εμφανίζουν αυξητική τάση στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στέγης έως το 2030, ωστόσο με διαφορετικά χαρακτηριστικά ευαισθησίας. Στο γράφημα του LSTM (Σχήμα 5-33), το εύρος αβεβαιότητας (±5%) αυξάνεται σταδιακά, ιδιαίτερα μετά το 2026, αντανακλώντας τη δυνατότητα του μοντέλου να "ανιχνεύει" τις επιδράσεις εξωτερικών παραγόντων στην πρόβλεψη. Η καμπύλη διατηρεί δυναμικό χαρακτήρα, γεγονός που ευνοεί την ευελιξία του μοντέλου σε μη γραμμικές τάσεις και πολιτικοοικονομικές εξελίξεις.

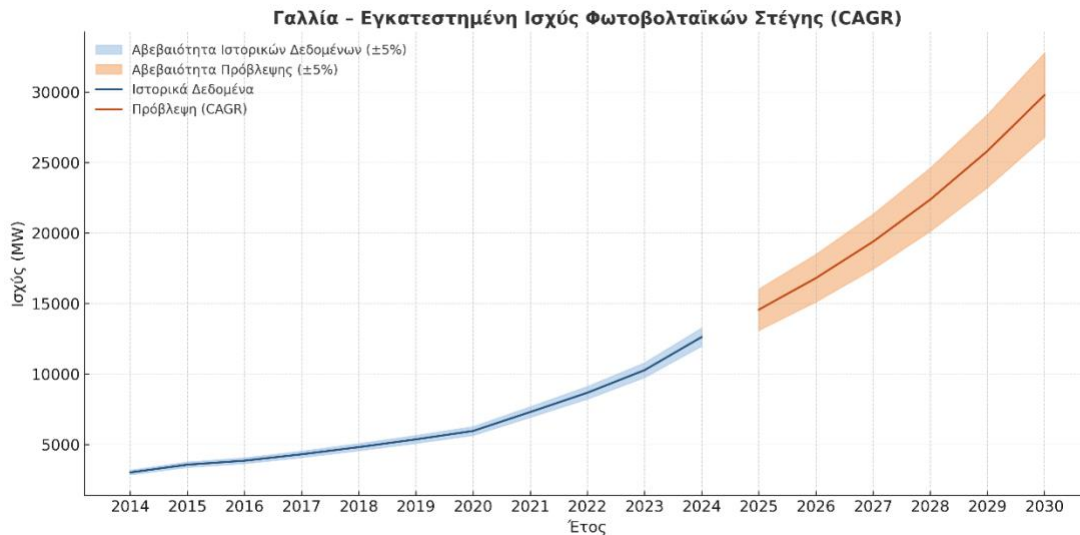
Αντίθετα, το μοντέλο CAGR (Σχήμα 5-34) αποτυπώνει επίσης έντονη άνοδο αλλά με πιο "συμμετρική" και μαθηματικά εξομαλυμένη εξέλιξη. Η ζώνη αβεβαιότητας διατηρεί σταθερό πλάτος καθ' όλη τη διάρκεια της πρόβλεψης, γεγονός που υποδηλώνει

μεγαλύτερη σταθερότητα μεν, αλλά και μειωμένη ευαισθησία στις διακυμάνσεις που μπορεί να εμφανιστούν στην αγορά ή στο κανονιστικό πλαίσιο.

Συμπερασματικά, το LSTM φαίνεται να καταγράφει πιο "ρεαλιστική" δυναμική με αυξημένη ανταπόκριση σε μακροοικονομικές ή πολιτικές μεταβολές, κάτι που καθίσταται χρήσιμο σε συνθήκες αβεβαιότητας. Από την άλλη, το CAGR διατηρεί σταθερό και προβλέψιμο μοτίβο, γεγονός που μπορεί να είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις στρατηγικού σχεδιασμού με βάση απλουστευμένες παραδοχές. Η επιλογή μοντέλου εξαρτάται, τελικά, από το επίπεδο ακρίβειας και ευαισθησίας που απαιτεί η εφαρμογή πρόβλεψης.



Σχήμα 5-33: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στη Γαλλία με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

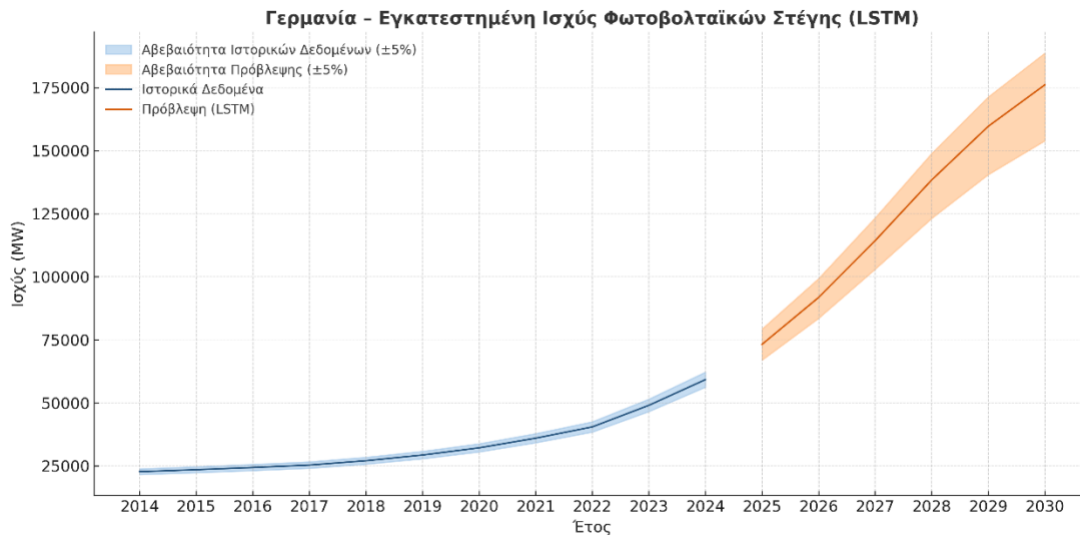


Σχήμα 5-34: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στη Γαλλία με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

Γερμανία

Για τη Γερμανία, τα δύο διαγράμματα που απεικονίζουν την προβλεπόμενη εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στέγης έως το 2030, μέσω των μοντέλων LSTM και CAGR αντίστοιχα, παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές τόσο ως προς το ύψος της πρόβλεψης όσο και ως προς τη δυναμική της αβεβαιότητας.

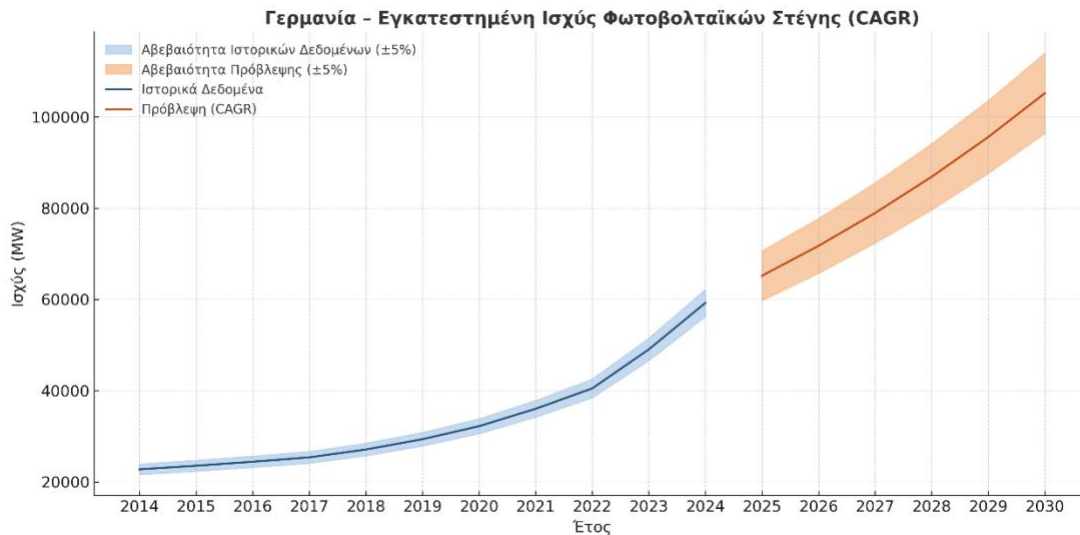
Το μοντέλο LSTM δείχνει εκθετική αύξηση της ισχύος, με την πρόβλεψη να ξεπερνά τις 175.000 MW το 2030, γεγονός που καταδεικνύει την ικανότητα του μοντέλου να ενσωματώνει τις ισχυρές αναπτυξιακές τάσεις της γερμανικής αγοράς ΑΠΕ. Η ζώνη αβεβαιότητας ($\pm 5\%$) διευρύνεται σημαντικά προς το τέλος της περιόδου, γεγονός που αντικατοπτρίζει τη σύνθετη και εξελισσόμενη φύση των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών. Αυτό φανερώνει ότι το LSTM είναι πιο «ευαίσθητο» σε μεταβολές των εισόδων, αλλά και πιο ευέλικτο στην αποτύπωση των μακροχρόνιων τάσεων.



Σχήμα 5-35: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στη Γερμανία με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

Αντίθετα, το CAGR εμφανίζει πιο γραμμική και συγκρατημένη πορεία πρόβλεψης, φτάνοντας περίπου τα 110.000 MW το 2030. Αν και η απόκλιση $\pm 5\%$ προσδίδει και εδώ ένα εύρος αβεβαιότητας, αυτό παραμένει πιο περιορισμένο, καταδεικνύοντας την πιο συντηρητική και «στατική» φύση του μοντέλου. Η προσέγγιση του CAGR βασίζεται στην παραδοχή σταθερού ρυθμού ανάπτυξης, γεγονός που μπορεί να υποεκτιμά τις ραγδαίες τεχνολογικές ή πολιτικές εξελίξεις που ενδέχεται να προκύψουν.

Συνολικά, η σύγκριση των δύο μεθόδων αποκαλύπτει ότι το LSTM ανταποκρίνεται καλύτερα σε μη γραμμικές, επιταχυνόμενες τάσεις, όπως αυτές που φαίνεται να επικρατούν στη Γερμανία, με υψηλό βαθμό ωριμότητας και πολιτικής στήριξης στον τομέα της αυτοπαραγωγής. Το CAGR, παρότι χρήσιμο ως σταθερό σημείο αναφοράς, ενδέχεται να υποτιμά τις δυνατότητες επέκτασης της αγοράς σε συνθήκες θετικών ενισχύσεων και καινοτομίας.

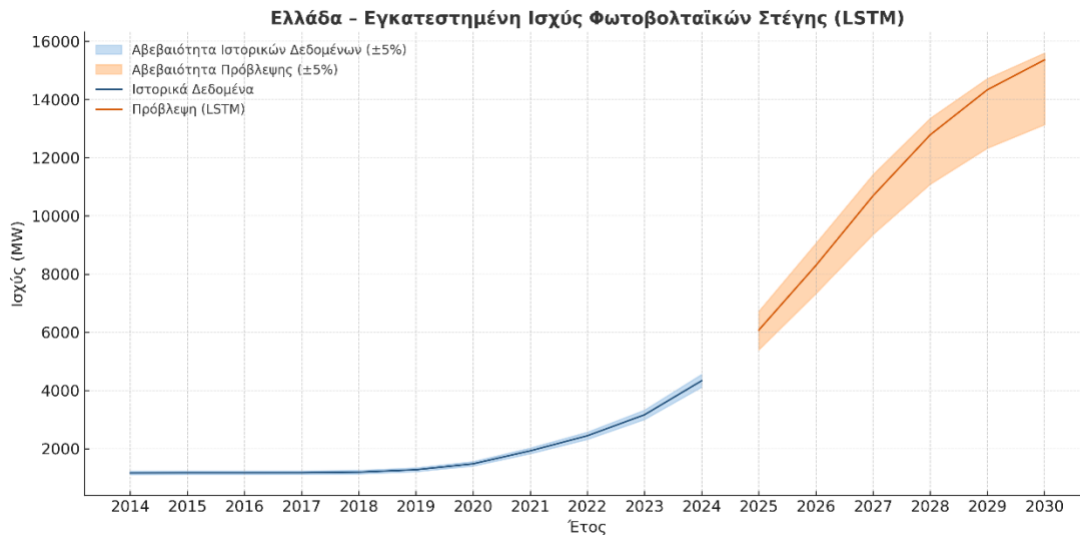


Σχήμα 5-36: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στη Γερμανία με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

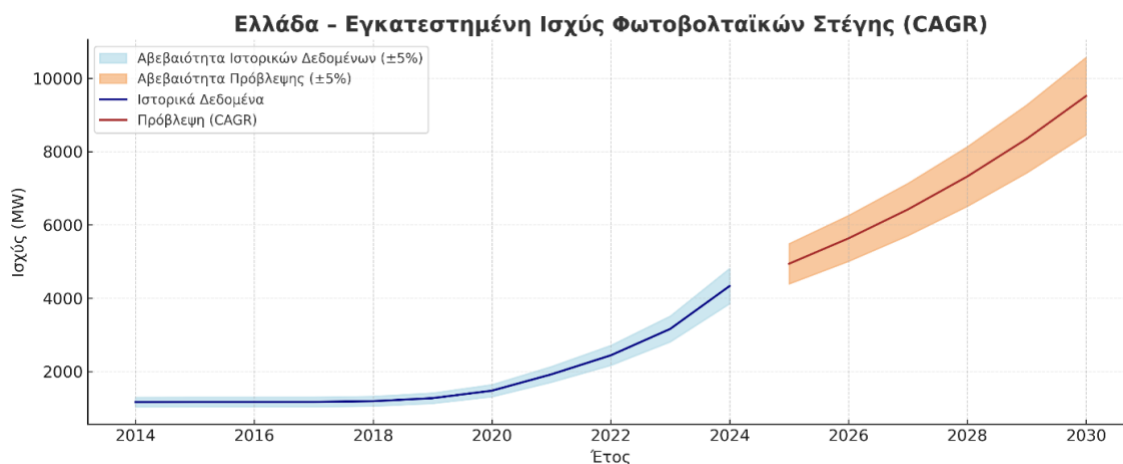
Ελλάδα

Το διάγραμμα για την Ελλάδα με χρήση του μοντέλου LSTM αναδεικνύει μια δυναμική και ταχύρρυθμη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών σε στέγες κατά την περίοδο 2025–2030. Η μπάντα αβεβαιότητας $\pm 5\%$ καταδεικνύει αυξημένη ευαισθησία στις εισόδους, ιδιαίτερα προς τα τελευταία έτη της πρόβλεψης, κάτι που είναι σύνηθες για τα LSTM όταν επεκτείνονται χρονικά πέραν των δεδομένων που έχουν παρατηρηθεί. Παρά την αβεβαιότητα, το LSTM διατηρεί προβλέψεις αυξητικής τάσης, γεγονός που ενδέχεται να συνδέεται με την πρόσφατη επιτάχυνση της διείσδυσης των ΑΠΕ και πολιτικών στήριξης στην Ελλάδα.

Αντίθετα, το μοντέλο CAGR ακολουθεί μια πιο συγκρατημένη αυξητική τροχιά, με αισθητά χαμηλότερες τελικές τιμές. Η αβεβαιότητα των προβλέψεων παραμένει σχετικά σταθερή, αντανακλώντας τη μαθηματική απλότητα του μοντέλου και την εξομάλυνση που επιβάλλει στις ιστορικές τάσεις. Το εύρος της μπάντας $\pm 5\%$ υποδηλώνει ότι το CAGR εμφανίζεται λιγότερο ευαίσθητο σε αλλαγές των εισόδων, γεγονός που μεταφράζεται σε υψηλότερη σταθερότητα αλλά πιθανώς μικρότερη ευελιξία.



Σχήμα 5-37: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ελλάδα με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

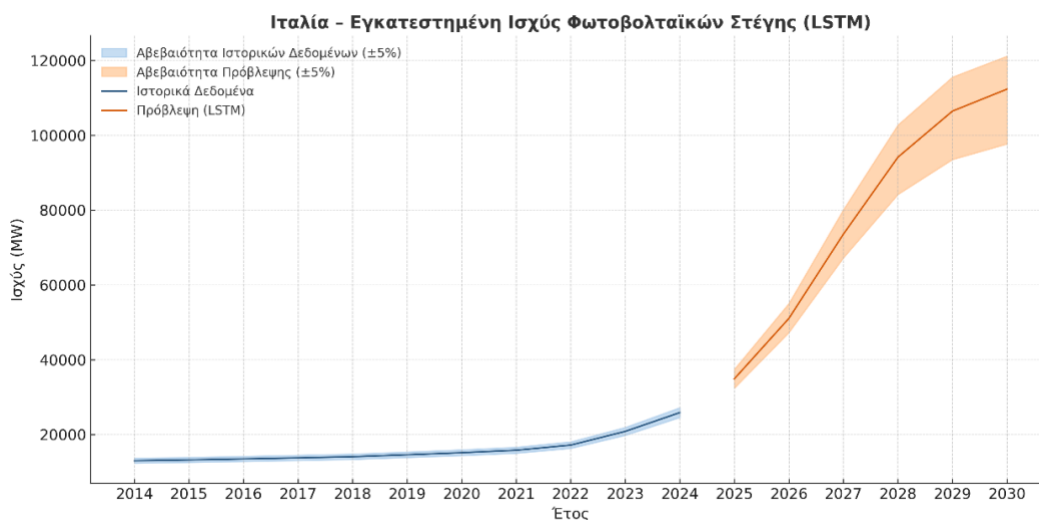


Σχήμα 5-38: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ελλάδα με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

Συμπερασματικά, για την περίπτωση της Ελλάδας, το LSTM μοντέλο αποτυπώνει με μεγαλύτερη ευαισθησία την πρόσφατη ραγδαία αύξηση της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών, ενσωματώνοντας μελλοντικές προσδοκίες, τεχνολογικές βελτιώσεις και θεσμικά κίνητρα. Αντίθετα, το CAGR λειτουργεί ως ένα πιο συντηρητικό σενάριο, που υποεκτιμά πιθανές επιταχύνσεις. Αυτή η σύγκριση τονίζει τη σημασία επιλογής μοντέλου με βάση τον σκοπό: προβλέψεις με στόχο τη στρατηγική πολιτικής ίσως ωφελούνται από την ευαισθησία του LSTM, ενώ το CAGR προσφέρει σταθερότερες εκτιμήσεις για σενάρια χαμηλότερου ρίσκου.

Ιταλία

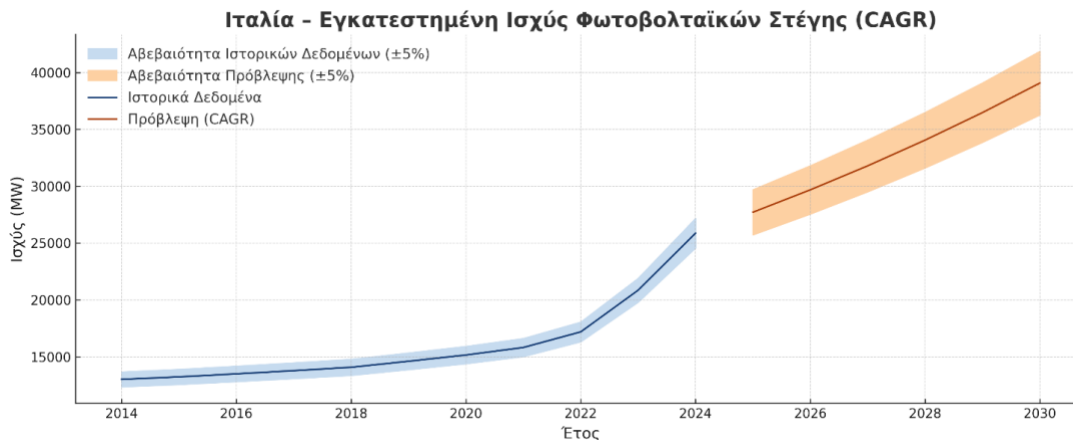
Το διάγραμμα του μοντέλου LSTM για την Ιταλία καταγράφει ιδιαίτερα έντονη αύξηση στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στέγης μετά το 2024, με τις προβλέψεις να ξεπερνούν τις 110.000 MW το 2030. Το εύρος αβεβαιότητας ($\pm 5\%$) παρουσιάζεται αυξημένο, υποδηλώνοντας υψηλή ευαισθησία της πρόβλεψης σε μικρές μεταβολές των ιστορικών δεδομένων. Η απότομη ανοδική τάση ενισχύει την άποψη ότι το LSTM ενσωματώνει προσδοκίες επιταχυνόμενης πολιτικής και κοινωνικής στήριξης, καθώς και πιθανές τεχνολογικές καινοτομίες. Το εύρος μεταξύ των ακραίων τιμών είναι αρκετά διευρυμένο, υποδεικνύοντας ένα σύστημα ευμετάβλητο στις εισροές.



Σχήμα 5-39: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ιταλία με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

Αντίθετα, το μοντέλο CAGR προβλέπει πιο συγκρατημένη ανάπτυξη, φτάνοντας περίπου τα 40.000 MW έως το 2030. Το προφίλ αύξησης είναι σταθερό και με μικρότερη απόκλιση αβεβαιότητας, γεγονός που υποδηλώνει μειωμένη ευαισθησία στο $\pm 5\%$ των εισόδων. Αυτό το εύρημα αντανακλά την ενδογενή απλότητα του μοντέλου CAGR, το οποίο δεν προσαρμόζεται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

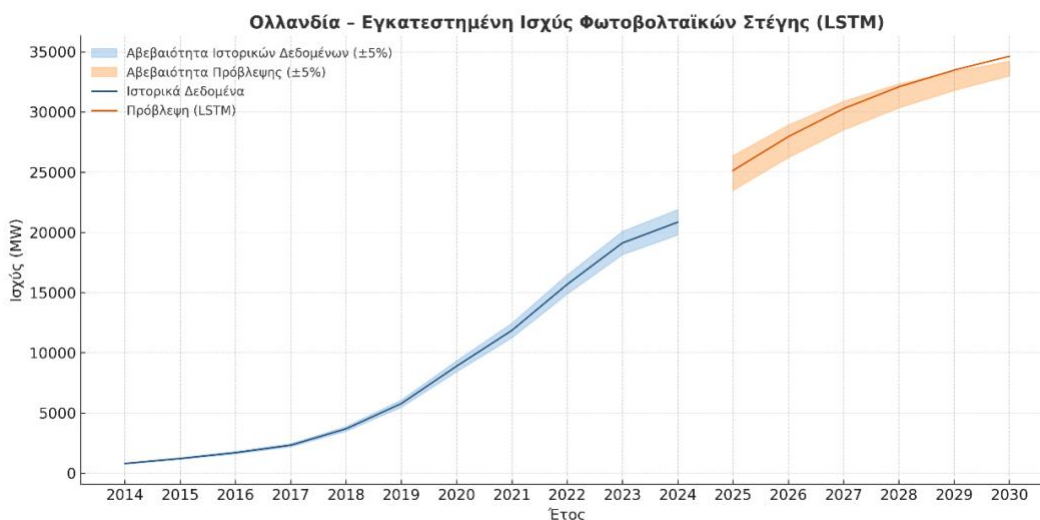
Η σύγκριση των δύο μοντέλων δείχνει ότι το LSTM εμφανίζει υψηλότερη προσαρμοστικότητα και "ευαισθησία" στις διακυμάνσεις των δεδομένων, προβλέποντας πιο ριζικές αυξήσεις. Το CAGR προσφέρει σταθερότητα και συντηρητικές προβλέψεις, κάτι που μπορεί να είναι χρήσιμο για σενάρια βασισμένα στην επέκταση υπάρχουσών τάσεων χωρίς εκπλήξεις. Ωστόσο, για περιβάλλοντα με πιθανές ανατροπές (όπως η Ιταλία με την πρόσφατη επανεκκίνηση ενεργειακών κινήτρων), η δυναμική φύση του LSTM φαίνεται καταλληλότερη, αν και συνοδεύεται από υψηλότερο βαθμό αβεβαιότητας.



Σχήμα 5-40: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ιταλία με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

Ολλανδία

Η πρόβλεψη με χρήση LSTM για την εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στέγης στην Ολλανδία δείχνει συνεχή αύξηση έως το 2030, αλλά με ρυθμό που σταδιακά μειώνεται, αποτυπώνοντας σημάδια επιβράδυνσης ή κορεσμού της αγοράς. Η αβεβαιότητα της πρόβλεψης ($\pm 5\%$) παραμένει σχετικά σταθερή και συγκρατημένη, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική σταθερότητα και προβλεψιμότητα. Η επιπεδότητα της καμπύλης από το 2027 και μετά μπορεί να ερμηνευτεί ως ένδειξη κορεσμού ή περιορισμού στην περαιτέρω χωρητικότητα.



Σχήμα 5-41: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ολλανδία με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

Αντίθετα, το μοντέλο CAGR προβλέπει μια σχεδόν εκθετική αύξηση που υπερβαίνει κατά πολύ τα επίπεδα που προβλέπει το LSTM. Η προβλεπόμενη ισχύς το 2030 φτάνει τα

150.000 MW, τιμή πολλαπλάσια σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα, γεγονός που ενδεχομένως μαρτυρά υπερεκτίμηση λόγω της απλοϊκής υπόθεσης σταθερού ρυθμού ανάπτυξης. Παρά τη σταθερή ζώνη αβεβαιότητας, η φύση της πρόβλεψης εγείρει ερωτήματα ως προς την ρεαλιστικότητα του σεναρίου.

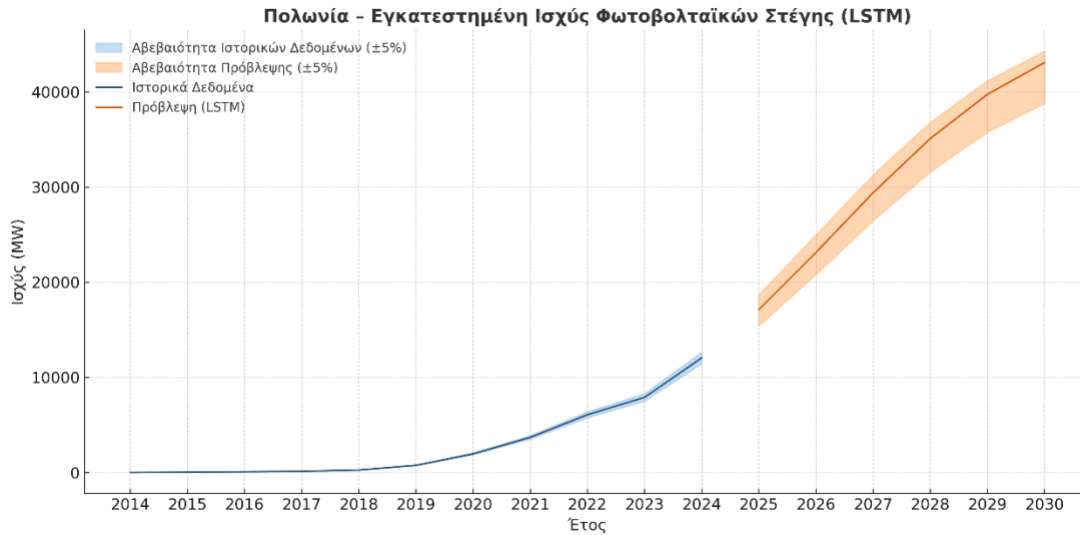


Σχήμα 5-42: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ολλανδία με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

Η σύγκριση των δύο μοντέλων για την Ολλανδία αναδεικνύει κρίσιμες διαφορές: το LSTM ενσωματώνει επιβράδυνση στο ρυθμό ανάπτυξης, αποτυπώνοντας ενδεχομένως πιο ρεαλιστικά τον κορεσμό της αγοράς και τις τεχνικές ή κοινωνικές προκλήσεις. Το CAGR από την άλλη, λόγω της μαθηματικής του φύσης, ενδέχεται να οδηγήσει σε αισιόδοξες και τελικά μη βιώσιμες εκτιμήσεις, αν δεν προσαρμοστεί στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η ερμηνεία αυτή καθιστά το LSTM ένα πιο ευέλικτο εργαλείο πρόβλεψης σε αγορές με μεταβαλλόμενη δυναμική, όπως η Ολλανδική.

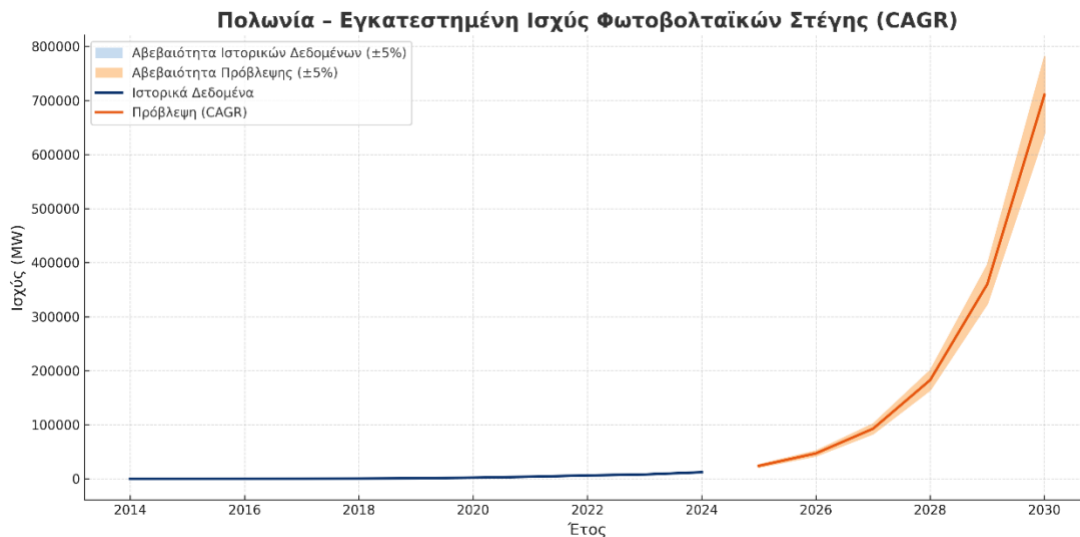
Πολωνία

Στο πρώτο διάγραμμα, το μοντέλο LSTM προβλέπει σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στη στέγη στην Πολωνία μέχρι το 2030, με προβλεπόμενες τιμές να ξεπερνούν τα 40.000 MW. Το εύρος αβεβαιότητας ($\pm 5\%$) που απεικονίζεται με την πορτοκαλί ζώνη γύρω από την πρόβλεψη παραμένει σχετικά σταθερό αναλογικά με την πρόβλεψη, επιδεικνύοντας μία ελεγχόμενη ευαισθησία στις μεταβολές των εισόδων. Το LSTM αποτυπώνει έναν δυναμικά επιταχυνόμενο ρυθμό, αντανακλώντας τη ραγδαία πρόσφατη αύξηση της ηλιακής διείσδυσης στη χώρα.



Σχήμα 5-43: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Πολωνία με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

Αντίθετα, το διάγραμμα του CAGR δείχνει υπερβολικά εκθετική ανάπτυξη, με την προβλεπόμενη ισχύ να υπερβαίνει τις 700.000 MW το 2030 — μια πρόβλεψη που δύσκολα μπορεί να υποστηριχθεί από ρεαλιστικές συνθήκες. Το μοντέλο εμφανίζει έντονη ευαισθησία στις μικρές μεταβολές των δεδομένων βάσης, κάτι που επισημαίνεται και από τη σχετικά πλατιά ζώνη αβεβαιότητας. Αυτό υποδηλώνει ότι το CAGR, βασισμένο σε έναν ενιαίο μέσο ρυθμό ανάπτυξης, ενδέχεται να υπερεκτιμά την πορεία επέκτασης σε περιπτώσεις απότομης πρόσφατης αύξησης — όπως αυτή που παρατηρείται στην Πολωνία.

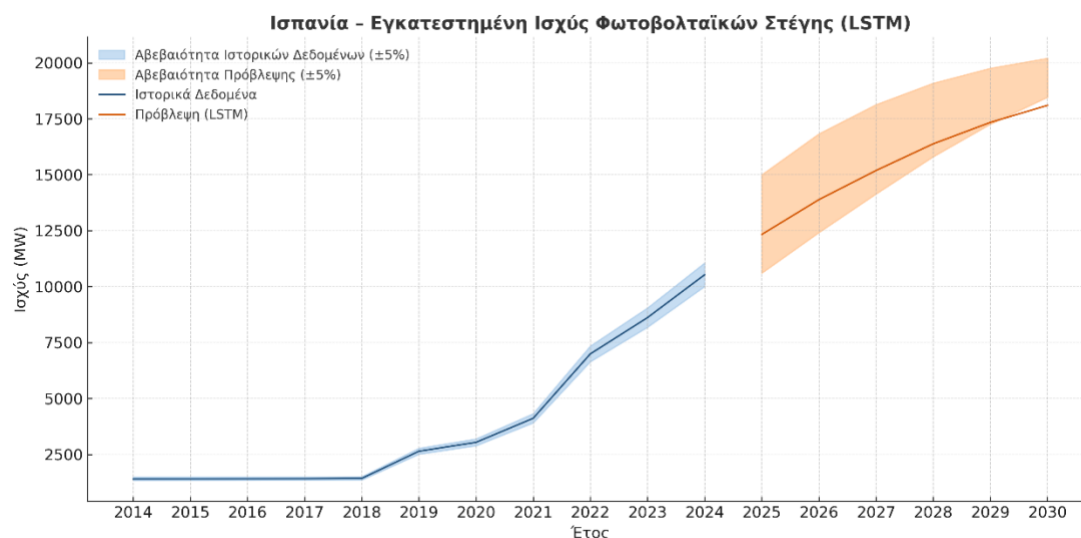


Σχήμα 5-44: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Πολωνία με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

Η ανάλυση αβεβαιότητας για την Πολωνία καταδεικνύει τις διαφορετικές ευαισθησίες των δύο μοντέλων. Το LSTM παρέχει μια πιο συγκρατημένη αλλά ρεαλιστική πρόβλεψη, ενσωματώνοντας σταδιακή ωρίμανση της αγοράς. Αντίθετα, το CAGR εμφανίζει μεγαλύτερη απόκλιση και ευαισθησία, προβάλλοντας λιγότερο αξιόπιστες μελλοντικές τιμές, ειδικά σε περιβάλλοντα ραγδαίας μεταβολής. Συνεπώς, για χώρες σε φάση εκθετικής ανάπτυξης, όπως η Πολωνία, τα ευέλικτα νευρωνικά μοντέλα προσφέρουν πιο αξιόπιστο εργαλείο σχεδιασμού πολιτικής.

Ισπανία

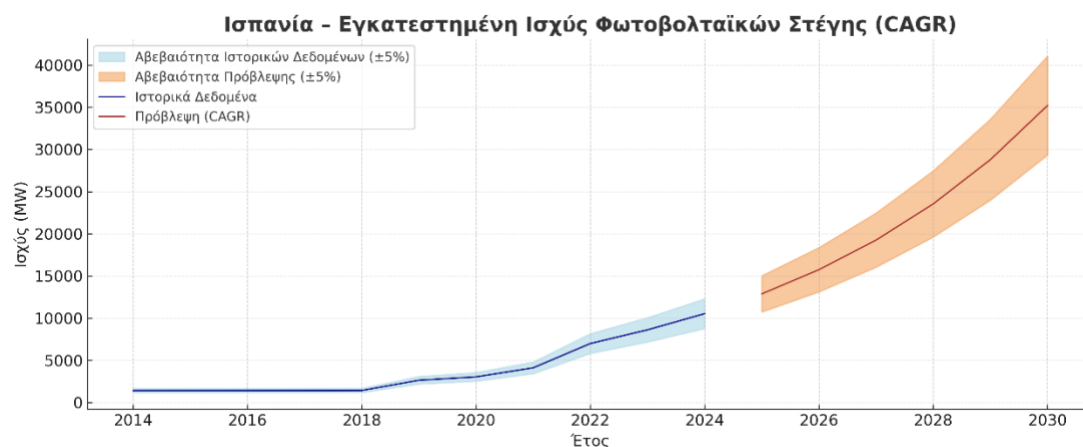
Το LSTM μοντέλο δείχνει μια δυναμική αλλά πιο ήπια πορεία ανάπτυξης. Η πρόβλεψη ακολουθεί την αυξητική πορεία των τελευταίων ετών, αλλά σταθεροποιείται μετά το 2028. Η ζώνη αβεβαιότητας παραμένει σχετικά σταθερή και ελεγχόμενη, γεγονός που υποδηλώνει ανθεκτικότητα του μοντέλου σε μικρές μεταβολές εισόδου. Αυτό ενισχύει την εμπιστοσύνη στις προβλέψεις, κυρίως για βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα.



Σχήμα 5-45: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ισπανία με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

Το μοντέλο CAGR προβλέπει ταχύτερη και πιο εκθετική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, ιδιαίτερα μετά το 2026. Η απόκλιση από το LSTM αυξάνεται σταδιακά, κάτι που οφείλεται στην απλοποιημένη υπόθεση σταθερού ρυθμού ανάπτυξης. Αν και το CAGR προσφέρει εύκολη υλοποίηση, φαίνεται να υπερεκτιμά τη μακροπρόθεσμη δυναμική της αγοράς στην Ισπανία.

Η Ισπανία παρουσιάζει μία τάση σταθερής και ρεαλιστικής ανάπτυξης μέσω του LSTM, το οποίο ενσωματώνει καλύτερα την επιρροή των κοινωνικοπολιτικών παραμέτρων και πιθανών κορεσμών στην αγορά. Αντίθετα, το CAGR υποθέτει αδιάλειπτη επιτάχυνση, οδηγώντας σε πιθανή υπερεκτίμηση. Συνολικά, η LSTM προσέγγιση προσφέρει πιο ρεαλιστική εκτίμηση, με σταθερότερη συμπεριφορά απέναντι στις αβεβαιότητες.

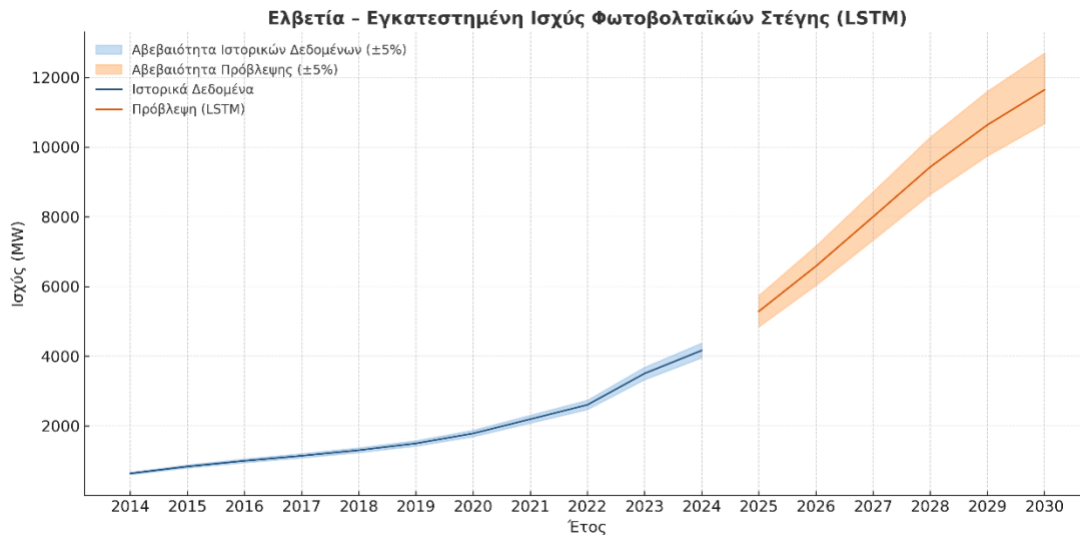


Σχήμα 5-46: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ισπανία με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

Ελβετία

Για την περίπτωση της Ελβετίας, οι δύο μέθοδοι πρόβλεψης παρουσιάζουν συγκλίνοντα αλλά όχι ταυτόσημα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, το μοντέλο LSTM καταγράφει μια σχετικά έντονη αύξηση στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στέγης από το 2025 έως το 2030. Η προβλεπόμενη καμπύλη είναι έντονα ανοδική, ιδίως μετά το 2026, ενώ η ζώνη αβεβαιότητας ($\pm 5\%$) διευρύνεται προοδευτικά, υποδηλώνοντας αυξημένη αβεβαιότητα στις μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις. Το εύρος της αβεβαιότητας ωστόσο παραμένει διαχειρίσιμο, γεγονός που αντανακλά τη σχετική σταθερότητα της αγοράς και τη δυνατότητα του μοντέλου να "μάθει" από τα πρότυπα των προηγούμενων ετών.

Από την άλλη πλευρά, το CAGR μοντέλο προβλέπει επίσης ανοδική πορεία, αλλά με πιο ομαλή και σταδιακή αύξηση. Η καμπύλη είναι πιο συγκρατημένη και γραμμική, υποδηλώνοντας έναν σταθερό μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης χωρίς ενσωμάτωση μη γραμμικών επιταχύνσεων. Η ζώνη αβεβαιότητας είναι παρόμοιου εύρους με αυτή του LSTM, γεγονός που δείχνει ότι και το CAGR ανταποκρίνεται με κάποια αξιοπιστία στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.



Σχήμα 5-47: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ελβετία με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

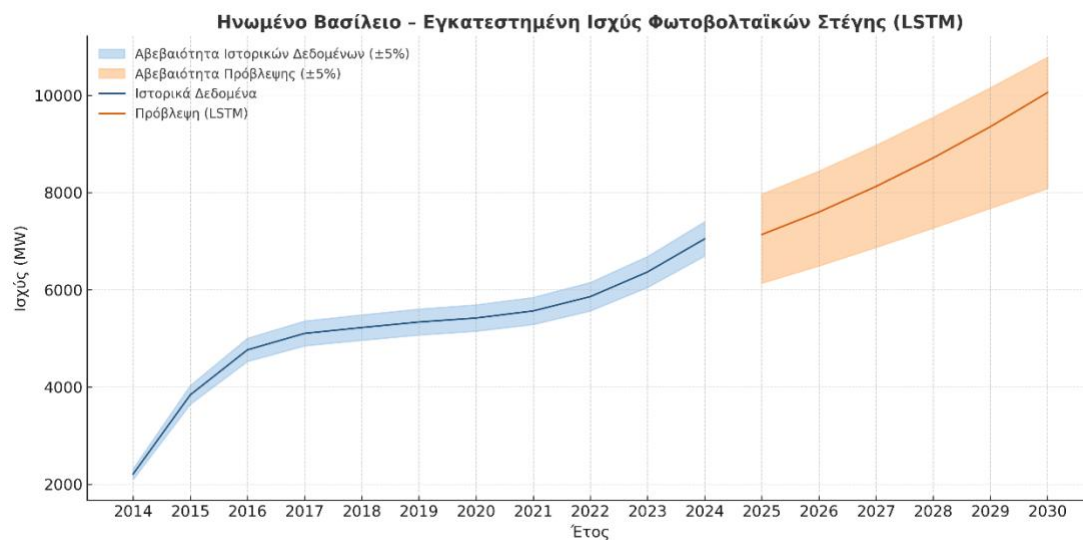
Συμπερασματικά, στην περίπτωση της Ελβετίας τα δύο μοντέλα δίνουν προβλέψεις με παρόμοια τάση αλλά διαφορετική ένταση. Το LSTM συλλαμβάνει δυναμικές που πιθανόν σχετίζονται με πιο πρόσφατες πολιτικές ενίσχυσης ή κοινωνικές αλλαγές, ενώ το CAGR λειτουργεί πιο συντηρητικά. Το γεγονός ότι η διαφορά μεταξύ των δύο προβλέψεων δεν είναι δραματική υποδηλώνει μια αγορά με σχετική σταθερότητα και λιγότερη ροπή προς απότομες μεταβολές.



Σχήμα 5-48: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στην Ελβετία με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

Ηνωμένο Βασίλειο

Το μοντέλο LSTM εμφανίζει προβλέψεις με μέτρια αλλά σαφώς διακριτή ανοδική πορεία. Το εύρος αβεβαιότητας ($\pm 5\%$) είναι σχετικά περιορισμένο σε σύγκριση με άλλες χώρες, υποδεικνύοντας σταθερότητα στην πρόβλεψη. Το εύρος ανοχής διευρύνεται ελαφρώς προς το 2030, αντανακλώντας την αύξηση της αβεβαιότητας όσο απομακρυνόμαστε από το ιστορικό δείγμα. Το μοντέλο φαίνεται να έχει «μάθει» το μοτίβο της σχετικής επιβράδυνσης μετά το 2016 και να προσαρμόζει τη μελλοντική πορεία σε πιο ρεαλιστικά επίπεδα.

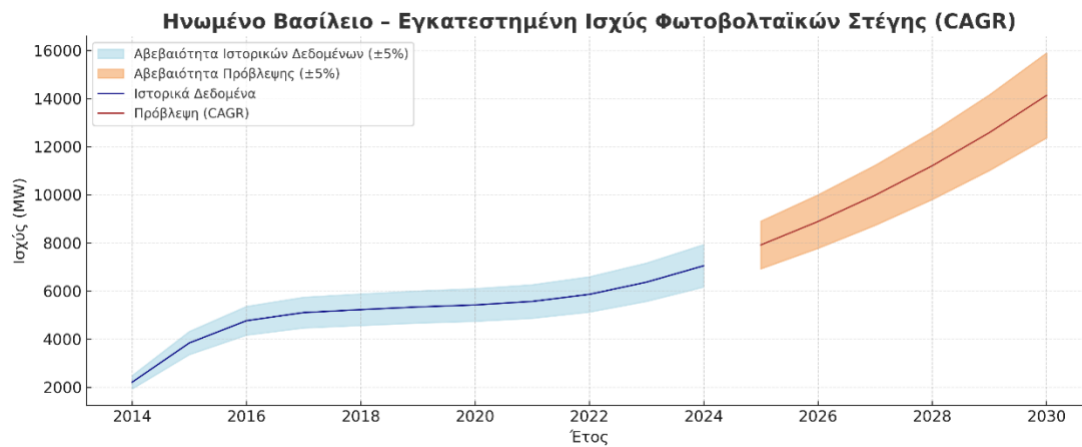


Σχήμα 5-49: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στο Ηνωμένο Βασίλειο με το μοντέλο LSTM (2025–2030).

Το CAGR παρουσιάζει πιο έντονη ανοδική τάση, με σταθερό ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης και συνεπές εύρος αβεβαιότητας. Παρότι και αυτό το μοντέλο δείχνει αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, η μονοτονία του ρυθμού ανάπτυξης περιορίζει την ικανότητά του να «πιάσει» πιο σύνθετες δυναμικές ή ενδεχόμενες κορεσμένες τάσεις στην αγορά.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, και τα δύο μοντέλα συγκλίνουν σχετικά ως προς την προβλεπόμενη πορεία, γεγονός που υποδεικνύει σταθερότητα των ιστορικών δεδομένων και ώριμη αγορά. Το LSTM παρουσιάζει μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα και ισχυρότερη ευαισθησία στις μεταβολές της τάσης, χωρίς όμως να υπερβάλλει, ενώ το CAGR λειτουργεί ως μια συντηρητική προσέγγιση βασισμένη σε γραμμική συνέχεια. Το στενότερο εύρος αβεβαιότητας στα διαγράμματα συγκριτικά με άλλες χώρες επιβεβαιώνει

ότι η αγορά του Ηνωμένου Βασιλείου παρουσιάζει μικρότερη μεταβλητότητα και μεγαλύτερη προβλεψιμότητα.



Σχήμα 5-50: Διάγραμμα ευαισθησίας πρόβλεψης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στέγης στο Ηνωμένο Βασίλειο με το μοντέλο CAGR (2025–2030).

6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

6.1 Κύρια Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία διερεύνησε τις δυνατότητες πρόβλεψης της διεξόδου των φωτοβολταϊκών στέγης (Rooftop PVs) σε αστικές περιοχές της Ευρώπης, αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα εγκατεστημένης ισχύος και συνδυάζοντας τεχνολογίες νευρωνικών δικτύων (LSTM) με μαθηματικά μοντέλα ανάπτυξης (Growth Model), επιτυγχάνοντας μια πολυδιάστατη ανάλυση της εξέλιξης του κλάδου, επιτρέποντας την εκτίμηση της δυναμικής των φωτοβολταϊκών στέγης έως το 2030.

Βασικό εύρημα της εργασίας αποτελεί το γεγονός ότι, παρά τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών ως προς το επίπεδο ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών στέγης, οι μέθοδοι πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκαν προσφέρουν αξιόπιστες εκτιμήσεις όταν εφαρμοστούν κατάλληλα, με το LSTM μοντέλο να διακρίνεται για την ικανότητά του να ενσωματώνει τη χρονική συσχέτιση των δεδομένων, προσφέροντας ακριβείς και ευαίσθητες ως προς τις μεταβολές του παρελθόντος προβλέψεις. Αντίστοιχα, το Growth Model προσφέρει μια πιο απλή αλλά στατιστικά εύρωστη προσέγγιση, κατάλληλη για περιπτώσεις όπου οι χρονοσειρές χαρακτηρίζονται από συνεπή ρυθμό ανάπτυξης.

Παράλληλα, η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε ($\pm 5\%$) ανέδειξε τον βαθμό επιρροής των αποκλίσεων των αρχικών δεδομένων στο τελικό αποτέλεσμα των εκτιμήσεων, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη ύπαρξης υψηλής αξιοπιστίας των αρχικών δεδομένων, αλλά και τη σημασία της συνεχούς παρακολούθησης των εξελίξεων της αγοράς, με τις δύο μεθόδους, αν και διαφορετικές ως προσέγγιση, να λειτουργούν συμπληρωματικά, προσφέροντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο ανάλυσης για την αξιολόγηση των στρατηγικών ενεργειακού σχεδιασμού. Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η αξιοποίηση πολυπαραγοντικών μοντέλων πρόβλεψης είναι απαραίτητη για την καταγραφή της πραγματικής δυναμικής των φωτοβολταϊκών στέγης στην Ευρώπη. Παράλληλα, επιβεβαιώνεται ότι η επιτυχής πρόβλεψη της αγοράς εξαρτάται όχι μόνο από την τεχνολογική αρτιότητα των αλγορίθμων, αλλά και από την ύπαρξη καλά τεκμηριωμένων, συνεχώς επικαιροποιημένων και αξιόπιστων δεδομένων, προσφέροντας χρήσιμες βάσεις για περαιτέρω ανάλυση, αλλά και για την υποστήριξη της χάραξης στοχευμένων πολιτικών ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών στέγης.

Οι Κάτω Χώρες ξεχωρίζουν ως η χώρα με τη γρηγορότερη εγκατεστημένη δυναμικότητα φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε στέγες (RTPV) μεταξύ των χωρών που αναλύθηκαν,

με την συνολική εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς της χώρας να αυξάνεται κατά 25 φορές μέσα σε μόλις δέκα χρόνια, από περίπου 1.007 MW σε πάνω από 26.060 MW, μεταξύ 2014 και 2024. Οι εξαιρετικά ευνοϊκές συνθήκες για την υιοθέτηση των ηλιακών συστημάτων στέγης στην ολλανδική αγορά υπογραμμίζονται από το γεγονός ότι αυτή η πορεία είναι ασύγκριτη σε σχετικούς όρους σε όλες τις άλλες χώρες του συνόλου δεδομένων.

Για την τάση αυτή ευθύνονται διάφορες μεταβλητές, με τις Κάτω Χώρες να έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε στέγες στο δείγμα, με εκτιμώμενο ποσοστό 80%, αποτελώντας σαφές σημάδι ότι η αγορά οικιακών και εμπορικών στεγών είναι ο κύριος μοχλός ανάπτυξης στη χώρα. Μια ατμόσφαιρα που ενθαρρύνει τη γρήγορη και ευρεία υιοθέτηση έχει δημιουργηθεί από τους ευνοϊκούς νόμους, τα κίνητρα και το καθιερωμένο πρόγραμμα net metering της ολλανδικής κυβέρνησης, καθώς και από το αυξανόμενο ενδιαφέρον του κοινού και των επιχειρήσεων για την καθαρή ενέργεια. Το παραπάνω παρατηρείται και από τις εκτελέσεις του κώδικά μας, όπου η παραγωγή αναμένεται να φτάσει τα 34630.48299MW το 2030.

Επιπλέον, το μοτίβο που παρατηρείται στις ετήσιες στατιστικές δείχνει μια μακροπρόθεσμη αλλαγή στο ενεργειακό τοπίο της χώρας και όχι μια παροδική μόδα, με τις δραματικές αυξήσεις από το 2018 έως το 2024, όταν οι συνολικές εγκαταστάσεις εκτοξεύτηκαν από περίπου 4.600 MW σε πάνω από 26.000 MW, να αναδεικνύουν μια ασυνήθιστη επιτάχυνση της διεύθυνσης σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες.

Η συστηματική αξιοποίηση τέτοιων μοντέλων θα μπορούσε να συμβάλει ουσιαστικά στη διαμόρφωση ρεαλιστικών πολιτικών στόχων για τα φωτοβολταϊκά στέγης στο πλαίσιο της Πράσινης Μετάβασης στην Ευρώπη. Οι προβλέψεις που παρέχονται μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο για φορείς χάραξης πολιτικής, ρυθμιστικές αρχές και ενεργειακούς αναλυτές στη διαδικασία λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων.

6.1.1 Συμπεράσματα για την εξέλιξη των RTPV στην Ελλάδα

Η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών στέγης στην Ελλάδα κατά την περίοδο 2014–2024 καταδεικνύει μια αξιοσημείωτα σταθερή και επιταχυνόμενη ανάπτυξη, όπου από τα περίπου 1.168 MW το 2014, η εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε στα 4.333 MW το 2024, επιβεβαιώνοντας τον αυξανόμενο ρόλο των RTPV ως κινητήρια δύναμη της ενεργειακής μετάβασης. Ιδιαίτερα από το 2020 και μετά, καταγράφηκε ραγδαία

επιτάχυνση της ανάπτυξης, με το ετήσιο ρυθμό αύξησης να υπερβαίνει το 25–30%, αντανακλώντας την ενίσχυση των κινήτρων, την αύξηση της ευαισθητοποίησης των καταναλωτών και την τεχνολογική πρόοδο.

Σύμφωνα με το μοντέλο πρόβλεψης, αυτή η τάση αναμένεται να συνεχιστεί και στο άμεσο μέλλον, με τις εκτιμήσεις για την περίοδο 2025–2030 να καταδεικνύουν ότι η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στέγης στην Ελλάδα θα υπερβεί το όριο των 15 GW έως το τέλος της δεκαετίας, φτάνοντας περίπου τα 15,361 MW το 2030. Η σταδιακή αυτή κλιμάκωση της ανάπτυξης επιβεβαιώνει τον στρατηγικό ρόλο των RTPV στο ενεργειακό μείγμα της χώρας, καθιστώντας τα κεντρικό πυλώνα για την επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών κλιματικών στόχων.

Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών στέγης στην Ελλάδα δείχνει μια επιτυχημένη μετάβαση από περιορισμένες και σποραδικές εγκαταστάσεις στο παρελθόν, προς μια νέα εποχή ενεργειακής αυτονομίας, με το δυναμικό της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με τη συνεχιζόμενη στήριξη της Πολιτείας, να δημιουργεί τις συνθήκες για περαιτέρω ενίσχυση της διείσδυσης των RTPV στην ελληνική αγορά και καθιερώνει τον κλάδο ως βασικό μοχλό της πράσινης ανάπτυξης της χώρας.

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία προσφέρει ένα πρώτο πλαίσιο ανάλυσης της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών στέγης στην Ευρώπη, αλλά αφήνει ανοικτά πολλά πεδία για περαιτέρω εμβάθυνση και ανάπτυξη πιο σύνθετων εργαλείων πρόβλεψης, με ένα βασικό βήμα να είναι η ενσωμάτωση πρόσθετων παραμέτρων, όπως δημογραφικά στοιχεία, κλιματολογικά δεδομένα, τοπικά μέτρα στήριξης, ρυθμιστικές αλλαγές ή στοιχεία καταναλωτικής συμπεριφοράς, επιτρέποντας την κατασκευή πολυπαραγοντικών μοντέλων πρόβλεψης που να αντανακλούν καλύτερα την πολυπλοκότητα της αγοράς. Παράλληλα, θα είχε αξία να διερευνηθεί η συνδυαστική αξιοποίηση διαφορετικών τεχνικών μηχανικής μάθησης, πέρα από το LSTM, όπως τα Transformer Models ή οι μέθοδοι Bayesian Inference, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην αβεβαιότητα των δεδομένων, αλλά και μοντέλα που να ενσωματώνουν σενάρια ανάλυσης ρίσκου, επιτρέποντας την εκτίμηση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων ως συνάρτηση των κλιματικών, οικονομικών ή γεωπολιτικών συνθηκών.

Επιπλέον, θα μπορούσε να διερευνηθεί η συνεισφορά της γεωγραφικής ανάλυσης υψηλής ανάλυσης (spatially resolved forecasting), αξιοποιώντας δεδομένα GIS και δορυφορικά στοιχεία για να εντοπιστούν περιοχές με υψηλή δυναμική εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στέγης, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τον πολεοδομικό και ενεργειακό σχεδιασμό των αστικών κέντρων. Τέλος, θα ήταν χρήσιμη η ανάπτυξη μιας δυναμικής βάσης δεδομένων που θα συλλέγει και θα επικαιροποιεί συνεχώς δεδομένα εγκατεστημένης ισχύος, επιμέρους κλάδων της αγοράς και σχετικών δεικτών, διευκολύνοντας την περαιτέρω αξιολόγηση των επιπτώσεων των ενεργειακών πολιτικών, προσφέροντας ένα εύχρηστο εργαλείο τόσο για ερευνητές όσο και για φορείς χάραξης στρατηγικών.

Κατάλογος Βιβλιογραφικών Αναφορών

Badran G, Dhimish M. Comprehensive study on the efficiency of vertical bifacial photovoltaic systems: a UK case study. *Scientific Reports*. 2024 Aug 8;14(1):18380.

Book T, Sayigh A. Photovoltaic Applications in the Built Environment in the UK. In *Reducing the Effects of Climate Change Using Building-Integrated and Building-Applied Photovoltaics in the Power Supply* 2024 Jan 12 (pp. 351-369). Cham: Springer Nature Switzerland.

European Commission (2022). *EU Solar Energy Strategy*. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221>

European Commission. (2022). *REPowerEU Plan*. Online: <https://energy.ec.europa.eu>

Gan, Y., Duan, Q. (2019). Sensitivity Analysis Methods. In: Duan, Q., Pappenberger, F., Wood, A., Cloke, H., Schaake, J. (eds) *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39925-1_65

Gulkowski S, Krawczak E. Long-Term Energy Yield Analysis of the Rooftop PV System in Climate Conditions of Poland. *Sustainability*. 2024 Apr 17;16(8):3348.

IEA-PVPS. (2023). *Snapshot of Global PV Markets 2023*. International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme.

IRENA (2025), *Renewable capacity statistics 2025*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Kitsopoulou A, Pallantzas D, Bellos E, Tzivanidis C. Mapping the Potential of Zero-Energy Building in Greece Using Roof Photovoltaics. *Designs*. 2024 Aug 1;8(4).

Mellot A, Moretti C, Tröndle T, Patt A. Mitigating future winter electricity deficits: A case study from Switzerland. *Energy Conversion and Management*. 2024 Jun 1;309:118426.

Nguyen, M. & Braeye, Toon & Hens, N. & Faes, Christel. (2021). Multivariate phenomenological models for real-time short-term forecasts of hospital capacity for COVID-19 in Belgium from March to June 2020. *Epidemiology and Infection*. 150. 1-30. [10.1017/S0950268821002491](https://doi.org/10.1017/S0950268821002491).

Rodríguez-García, M., et al. (2024). Energy Policy Reforms and Rooftop PV Diffusion in Spain*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113355.

Saez R, Boer D, Shobo AB, Vallès M. Self-consumption potential and surplus compensation policy impact on rooftop photovoltaic systems in Spain. *Renewable Energy*. 2024 Aug 1;229:120713.

Santiago I, Palacios-Garcia EJ, Gonzalez-Redondo M, Arenas-Ramos V, Simon B, Hayes BP, Moreno-Munoz A. Assessment of generation capacity and economic viability of photovoltaic systems on urban buildings in southern Spain: A socioeconomic, technological, and regulatory analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024 Oct 1;203:114741.

Schardt J, te Heesen H. Performance of roof-top PV systems in selected European countries from 2012 to 2019. *Solar Energy*. 2021 Mar 15;217:235-44.

Schardt, M., & te Heesen, B. (2021). Assessment of Rooftop PV Potentials and Grid Integration in the EU. *Solar Energy*, 225, 113–129.

SolarPower Europe. (2023). *EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027*. SolarPower Europe. Online: <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/eu-market-outlook-for-solar-power-2023-2027>

SolarPower Europe. (2024). *EU Market Outlook for Solar Power 2024-2028*. SolarPower Europe. <https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlooks/eu-market-outlook-for-solar-power-2024-2028>

Suresh, V., Janik, P., Rezmer, J., & Leonowicz, Z. (2020). Forecasting Solar PV Output Using Convolutional Neural Networks with a Sliding Window Algorithm. *Energies*, 13(3), 723. <https://doi.org/10.3390/en13030723>

Tomczyk D, Łapniewska Z. Solar panels on every rooftop? Photovoltaics boom in Poland and the role of the European Union funds. *Energy Research & Social Science*. 2025 Jul 1;125:104107.

Trutnevyte E, Sasse JP, Heinisch V, Đukan M, Gabrielli P, Garrison J, Jain P, Renggli S, Sansavini G, Schaffner C, Schwarz M. Renewable energy outlook for Switzerland. Université de Genève. 2024 Jan.

Vourdoubas J. Use of Solar Photovoltaics for the Achievement of the National Goals for Energy and Climate in Greece. *European Journal of Applied Science, Engineering and Technology*. 2024 Sep 1;2(5):4-15.