



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ανάπτυξη υποστηρικτικού πλαισίου για την προσομοίωση σεναρίων
διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό
τομέα κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης»**

Μανιάς Νικόλαος

Επιβλέπων:
Φλάμος Αλέξανδρος
Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ.

Πειραιάς, Σεπτέμβριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάπτυξη υποστηρικτικού πλαισίου για την προσομοίωση σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης»

“Developing a supportive framework to simulate diffusion scenarios of small-scale solar photovoltaic systems in European Union member states’ residential sector”

Μανιάς Νικόλαος

Επιβλέπων:

Φλάμος Αλέξανδρος

Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....

Φλάμος Αλέξανδρος

Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ.

.....

Σιοντόρου Χριστίνα

Αν. Καθηγήτρια ΠΑ.ΠΕΙ

.....

Ειρηνάκης Παύλος

Επ. Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ.

Πειραιάς, Σεπτέμβριος 2023

.....
Μανιάς Νικόλαος

Διπλωματούχος Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας ΠΑ.ΠΕΙ.

Copyright © Μανιάς Νικόλαος, Σταύρακας Βασίλειος, Φλάμος Αλέξανδρος. 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

ΔΗΛΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Βιομηχανική Διοίκηση και Τεχνολογία με ειδίκευση στη Διαχείριση Ενέργειας και Περιβάλλοντος έχει συγγραφεί από εμένα προσωπικά και δεν έχει υποβληθεί, ούτε έχει εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών, στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό. Οι πηγές για την εκπόνηση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αναφέρονται στο σύνολό τους, δίνοντας πλήρεις αναφορές στους συγγραφείς, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο.

Ο δηλών,
Μανιάς Νικόλαος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία (ΜΔΕ) πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα του Πανεπιστημίου Πειραιώς και του τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, την ακαδημαϊκή χρονιά 2022-2023.

Χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του καθηγητή μου, κύριου Αλέξανδρου Φλάμου (Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ. και Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.), η διεκπεραίωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη. Επιπροσθέτως, θέλω να εκφράσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στο μεταδιδάκτορα ερευνητή Βασίλη Σταύρακα (Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.), ο οποίος με στήριξε, με καθοδήγησε και μου αφιέρωσε πολύτιμο χρόνο καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της εν λόγω μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την οικογένειά μου, τους γονείς μου, Ιωάννη Μανιά και Μαρία Μανιατάκη, καθώς επίσης και τη σύντροφό μου, Κωνσταντίνα Αναστασιάδου (Διπλωματούχος Γεωπόνος Γ.Π.Α.). Χωρίς την πίστη, την υποστήριξη και την κατανόησή τους, δεν θα είχα την τύχη να εκπονήσω τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Η συμβολή τους στην μέχρι τώρα πορεία και εξέλιξή μου είναι ανεκτίμητη.

Πειραιάς
Σεπτέμβριος 2023

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ-ΕΙΚΟΝΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	x
ABSTRACT	xi
ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ & ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	xii
1. Εισαγωγή	1
1.1. Αντικείμενο και σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας	1
1.2. Φάσεις υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας	1
1.3. Δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	2
2. Θεωρητικό υπόβαθρο	4
2.1. Κλιματική κρίση	4
2.2. Ενεργειακή μετάβαση & στόχοι	5
2.3. Φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας & ηλιακό δυναμικό.....	7
2.4. Υπάρχουσα κατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση	9
2.5. Ανάγκη για ενεργειακό συμψηφισμό και αυτοπαραγωγή με αποθήκευση στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης	12
3. Μεθοδολογικό πλαίσιο	16
3.1. Μοντελοποίηση βάσει πρακτόρων (“agent-based modelling”).....	16
3.2. Το υπολογιστικό εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης βάσει πρακτόρων “ATOM”.....	17
3.3. Μεθοδολογικό πλαίσιο βαθμονόμησης του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”... 20	
4. Ανάπτυξη υποστηρικτικού πλαισίου μοντελοποίησης στα υπό μελέτη κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	25
4.1. Επιλογή των υπό μελέτη κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	25
4.2. Ενεργές πολιτικές υποστήριξης διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα στα υπό μελέτη Κράτη Μέλη	28
4.2.1. Γαλλία	29
4.2.2. Δανία.....	32
4.2.3. Ελλάδα	34
4.2.4. Ισπανία	37
4.2.5. Πορτογαλία.....	39
4.2.6. Πολωνία	42
4.2.7. Ενεργά εργαλεία υποστήριξης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα ανά υπό μελέτη Κράτος Μέλος.....	45
4.3. Χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος των υπό μελέτη κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης	46
4.3.1. Γαλλία	46
4.3.2. Δανία.....	49
4.3.3. Ελλάδα	50
4.3.4. Ισπανία	53

4.3.5. Πορτογαλία.....	55
4.3.6. Πολωνία	57
5. Βαθμονόμηση και ανάλυση ευαισθησίας του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” στα υπό μελέτη κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης	60
5.1. Γαλλία	60
5.2. Δανία.....	64
5.3. Ελλάδα	69
5.4. Ισπανία	74
5.5. Πορτογαλία	79
6. Εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” στον οικιακό τομέα της Ελλάδας	85
6.1. Αποζημίωση με επιδότηση τύπου “feed-in tariff”	86
6.2. Αποζημίωση μέσω σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού	89
6.3. Αποζημίωση μέσω σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού με αποθήκευση	93
7. Συμπεράσματα	98
7.1. Σύνοψη και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	98
7.2. Μελλοντική έρευνα.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ & ΠΗΓΕΣ	103

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ-ΕΙΚΟΝΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1. Δυναμικό φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης ανά κράτος μέλος της ΕΕ (εκφρασμένο σε παραγόμενες GWh ανά έτος). Πηγή: Bodis et al., 2019.....	8
Διάγραμμα 2. Μέση ολική οριζόντια ακτινοβολία ανά ημέρα για τα κράτη μέλη της ΕΕ.....	8
Διάγραμμα 3. Μερίδιο εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά κράτος μέλος της ΕΕ σε σχέση με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών της ΕΕ.....	10
Διάγραμμα 4. Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ανά τομέα παγκοσμίως για τη περίοδο 2010-2021. Πηγή: IEA, 2022.....	11
Διάγραμμα 5. Εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά (εκτός CSP) ανά κάτοικο για τα κράτη μέλη της ΕΕ (δεδομένα 2022).....	12
Διάγραμμα 6. Εγκατεστημένη ισχύς ανά ΑΠΕ και ανά κάτοικο της ΕΕ για το 2021.....	13
Διάγραμμα 7. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στα κράτη μέλη της ΕΕ για το 2021.....	13
Διάγραμμα 8. Σύγκριση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας με το LCOE των Φ/Β (με αποθήκευση) στη Γερμανία. Πηγή: SolarPower Europe, 2021.....	15
Διάγραμμα 9. Βαθμός υιοθέτησης Φ/Β μικρής κλίμακας στην Ελλάδα για την περίοδο 2018-2025 συναρτήσει της μείωσης του κόστους επένδυσης σε αποθήκευση ενέργειας (από 5% μέχρι 10%). Πηγή: Stavrakas et al., 2019.....	19
Διάγραμμα 10. Χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Γαλλία (€/MWh). Πηγή: Insee, 2022.....	30
Διάγραμμα 11. Εγκατεστημένη ισχύς για ιδιοκατανάλωση από Φ/Β στη Γαλλία (σε MW). Πηγή: Statista, 2022.....	31
Διάγραμμα 12. Ενεργειακή κατανάλωση Δανίας ανά πηγή ενέργειας. Πηγή: BP, 2022.....	33
Διάγραμμα 13. Μείγμα ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας την περίοδο 2013-2023. Πηγή: The Green Tank, 2023.....	35
Διάγραμμα 14. Χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ισπανία (€/MWh). Πηγή: Statista, 2022.....	38
Διάγραμμα 15. Χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Πορτογαλία (€/MWh). Πηγή: Statista, 2022.....	41
Διάγραμμα 16. Μερίδιο πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή της Πολωνίας (σε TWh). Πηγή: International Trade Administration, 2022.....	43
Διάγραμμα 17. Χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Πολωνία (σε zloty/MWh). Πηγή: Statista, 2022.....	44
Διάγραμμα 18. Εγκατεστημένη ισχύς (σε GW) και πλήθος φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Πολωνίας για την περίοδο 2015-2021. Πηγή: L. Wicki et al., 2022.....	44
Διάγραμμα 19. Αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Γαλλίας για την περίοδο 2016-2022.....	47
Διάγραμμα 20. Εξέλιξη λιανικής τιμής πώλησης για τα νοικοκυριά στη Γαλλία την περίοδο 2016-2022 (σε €/kWh). Πηγή: Statista, 2022.....	48
Διάγραμμα 21. Εγκατεστημένη ισχύς και πλήθος εγκαταστάσεων Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Δανίας την περίοδο 2011-2028.....	49
Διάγραμμα 22. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας για την περίοδο 2010-2021.....	51
Διάγραμμα 23. Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά στην Ελλάδα την περίοδο 2011-2022. Πηγή: Eurostat, 2023.....	52

Διάγραμμα 24. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ισπανίας για την περίοδο 2013-2021.....	53
Διάγραμμα 25. Λιανική τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά στην Ισπανία την περίοδο 2011-2021. Πηγή: Statista, 2022.	54
Διάγραμμα 26. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στην Πορτογαλία την περίοδο 2010-2018. Πηγή: IEA (“National Survey Report-Portugal”), 2018.	55
Διάγραμμα 27. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Πορτογαλίας την περίοδο 2011-2020.	56
Διάγραμμα 28. Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά της Πορτογαλίας την περίοδο 2010-2020. Πηγή: Statista, 2022.....	56
Διάγραμμα 29. Εγκατεστημένη ισχύς και πλήθος εγκαταστάσεων Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Πολωνίας την περίοδο 2015-2022.....	58
Διάγραμμα 30. Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά της Πολωνίας την περίοδο 2010-2022. Πηγή: Statista, 2022.....	59
Διάγραμμα 31. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στη Γαλλία την περίοδο 2013-2022.....	60
Διάγραμμα 32. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στη Γαλλία την περίοδο 2013-2022.	60
Διάγραμμα 33. Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίες “li-ion”) στη Γαλλία την περίοδο 2013-2022.	61
Διάγραμμα 34. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στη Γαλλία την περίοδο 2013-2022.....	61
Διάγραμμα 35. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή > 0,02 για τη Γαλλία.	62
Διάγραμμα 36. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για τη Γαλλία με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων.	63
Διάγραμμα 37. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στη Δανία την περίοδο 2012-2018.....	64
Διάγραμμα 38. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στη Δανία την περίοδο 2012-2018.	65
Διάγραμμα 39. Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίες “li-ion”) στη Δανία την περίοδο 2012-2018.	65
Διάγραμμα 40. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στη Δανία την περίοδο 2012-2018.....	66
Διάγραμμα 41. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή > 0,02 για τη Δανία.	67
Διάγραμμα 42. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για τη Δανία με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων.	68
Διάγραμμα 43. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στην Ελλάδα την περίοδο 2010-2021. Πηγή: ΔΑΠΕΕΠ, 2023.	69
Διάγραμμα 44. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα την περίοδο 2010-2021.	70
Διάγραμμα 45. Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίες “li-ion”) στην Ελλάδα την περίοδο 2010-2021.....	70
Διάγραμμα 46. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στην Ελλάδα την περίοδο 2010-2021.....	71
Διάγραμμα 47. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή > 0,02 για την Ελλάδα . Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.	72

Διάγραμμα 48. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την Ελλάδα με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων. Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.	73
Διάγραμμα 49. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στην Ισπανία την περίοδο 2014-2021.....	74
Διάγραμμα 50. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στην Ισπανία την περίοδο 2014-2021.	75
Διάγραμμα 51. Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίες “li-ion”) στην Ισπανία την περίοδο 2014-2021.....	75
Διάγραμμα 52. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στην Ισπανία την περίοδο 2014-2021.....	76
Διάγραμμα 53. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή > 0,02 για την Ισπανία.....	77
Διάγραμμα 54. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την Ισπανία με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων.	78
Διάγραμμα 55. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στην Πορτογαλία την περίοδο 2012-2020.....	79
Διάγραμμα 56. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στην Πορτογαλία την περίοδο 2012-2020.....	80
Διάγραμμα 57. Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίες “li-ion”) στην Πορτογαλία την περίοδο 2012-2020.....	80
Διάγραμμα 58. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στην Πορτογαλία την περίοδο 2012-2020.....	81
Διάγραμμα 59. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή > 0,02 για την Πορτογαλία	82
Διάγραμμα 60. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την Πορτογαλία με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων.	83
Διάγραμμα 61. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “FiT”. ..	86
Διάγραμμα 62. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “FiT” και μονοπατιού μετάβασης “People Powered (PP)”.	87
Διάγραμμα 63. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “FiT” και μονοπατιού μετάβασης “Government Directed (GD)”.....	88
Διάγραμμα 64. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “FiT” και μονοπατιού μετάβασης “Market Driven (MD)”.....	88
Διάγραμμα 65. Πρόβλεψη πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “FiT” (για όλα τα μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης).	89
Διάγραμμα 66. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “NEM”.90	90
Διάγραμμα 67. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM” και μονοπατιού μετάβασης “People Powered (PP)”.....	91
Διάγραμμα 68. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM” και μονοπατιού μετάβασης “Government Directed (GD)”.....	91

Διάγραμμα 69. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM” και μονοπατιού μετάβασης “Market Driven (MD)”.....	92
Διάγραμμα 70. Πρόβλεψη πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “NEM” (για όλα τα μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης).....	93
Διάγραμμα 71. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “NEM_BESS”.....	94
Διάγραμμα 72. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM_BESS” και μονοπατιού μετάβασης “People Powered (PP)”.....	95
Διάγραμμα 73. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM_BESS” και μονοπατιού μετάβασης “Government Directed (GD)”.....	95
Διάγραμμα 74. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM_BESS” και μονοπατιού μετάβασης “Market Driven (MD)”.....	96
Διάγραμμα 75. Πρόβλεψη πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “NEM_BESS” (για όλα τα μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης).....	97

Εικόνες

Εικόνα 1. Μέση ολική οριζόντια ακτινοβολία στην Ευρώπη για την περίοδο 1999-2020. Πηγή: Solargis, 2020.	7
Εικόνα 2. Οπτική απεικόνιση των παραμέτρων που διέπουν την συμπεριφορά των «πρακτόρων» και βαθμονομούνται. Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.....	23
Εικόνα 3. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για τη Γαλλία.	62
Εικόνα 4. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για τη Δανία.	67
Εικόνα 5. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για την Ελλάδα. Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.....	72
Εικόνα 6. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για την Ισπανία.	77
Εικόνα 7. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για την Πορτογαλία.....	82
Εικόνα 8. Σύνολο μονοπατιών ενεργειακής μετάβασης και χαρακτηριστικών τους στα πλαίσια αυτής. Πηγή: Süsser et al., 2021.	86

Πίνακες

Πίνακας 1. Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων (σε MW) στο σύνολο της ΕΕ για την περίοδο 2017-2021.....	9
Πίνακας 2. LCOE (€/kWh) ανά μηχανισμό και ανά εγκατάσταση (1,5 και 2 kW).	14

Πίνακας 3. Περιγραφή των “agent-related” παραμέτρων που προσομοιώνει το υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” και επηρεάζουν την απόφαση των «πρακτόρων» σχετικά με την επένδυση σε Φ/Β μικρής κλίμακας.....	17
Πίνακας 4. Είσοδοι και έξοδοι του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”.....	19
Πίνακας 5. Αρχικά εύρη τιμών των παραμέτρων που σχετίζονται με τους «πράκτορες».....	23
Πίνακας 6. “Feed-in tariff” ανά κατηγορία φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στην Γαλλία.....	30
Πίνακας 7. Κλιματικοί και ενεργειακοί στόχοι της Πολωνίας για την περίοδο 2030-2040...	42
Πίνακας 8. Ενεργά εργαλεία υποστήριξης διάχυσης Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα ανά υπό μελέτη Κράτος Μέλος.....	45
Πίνακας 9. Κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στέγης στον οικιακό τομέα της Γαλλίας (σε €/W).....	47
Πίνακας 10. Κόστος μπαταρίας ανά εγκατάσταση Φ/Β στη Γαλλία.....	47
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Γαλλίας.....	48
Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Δανίας.....	50
Πίνακας 13. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Ελλάδας.....	53
Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Ισπανίας.....	54
Πίνακας 15. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Πορτογαλίας.....	57
Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Πολωνίας.....	59
Πίνακας 17. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για τη Γαλλία μετά τη βαθμονόμηση.....	63
Πίνακας 18. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για τη Δανία μετά την βαθμονόμηση.....	68
Πίνακας 19. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για την Ελλάδα μετά την βαθμονόμηση..	73
Πίνακας 20. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για την Ισπανία μετά την βαθμονόμηση.	78
Πίνακας 21. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για την Πορτογαλία μετά την βαθμονόμηση.....	83
Πίνακας 22. Αποτελέσματα (προβλέψεις) της προσομοίωσης των υπό μελέτη σεναρίων (“FiT”, “NEM”, “NEM_BESS”) για τη μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας με χρονικό ορίζοντα το 2030.....	99

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Λαμβάνοντας υπόψιν τους κλιματικούς και ενεργειακούς στόχους που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, και τη μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα έως το 2050, η ανάγκη για διάχυση τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές καθίσταται όλο και πιο επιτακτική.

Βασικός στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι να ερευνηθεί το πώς οι κάτοικοι συγκεκριμένων κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (δηλ. Γαλλία, Δανία, Ελλάδα, Ισπανία, Πορτογαλία, και Πολωνία) μπορούν να έχουν έναν μεγαλύτερο ρόλο στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα και να επιδράσουν στη διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας, με τον κατάλληλο σχεδιασμό ενεργειακής πολιτικής. Ωστόσο, η γνώση γύρω από το πώς διάφοροι κοινωνικοπολιτικοί παράγοντες επηρεάζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων των κατοίκων, βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο.

Διευρύνοντας την υπάρχουσα γνώση στην επιστημονική βιβλιογραφία, η παρούσα εργασία στοχεύει στο να εξετάσει τη δυναμική διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (στέγης) στον οικιακό τομέα των προαναφερθέντων κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσω της χρήσης του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης βάσει πρακτόρων “ATOM”, το οποίο αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Τεχνοοικονομικής Ενεργειακών Συστημάτων (“Technoeconomics of Energy Systems laboratory - TEESlab”).

Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη της πιθανής εξέλιξης διαφορετικών σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας πραγματοποιήθηκε υπό διαφορετικά σχήματα ενεργειακής πολιτικής, όπως είναι ο «ενεργειακός συμψηφισμός» (“net metering”) ή ο «συμψηφισμός λογαριασμού» (“net billing”) και υπό τρία (3) διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια μετάβασης (“socioeconomic storylines/transition pathways”) για κάθε σχήμα. Επισημαίνεται ότι η εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων στον οικιακό τομέα, εκτελείται μόνο για την Ελλάδα, ωστόσο η ανάπτυξη του υποστηρικτικού πλαισίου για εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” και στα προαναφερθέντα Κράτη Μέλη, πραγματοποιείται κανονικά στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Επισημαίνεται πως η βαθμονόμηση του εργαλείου “ATOM” δεν εφαρμόζεται για την περίπτωση της Πολωνίας, λόγω έλλειψης διαθέσιμων δεδομένων.

Τα αποτελέσματα της εργασίας καταδεικνύουν ότι η συμπεριφορά των «πρακτόρων» διαφοροποιείται από χώρα σε χώρα με γνώμονα τα διαφορετικά τεχνοοικονομικά δεδομένα που χαρακτηρίζουν την κάθε χώρα. Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καταδεικνύουν (ποσοτικά) ότι ο συνδυασμός διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής μπορεί να είναι απαραίτητος για την προαγωγή και υποστήριξη της αυτοπαραγωγής και ιδιοκατανάλωσης στην Ελλάδα. Το ακριβές μονοπάτι που οδηγεί στην επίτευξη των ενεργειακών στόχων ποικίλει από χώρα σε χώρα, ενώ η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει προτάσεις που αφορούν τη χάραξη πολιτικών για την περίπτωση μελέτης της Ελλάδας.

Λέξεις-κλειδιά: Ενεργειακή μετάβαση, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, Μοντελοποίηση και προσομοίωση ενεργειακών συστημάτων, Ποσοτικοποίηση αβεβαιοτήτων, Ηλιακό δυναμικό, Ανάλυση ευαισθησίας, Υιοθέτηση τεχνολογιών, Μοντελοποίηση βάσει πρακτόρων, Προσομοίωση πιθανών εξελίξεων, Ενεργειακή και κλιματική πολιτική.

ABSTRACT

Given the climate and energy targets set by the European Union towards the transition to climate neutrality by 2050, the need for adoption and further diffusion of electricity production technologies from renewable energy sources becomes more and more imperative.

In this context, the main objective of this postgraduate diploma thesis is to investigate how the citizens of specific European Union member states (i.e., France, Denmark, Greece, Spain, Portugal, and Poland) can play a greater role in the future energy system and the diffusion of small-scale rooftop photovoltaic systems through the appropriate energy policy planning. However, scientific knowledge about the way that the sociopolitical context typically affects citizens' decision-making processes is still on early stage.

In order to address this gap in the scientific literature, this thesis aims to examine the rooftop solar panels' potential in the residential sector of the aforementioned European Union's member states using the **Agent-based Technology adOption Model** ("ATOM"), developed by the Technoeconomics of Energy Systems laboratory (TEESlab).

More specifically, possible evolutions of different diffusion scenarios for small-scale solar photovoltaic systems are modelled with the use of the "ATOM" modelling tool under different energy policy schemes, like "net metering", or "net billing", and under three (3) different socioeconomic storylines/transition pathways for each policy scheme under study. Note that these forward-looking simulations are only performed for the case of Greece to test and demonstrate in full length the applicability and usefulness of the supportive modelling framework developed. On the other hand, the supportive framework developed in this thesis, mainly focusing on the calibration of the "ATOM" modelling tool, is fully presented for all the aforementioned Member States under study, except for the case of Poland due to lack of data.

Results indicate that agents' (consumers'/citizens') behavior is differentiated from country to country, driven by different technoeconomic data representing the contextual socioeconomic differences in each Member State. Finally, results reveal that a combination of different energy policy schemes may be needed in order to promote and support prosumerism in Greece. The exact pathway for the achievement of the energy goals set varies from country to country, while the thesis provides specific policy recommendations and implications for the case of Greece.

Keywords: Energy transition, Renewable energy sources, Small-scale photovoltaic systems, Energy system modelling, Uncertainty quantification, Solar power, Sensitivity analysis, Technology adoption/diffusion, Agent-based modelling, Forward-looking simulations, Energy and climate policy.

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ & ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

“Feed-in Premium (FiP)”: Εργαλείο ενεργειακής πολιτικής, με βάση το οποίο αποζημιώνονται οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας. Στα πλαίσια του “FiP” οι παραγωγοί που επιλέγονται αποζημιώνονται σε μια τιμή για την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν, η οποία είναι υψηλότερη από την χονδρεμπορική τιμή κατά ένα ποσοστό (“premium price”).

“Feed-in Tariff (FiT)”: Η τιμή ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας με την οποία αποζημιώνεται ο αυτοπαραγωγός (ή “prosumer”) που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Ο αυτοπαραγωγός (ή “prosumer”) ηλεκτρικής ενέργειας αποζημιώνεται στο ύψος αυτής της τιμής από τον προμηθευτή. Το ύψος του FiT καθορίζεται από την κυβέρνηση της εκάστοτε χώρας μέσω ρυθμιστικών πλαισίων και αποτελεί σταθερή τιμή (“fixed price”).

“Levelised Cost of Energy (LCOE)”: Τεχνοοικονομικό μέγεθος που περιγράφει το κόστος ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh ή €/MWh) σε όρους παρούσας αξίας. Είναι το άθροισμα όλων των χρηματοοικονομικών εισόδων (“input”) που μπαίνουν σε ένα σύστημα (κόστος κεφαλαίου, κόστος λειτουργίας & συντήρησης, κ.λπ.) προς το άθροισμα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην διάρκεια ζωής μιας εγκατάστασης (“output”).

Αγορά Εξισορρόπησης (“Balancing Electricity Market - BEM”): Η αγορά που διορθώνει την ανισορροπία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Διακρίνεται σε Αγορά Ισχύος Εξισορρόπησης, Αγορά Ενέργειας Εξισορρόπησης και Διαδικασία Εκκαθάρισης Αποκλίσεων.

Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας Επόμενης Ημέρας (“Day-Ahead Electricity Market - DAEM”): Καλύπτει συναλλαγές με υποχρέωση φυσικής παράδοσης την επόμενη ημέρα. Οι συμμετέχοντες υποβάλλουν τις προσφορές τους και η συναλλαγή γίνεται είτε με διμερή συμβόλαια, είτε με ανταλλαγές ισχύος.

Ακαθάριστη Τελική Κατανάλωση Ενέργειας (“Final Gross Energy Consumption”): Το άθροισμα της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τους τελικούς καταναλωτές, των απωλειών του δικτύου και των εγκαταστάσεων ιδιοκατανάλωσης.

Άμεση Κανονική Ακτινοβολία (“Direct Normal Irradiance - DNI”): Αποτελεί μέτρο της ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει ανά μονάδα επιφάνειας της Γης (W/m^2) για μια δεδομένη θέση στην επιφάνειά της, η οποία είναι κάθετη προς τις ακτίνες του ήλιου.

Ανάλυση Ευαισθησίας (“Sensitivity Analysis”): Τεχνική στατιστικής ανάλυσης μέσα από την οποία καταδεικνύονται οι παράμετροι που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα ενός μοντέλου. Εστιάζει στο πώς επηρεάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου εάν μεταβληθούν μία ή περισσότερες παράμετροι.

Ανάλυση Κόστους-Αποτελεσματικότητας (“Cost-Benefit Analysis”): Η σχέση αποτελεσματικότητας κόστους αναφέρεται στο μέτρο της αποτελεσματικότητας με την οποία κατανέμονται οι πόροι για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων (αποτελεσμάτων). Αποτελεί έννοια που χρησιμοποιείται ευρέως στους τομείς των επιχειρήσεων και της οικονομίας για την αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ του κόστους που προκύπτει από κάποια δραστηριότητα και των οφελών που επιτυγχάνονται από αυτή τη δραστηριότητα.

Αποκεντρωμένη Παραγωγή (“Decentralised Production”): Αναφέρεται στην παραγωγή ενέργειας από τοπικές πηγές (όπως στέγες κατοικιών για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας), εν αντιθέσει με τις κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι οι λιγνιτικοί σταθμοί.

Βαθμονόμηση Μοντέλου (“Model Calibration”): Τεχνική στατιστικής εκμάθησης που χρησιμοποιείται για την βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων ενός μοντέλου που βασίζεται

σε πιθανοτικές στατιστικές κατανομές. Περιλαμβάνει την χρήση ενός συνόλου δεδομένων ελέγχου με στόχο την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου.

Γωνία Ζενίθ (θ_z): Είναι η γωνία μεταξύ μιας κατακόρυφης γραμμής και μιας γραμμής που συνδέει έναν παρατηρητή ή μια επιφάνεια με την δεδομένη θέση του ήλιου. Με άλλα λόγια, αποτελεί την γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του ήλιου και της κατακόρυφης διεύθυνσης από ένα δεδομένο σημείο στην επιφάνεια της Γης.

Διαχειριστής Δικτύου Διανομής (“Distribution System Operator - DSO”): Ο φορέας που αναλαμβάνει να διασφαλίσει την ασφαλή, αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (20 kV), δηλαδή την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς στους τελικούς καταναλωτές.

Διαχειριστής Δικτύου Μεταφοράς (“Transmission System Operator - TSO”): Ο φορέας που αναλαμβάνει την διασφάλιση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της αποδοτικής λειτουργίας του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (150-400 kV), δηλαδή την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς στα δίκτυα διανομής ή άλλους καταναλωτές μεγάλης κλίμακας.

Διαχειριστής Ηλεκτρικού Συστήματος (“Electricity System Operator - ESO”): Ο φορέας που αναλαμβάνει την επίβλεψη, τον σχεδιασμό, την διαχείριση και την λειτουργία του εθνικού ή περιφερειακού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής αποτελούν υποσυστήματά του.

Διάχυτη Οριζόντια Ακτινοβολία (“Diffuse Horizontal Irradiance - DHI”): Είναι το μέτρο της ακτινοβολίας που έχει διασκορπιστεί από την ατμόσφαιρα και που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια στην Γη. Αποτελεί το μέρος της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας που δεν προέρχεται από τις ακτίνες του ήλιου.

Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμης Ενέργειας (“IRENA”): “International Renewable Energy Agency”

Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (“IEA”): “International Energy Agency”

Εκκαθάριση Αποκλίσεων (“Imbalancing Settlement”): Μία από τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την οποία τυχόν αποκλίσεις μεταξύ της δηλωμένης προσφερόμενης ενέργειας από τους παραγωγούς και της πραγματικής προσφερόμενης ενέργειας, διορθώνονται με τρόπο τέτοιο, ώστε να καλύπτεται η ημερήσια ενεργειακή ζήτηση.

Ενδοημερήσια Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας (“Intra-Day Electricity Market - IDEM”): Μία από τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία έχει στόχο την διασφάλιση της ισορροπίας μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.

Ενεργειακή Ασφάλεια (“Energy Security”): Αναφέρεται στην διασφάλιση της διαθεσιμότητας, της προσβασιμότητας και της ασφάλειας των ενεργειακών πόρων που είναι ουσιώδεις για την οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική ανάπτυξη μιας χώρας. Ισούται με τις καθарές εισαγωγές (εισαγωγές μείον εξαγωγές) προς την ακαθάριστη διαθέσιμη ενέργεια (gross available energy).

Ενεργειακή Κοινότητα (“Energy Community”): Νομικές οντότητες που οργανώνουν συλλογικές ενεργειακές δράσεις με στόχο την ενεργειακή μετάβαση σε καθαρή ενέργεια. Συμβάλλουν στην αύξηση της δημόσιας αποδοχής των έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και διευκολύνουν την προσέλκυση ιδιωτικών επενδύσεων στην πράσινη ενέργεια. Παρέχουν άμεσα οφέλη στους πολίτες, καθώς βελτιώνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα μειώνοντας τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας και δημιουργούν θέσεις απασχόλησης πάνω στον κλάδο της ενέργειας.

Ενεργειακός Συμψηφισμός (“Net metering”): Μηχανισμός πίστωσης που επιτρέπει στους αυτοπαραγωγούς να λαμβάνουν πίστωση σε πραγματικό χρόνο για την ηλεκτρική ενέργεια με την οποία τροφοδοτούν το δίκτυο, η οποία παράγεται από ανανεώσιμες πηγές. Η αποζημίωση με την μέθοδο του ενεργειακού συμψηφισμού, γίνεται με βάση την λιανική τιμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (“Internal Rate of Return - IRR”): Μέθοδος υπολογισμού της απόδοσης μιας επένδυσης. Αντιπροσωπεύει το επίπεδο της ετήσιας απόδοσης που επιτυγχάνει μια επένδυση κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της. Τεχνοοικονομικά και μαθηματικά, πρόκειται για το επιτόκιο προεξόφλησης που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία (“net present value”) της επένδυσης.

Ιδιοκατανάλωση (“Self-consumption”): Είναι η δραστηριότητα της χρήσης ηλεκτρικής ή/και θερμικής ενέργειας, η οποία προκύπτει από αυτοπαραγωγή εντός (ή πλησίον) της εγκατάστασης του καταναλωτή με στόχο την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών (ατομική ιδιοκατανάλωση). Η ιδιοκατανάλωση είναι κομμάτι της έννοιας της αυτοπαραγωγής. Οι αυτοπαραγωγοί μπορούν επίσης να τροφοδοτούν το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο περιοχής και να αποζημιώνονται για αυτή τη δραστηριότητα (συλλογική ιδιοκατανάλωση).

Ιδιοκαταναλωτής/Αυτοπαραγωγός (“Prosumer”): Τελικός χρήστης ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος καταναλώνει, αλλά παράγει επίσης ηλεκτρική ενέργεια “on-site” και τροφοδοτεί το δίκτυο.

Καθαρή Παρούσα Αξία (“Net Present Value - NPV”): Μέθοδος υπολογισμού της αξίας μιας επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψιν τη συνολική αξία όλων των μελλοντικών εισροών και εκροών της, δεδομένου του χρόνου που απαιτείται για να συμβούν και του επιτοκίου προεξόφλησης της επένδυσης. Εάν η “NPV” είναι θετική, η επένδυση είναι συμφέρουσα, ενώ όταν η “NPV” είναι αρνητική, η επένδυση δεν είναι αποδοτική.

Καμπύλη Εκμάθησης (“Learning Curve”): Αφορά μοντέλο που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η αποδοτικότητα της παραγωγής ή της παροχής μιας υπηρεσίας, συναρτήσει της εμπειρίας του οργανισμού ή της επιχείρησης που την παρέχει. Παρουσιάζεται σε διαγραμματική μορφή, όπου στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο χρόνος και στον κάθετο άξονα η απόδοση σε μονάδες παραγωγής ή άλλα μέτρα αξιολόγησης της παραγωγικής διαδικασίας.

Κεφαλαιουχική Δαπάνη (“Capital Expenditure - CAPEX”): Το αρχικό κεφάλαιο που καταβάλλεται για την υλοποίηση μιας επένδυσης. Ονομάζεται και κόστος κεφαλαίου (“capital cost”). Δεν συμπεριλαμβάνει το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (“Operational Expenditure - OPEX”).

Κοινωνικοοικονομικό Μονοπάτι Μετάβασης (“Socioeconomic Storyline/Transition Pathway”): Μια «ποιοτική» διήγηση που περιγράφει λεπτομερώς ένα πιθανό ενεργειακό μέλλον, μέσα από τις κοινωνικές δυναμικές και αλληλεπιδράσεις (ή ανεξαρτητοποιήσεις) μεταξύ των προσώπων, των τεχνολογιών και των πολιτικών παρεμβάσεων στα πλαίσια της ενεργειακής μετάβασης (“energy transition”).

Λευκά Πιστοποιητικά (“White Certificates”): Πρόκειται για εμπορεύσιμα πιστοποιητικά, τα οποία πιστοποιούν την εξοικονόμηση ενέργειας που επετεύχθη λόγω της λήψης μέτρων εξοικονόμησης σε επίπεδο παραγωγής, προμήθειας ή τελικής κατανάλωσης (νοικοκυριά & επιχειρήσεις), μετρούμενα ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούν εμπόρευμα συναλλαγής και εξισώνουν τα οριακά κόστη εξοικονόμησης ενέργειας για τις επιχειρήσεις (ή τα νοικοκυριά), οι/τα οποίες/α συμμετέχουν στην αγορά λευκών πιστοποιητικών. Αποτελούν καθεστώς επιβολής ενεργειακής απόδοσης (“Energy Efficiency Obligation - EEO”).

Μέθοδος “PRIM”: Η ευρεστική μέθοδος “PRIM (Patient Rule Induction Method)” αποτελεί τεχνική εξόρυξης δεδομένων με στόχο την εξαγωγή κανόνων για ένα σύνολο δεδομένων (“dataset”). Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον προσδιορισμό περιοχών εντός ενός συνόλου δεδομένων, όπου το υπό μελέτη αποτέλεσμα είναι πιο διαδεδομένο ή όπου μια συγκεκριμένη μεταβλητή έχει σημαντικό αντίκτυπο στο αποτέλεσμα. Αποτελεί κομμάτι της διαδικασίας της ανάλυσης ευαισθησίας (“Sensitivity Analysis”).

Μεταβλητές Ελέγχου (“Control Variables”): Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην στατιστική ανάλυση για να ελέγξουν ή να περιορίσουν την επίδραση μιας άλλης μεταβλητής στο αποτέλεσμα ενός μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να δοθούν πιο αξιόπιστες εκτιμήσεις των αντικειμενικών επιπτώσεων μιας μεταβλητής σε μια άλλη. Για παράδειγμα, εάν εξετάζεται η σχέση μεταξύ κατανάλωσης και εισοδήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεταβλητή ελέγχου η εκπαίδευση.

Ολική Οριζόντια Ακτινοβολία (“Global Horizontal Irradiance - GHI”): Είναι το μέτρο της συνολικής ποσότητας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια της Γης και περιλαμβάνει τόσο την Άμεση Κανονική Ακτινοβολία (“DNI”), όσο και την Διάχυτη Οριζόντια Ακτινοβολία (“DHI”).

Οριακή Τιμή Συστήματος (ΟΤΣ): Πρόκειται για την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην οποία καλύπτεται η ζήτηση, δεδομένης της προσφοράς. Αντιπροσωπεύει το κόστος παραγωγής που απαιτείται για την παραγωγή μιας επιπλέον μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη της επιπρόσθετης ζήτησης. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής της ενέργειας στις αγορές ενέργειας και μεταβάλλεται με βάση την προσφορά και την ζήτηση στο δίκτυο.

Πολύπλοκα Συστήματα (“Complex Systems”): Συστήματα που αποτελούνται από πολλά μέρη, τα οποία μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Πράσινα Πιστοποιητικά (“Green Certificates”): Πρόκειται για εμπορεύσιμα πιστοποιητικά, τα οποία οδηγούν σε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Πιστοποιούν ότι μία μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας, παράχθηκε από ανανεώσιμες πηγές (φωτοβολταϊκά, αιολικά, κ.λπ.) με «καθαρό» τρόπο. Εκδίδονται από τις εθνικές αρχές και αγοράζονται από παραγωγούς ενέργειας, οι οποίοι στη συνέχεια τα πωλούν σε παραγωγούς που δεν έχουν την δυνατότητα να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, μέσω της αγοράς πράσινων πιστοποιητικών. Αποτελούν καθεστώς επιβολής ενεργειακής απόδοσης (“Energy Efficiency Obligation - EEO”).

Προθεσμιακή Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας (“Forward Electricity Market - FEM”): Μία από τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της οποίας οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τη δυνατότητα να πωλήσουν την ενέργεια που παράγουν σε μελλοντική ημερομηνία, ενώ οι καταναλωτές, αντίστοιχα, να την αγοράσουν. Η συμφωνία γίνεται μέσα από διμερείς συμβάσεις που έχουν οριστεί εκ των προτέρων και περιλαμβάνουν συγκεκριμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας προς παράδοση σε μελλοντική ημερομηνία και καθορισμένη τιμή ανά μονάδα.

Συμψηφισμός Λογαριασμού (“Net billing”): Μηχανισμός χρέωσης, αλλά και αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών με βάση την πραγματική τιμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ο μηχανισμός του “net billing” εξισορροπεί την αξία της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με την αξία της παραγωγής και τροφοδοσίας του δικτύου με ηλεκτρική ενέργεια. Η αποζημίωση με την μέθοδο του “net billing” γίνεται με βάση την χονδρεμπορική τιμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Συντελεστής Εκμετάλλευσης (“Capacity Factor - CF”): Τεχνικός δείκτης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσης μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για ποσοστό και υπολογίζεται ως το πηλίκο της πραγματικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε ένα έτος προς την ονομαστική ισχύ επί 8760 (ώρες ανά έτος), το οποίο αποτελεί την μέγιστη παραγωγική ικανότητα της εγκατάστασης.

Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με Μπαταρία (“Battery Energy Storage Systems - BESS”): Συσκευές που επιτρέπουν την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές και δίνουν τη δυνατότητα για χρήση της όταν οι καταναλωτές την χρειάζονται περισσότερο.

Φωτοβολταϊκά Ενσωματωμένα στο Κτήριο (“Building Integrated Photovoltaics - BIPVs”): Φωτοβολταϊκά στέγης με παρόμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά με τα “BAPV”, με τη διαφορά ότι τα “BIPVs” αποτελούν κομμάτι του κτηριακού κελύφους. Έτσι, θα πρέπει να έχουν και επιπρόσθετα χαρακτηριστικά πέραν της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως υδατοστεγανότητα και θερμομόνωση.

Φωτοβολταϊκά Εφαρμοσμένα στο Κτήριο (“Building Applied Photovoltaics - BAPVs”): Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στέγης στην οποία τοποθετούνται πλαίσια στις υπάρχουσες επιφάνειες της στέγης, αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή του κτηρίου (π.χ., έργο ενεργειακής αναβάθμισης). Αποτελεί την παραδοσιακή λύση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών.

Φωτοβολταϊκό Σύστημα Μικρής Κλίμακας (“Small-scale PV System”): Εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πάνελ με συνολική εγκατεστημένη ισχύ μέχρι 100 kW (για εμπορικά κτήρια). Στον οικιακό τομέα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, συνήθως δεν ξεπερνούν τα 20 kW. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας ορίζονται έως 10 kW.

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο και σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η κλιματική κρίση αναμένεται να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην καθημερινότητα των πολιτών. Η άνοδος της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη (τον Ιούνιο του 2023 καταγράφηκε η ιστορικά υψηλότερη μέση θερμοκρασία του πλανήτη - 17,18°C), το λιώσιμο των πάγων που οδηγεί σε άνοδο της στάθμης των θαλασσών και τα έντονα καιρικά φαινόμενα (π.χ., καταιγίδες, πλημμύρες, καύσωνες, ξηρασία, κ.λπ.) είναι ελάχιστες από τις καταστροφές που επιφέρει (ή αναμένεται να επιφέρει) η κλιματική κρίση.

Στα πλαίσια της αντιμετώπισης αυτού του καταστροφικού φαινομένου, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει θεσπίσει μέσα από νομοθετικές διατάξεις ορισμένους στόχους για την ενέργεια και το κλίμα. Στόχος είναι ο μετριασμός της κλιματικής κρίσης μέσα από μια ενεργειακή μετάβαση, η οποία θα είναι βιώσιμη (τόσο περιβαλλοντικά, όσο και οικονομικά) για όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στα πλαίσια της ενεργειακής μετάβασης τίθεται ο στόχος της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα ώστε όλα τα Κράτη Μέλη να είναι «κλιματικά ουδέτερα» έως το 2050.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ενεργειακής μετάβασης στον οικιακό τομέα κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσα από την εφαρμογή κατάλληλων εργαλείων μοντελοποίησης, για την προσομοίωση διάφορων σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων μικρής κλίμακας, εστιάζοντας παράλληλα στην ανάπτυξη ενός υποστηρικτικού πλαισίου το οποίο θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των πολιτών κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Ο οικιακός τομέας αναμένεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση δεδομένου ότι συνεισφέρει με **27%** στη συνολική ενεργειακή ζήτηση (βάσει στοιχείων του ενεργειακού ισοζυγίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2021).

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι η ανάγκη για ενσωμάτωση του οικιακού τομέα στο μετριασμό της κλιματικής κρίσης, είναι επιτακτική. Δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας στον κτηριακό τομέα και δράσεις παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι καθοριστικές για την επιτυχή ενσωμάτωση του οικιακού τομέα στο μετριασμό της κλιματικής κρίσης. Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η έρευνα εστιάζει στο κομμάτι της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και πιο συγκεκριμένα, από φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας.

Σε αυτό το πλαίσιο, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υποστηρικτικού πλαισίου μοντελοποίησης για την προσομοίωση σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (δηλ., Γαλλία, Δανία, Ελλάδα, Ισπανία, Πορτογαλία, και Πολωνία), με χρονικό ορίζοντα ανάλυσης το 2030, με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης βάσει πρακτόρων “ATOM” (“Agent-based Technology adOption Model”). Το υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” έχει αναπτυχθεί από την ομάδα του εργαστηρίου Τεχνοοικονομικής Ενεργειακών Συστημάτων (“Technoeconomics of Energy Systems laboratory - TEESlab”) του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

1.2. Φάσεις υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η υλοποίηση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας επιμερίζεται επιγραμματικά σε πέντε (5) φάσεις:

- **Φάση 1^η**: Παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου που διέπει τη διάχυση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα κρατών μελών της

Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η παρουσίαση περιλαμβάνει θεωρητική περιγραφή της έννοιας της κλιματικής κρίσης, της ενεργειακής μετάβασης, των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας, του ηλιακού δυναμικού των Κρατών Μελών, της υπάρχουσας κατάστασης στην Ευρωπαϊκή Ένωση, και την ανάγκη για ενεργειακό συμφωνισμό και αυτοπαραγωγή με αποθήκευση (Ενότητες 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5).

- **Φάση 2^η:** Αυτή η φάση περιλαμβάνει τη θεωρητική περιγραφή της μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων, καθώς επίσης και την ανάπτυξη του υποστηρικτικού πλαισίου μοντελοποίησης, το οποίο αποτελεί τη βασική μεθοδολογική δουλειά της παρούσας εργασίας και αναφέρεται στην παρουσίαση και παραμετροποίηση του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων και προσομοίωσης “ATOM” (Ενότητες 3.1, 3.2, 3.3).
- **Φάση 3^η:** Αναφορά και αιτιολόγηση της επιλογής των Κρατών Μελών, στα οποία εφαρμόζεται το αναπτυχθέν υποστηρικτικό πλαίσιο μοντελοποίησης για την προσομοίωση σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας μέχρι το 2030. Παράλληλα, περιγραφή των σχημάτων πολιτικής που χρησιμοποιούνται στα υπό μελέτη Κράτη Μέλη για την υποστήριξη της περαιτέρω διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, π.χ., εφαρμογή φορολογικού πλαισίου για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), αποζημίωση των ιδιοκαταναλωτών μέσω επιδοτήσεων τύπου “feed-in”, εργαλεία προώθησης της ιδιοκατανάλωσης (“self-consumption”), αγορά πράσινων πιστοποιητικών, θεσμικό πλαίσιο υποστήριξης διάχυσης τεχνολογιών αποθήκευσης μπαταρίας (“battery energy storage systems - BESS”), κ.λπ.. Επιπροσθέτως, περιγράφονται τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος των υπό μελέτη Κρατών Μελών (Ενότητες 4.1, 4.2, 4.3).
- **Φάση 4^η:** Σε αυτή τη φάση διεξάγεται η βαθμονόμηση του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης “ATOM” με στόχο την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων που διέπουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (για υλοποίηση ή μη της επένδυσης) από τους προσομοιωμένους «πράκτορες» (δηλ., καταναλωτές/πολίτες). Σε επόμενο βήμα, πραγματοποιείται μελέτη ευαισθησίας για τον έλεγχο της διασποράς στα υπό μελέτη σενάρια, βάσει και των αποτελεσμάτων της διαδικασίας της βαθμονόμησης, με σκοπό να ποσοτικοποιηθεί η υπάρχουσα αβεβαιότητα στα αποτελέσματα και να αξιολογηθεί η δυνατότητα του υπολογιστικού εργαλείου για την επαρκή προσέγγιση της πραγματικότητας (ρεαλιστικές προσομοιώσεις). Η βαθμονόμηση εκτελείται για κάθε ένα από τα υπό μελέτη Κράτη Μέλη ξεχωριστά (Ενότητες 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5).
- **Φάση 5^η:** Σε αυτή τη φάση πραγματοποιείται η εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” με στόχο την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα του κάθε υπό μελέτη Κράτους Μέλους μέχρι το 2030. Η εφαρμογή διεξάγεται για τρία (3) διαφορετικά σενάρια και το κάθε ένα από αυτά τα σενάρια χαρακτηρίζεται από τρία (3) διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια μετάβασης (“socioeconomic storylines/transition pathways”) υπό τα οποία επιτυγχάνεται η ενεργειακή μετάβαση (Ενότητες 6.1, 6.2, 6.3).

1.3. Δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται στα παρακάτω κύρια μέρη:

- Την περίληψη της εργασίας, το γλωσσάριο που περιλαμβάνει όλες τις τεχνικές έννοιες, καθώς και τις συντομογραφίες που χρησιμοποιούνται στην εργασία και τον κατάλογο διαγραμμάτων, εικόνων, και πινάκων που βρίσκονται μέσα στο κείμενο.
- Στο **Κεφάλαιο 1**, το οποίο αποτελεί την εισαγωγή της παρούσας εργασίας.

- Στο **Κεφάλαιο 1**, το οποίο αποτελεί την περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου των εννοιών που διέπουν τη διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα.
- Στο **Κεφάλαιο 3**, το οποίο παρουσιάζει το μεθοδολογικό πλαίσιο υπό το οποίο πραγματοποιείται η εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης “ATOM” για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα του κάθε υπό μελέτη Κράτους Μέλους μέχρι το 2030.
- Στο **Κεφάλαιο 4**, το οποίο παρουσιάζει τα υπό μελέτη Κράτη Μέλη, στα οποία εφαρμόζεται το αναπτυχθέν υποστηρικτικό πλαίσιο μοντελοποίησης, αιτιολογώντας, παράλληλα, τη επιλογή τους, ενώ, στη συνέχεια, εστιάζει στο κοινωνικοοικονομικό και θεσμικό πλαίσιο που διέπει τη διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα αυτών των Κρατών Μελών.
- Στο **Κεφάλαιο 5**, στο οποίο πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται όλα τα απαραίτητα τεχνοοικονομικά δεδομένα για τη βαθμονόμηση και την προσομοίωση των υπό εξέταση σεναρίων για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα του κάθε υπό μελέτη Κράτους Μέλους μέχρι το 2030 (“forward-looking simulations”).
- Στο **Κεφάλαιο 6**, στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των υπό εξέταση σεναρίων και οι προβλέψεις πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της μελέτης περίπτωσης της Ελλάδας.
- Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7**, στο οποίο πραγματοποιείται εκτενής σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, και προτάσεις για μελλοντική έρευνα με στόχο την περαιτέρω εξέλιξη του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”.

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1. Κλιματική κρίση

Ένα από τα πιο φλέγοντα και επίκαιρα ζητήματα που έχει να λύσει η ανθρωπότητα είναι το πρόβλημα της «κλιματικής αλλαγής» (ή «κλιματικής κρίσης» όπως ονομάστηκε αργότερα). Ο όρος «κλιματική αλλαγή» θεωρείται ότι δεν περιγράφει με ακρίβεια την σοβαρότητα της κατάστασης που προκαλείται από τις επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον (Zeldin-O'Neill et al., 2019). Με τον όρο «κλιματική κρίση» περιγράφεται μια μακροχρόνια αλλαγή στις καιρικές διατάξεις από τα τροπικά κλίματα έως τα πολικά (Abbass et al., 2022).

Για περισσότερα από 20 έτη, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει έναν κυρίαρχο ρόλο σε παγκόσμιο επίπεδο, στην μάχη κατά της κλιματικής κρίσης. Αυτή η μάχη ενισχύθηκε από την δέσμευση της ΕΕ να είναι η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος έως το 2050 (Süsser et al., 2022a). Για την επίτευξη αυτού του στόχου απαιτείται απανθρακοποίηση σε βασικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένου του ενεργειακού τομέα (Süsser et al., 2020), ο οποίος είναι αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στα πλαίσια της «κλιματικής κρίσης», ο όρος χρησιμοποιείται κυρίως για την αναφορά στην τρέχουσα τάση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η οποία έχει πιθανότητα άνω του **95%** να συμβαίνει εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας, με αφετηρία την πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση (Vlasis et al., 2021). Η «κλιματική κρίση» έχει διάφορες πτυχές που αποτυπώνονται στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Ορισμένα παραδείγματα επιπτώσεων της κλιματικής κρίσης αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία (IPCC, 2022; Nikas et al., 2021):

- **Αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας της Γης:** Η υπερσυσσώρευση αερίων του θερμοκηπίου (“greenhouse gases - GHG”) μέσα από την εκβιομηχάνιση και του αστικού τρόπου ζωής, έχει οδηγήσει σε αύξηση της συγκέντρωσης των συγκεκριμένων αερίων στην ατμόσφαιρα σημειώνοντας ιστορικό ρεκόρ το 2020, αγγίζοντας τα **465 ppmCO₂eq** (European Environment Agency, 2023). Η μεγαλύτερη αύξηση στη μέση θερμοκρασία του πλανήτη παρατηρείται από το 1970 και μετά, με τα θερμότερα έτη να έχουν παρατηρηθεί από το 1981 και μετά, σημειώνοντας ιστορικό ρεκόρ (για την εποχή) τον Ιούλιο του 2023, όταν η μέση θερμοκρασία του πλανήτη άγγιξε τους **17,01°C** (το προηγούμενο ιστορικό ρεκόρ είχε σημειωθεί τον Αύγουστο του 2016, όταν η μέση θερμοκρασία της Γης άγγιξε τους **16,92°C**).
- **Εξασθένηση του στρώματος του όζοντος:** Έχει παρατηρηθεί σταθερή μείωση κατά 4% ανά δεκαετία στο σύνολο του στρώματος του όζοντος στη στρατόσφαιρα της Γης από τα τέλη του 1970 και μετά. Αυτή η μείωση εκτιμάται ότι θα επιφέρει αρνητικές υγειονομικές επιπτώσεις όπως έξαρση ιών και αύξηση της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων λόγω του ότι μειώνεται η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας του Ηλίου.
- **Λιώσιμο των παγετώνων στους πόλους της Γης:** Από το 2002 έως το 2006 η Γροιλανδία απώλεσε περίπου **150 τ.χλμ.** παγετώνων, ενώ στην Ανταρκτική χάθηκαν **152 τ.χλμ.** την ίδια περίοδο. Αιτία αυτού του φαινομένου είναι η αύξηση της θερμοκρασίας της Γης, ή οποία αναφέρθηκε παραπάνω.
- **Αύξηση της στάθμης της θάλασσας:** Έχει υπολογιστεί ότι η στάθμη των ωκεανών παγκοσμίως έχει αυξηθεί κατά 17 cm των τελευταίων αιώνων. Αυτό το φαινόμενο βάζει σε κίνδυνο χώρες που είναι νησιωτικές ή διαθέτουν χαμηλό ανάγλυφο. Μάλιστα, ορισμένες εξ αυτών είναι κράτη μέλη της ΕΕ (Ολλανδία & Βέλγιο).

- **Μείωση του pH του νερού:** Το πολύ υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα που παρατηρείται από το 1970 και μετά, έχει οδηγήσει στην λεγόμενη «οξίνιση» των υδάτων, η οποία με την σειρά της οδηγεί σε λεύκανση των κοραλλιών (τα οποία αποτελούν καταφύγιο για πολλά θαλάσσια είδη) και αλλαγή της σύστασης του φυτοπλαγκτόν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση στην αναπαραγωγή των θαλάσσιων οργανισμών, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε διαστρεβλώσεις στην βιοποικιλότητα του ωκεάνιου συστήματος και σε μείωση των αλιευμάτων για τους ανθρώπους (*Mason et al., 2020*).
- **Ακραία καιρικά φαινόμενα:** Ενδεικτικά, τα τελευταία 20 έτη υπάρχουν πάνω από 300 επιστημονικές δημοσιεύσεις (“peer reviewed”) που εξετάζουν ακραίες καιρικές συνθήκες σε όλον τον πλανήτη. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων και πυρκαγιές, πλημμύρες, τυφώνες, παρατεταμένους καύσωνες και πολύ έντονες βροχοπτώσεις.

Κλείνοντας την ενότητα, γίνεται σαφές ότι κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για μετριασμό της «κλιματικής κρίσης» μέσα από δράσεις προστασίας περιβάλλοντος. Μια βασική αιτία της ένταξης του οικιακού τομέα των κρατών μελών στην προστασία του περιβάλλοντος είναι και ο μετριασμός της ρύπανσης του περιβάλλοντος με στόχο την μείωση των επιπτώσεων της «κλιματικής κρίσης». Η ηλεκτροπαραγωγή από καθαρές μορφές ενέργειας (όπως είναι η ηλιακή), μπορεί να επιδράσει θετικά στον μετριασμό του φαινομένου της «κλιματικής κρίσης» και ο οικιακός τομέας έχει σημαντικό ρόλο σε αυτή την «μάχη», αφού περίπου το 27% της τελικής ενεργειακής χρήσης της ΕΕ προέρχεται από τον οικιακό τομέα (*Gaitanarou et al., 2021*).

2.2. Ενεργειακή μετάβαση & στόχοι

Έως και το 2012, οι ενεργειακοί και κλιματικοί στόχοι σε παγκόσμιο επίπεδο ορίζονταν από το Πρωτόκολλο του Κιότο (1997). Με βάση το Πρωτόκολλο του Κιότο, οι συμμετέχουσες χώρες είχαν δεσμευτεί να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 5% έως το 2012, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 (*Gaitanarou et al., 2021; United Nations, 1998*). Στη συνέχεια, το 2012 πραγματοποιήθηκε η τροποποίηση της Ντόχα, μέσα στην οποία ορίζεται ως κλιματικός στόχος η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 18% για τις συμμετέχουσες χώρες (*United Nations, 2012*). Στα πλαίσια αυτού του στόχου, ορίστηκε ο «Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης» (άρθρο 12), μέσα από τον οποίο οι ανεπτυγμένες χώρες (μέλη του Παραρτήματος Ι) που έχουν δεσμευτεί για μείωση εκπομπών, μπορούν να εφαρμόσουν έργα μείωσης εκπομπών σε αναπτυσσόμενες χώρες που δεν ανήκουν στο Παράρτημα Ι του πρωτοκόλλου, με στόχο την υποστήριξη των χωρών που δεν είναι μέλη του Παραρτήματος Ι να επιτύχουν μείωση των εκπομπών (*United Nations, 1998*). Παράλληλα, ο μηχανισμός υποστηρίζει τις χώρες που είναι μέλη του Παραρτήματος Ι να συμμορφωθούν με τα όρια και τις δεσμεύσεις των εκπομπών.

Στα πλαίσια της ενεργειακής μετάβασης (ή μετασχηματισμός του ενεργειακού συστήματος), ορίζεται η δομική αλλαγή σε ένα ενεργειακό σύστημα, με βάση την προσφορά και την κατανάλωση (*United Nations, 2019*). Η ενεργειακή μετάβαση ονομάζεται και «μετάβαση ανανεώσιμης ενέργειας» (“renewable energy transition”) αφού προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι που αναφέρθηκαν παραπάνω (*United Nations, 1998, 2012*), το ενεργειακό σύστημα θα πρέπει να βασίζεται σε καθαρές μορφές ενέργειας, αντί ρυπαντικές, όπως είναι τα ορυκτά καύσιμα (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κ.λπ.).

Με βάση τα Ηνωμένα Έθνη, η ενεργειακή μετάβαση που αφορά όλες τις χώρες του πλανήτη, αναλύεται σε 5 συνιστώσες (*United Nations, 2019*):

- **Επέκταση της ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ):** Η επέκταση περιλαμβάνει σχέδια για μεγάλο μερίδιο ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή. Σήμερα περίπου το 40% της ηλεκτροπαραγωγής προέρχεται από ΑΠΕ (*European Commission, 2022a*). Στόχος είναι το μερίδιο ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή να ισούται τουλάχιστον με 85% έως το 2050.
- **Απεξάρτηση του ενεργειακού συστήματος από τον άνθρακα (“Coal phase - out”):** Περιλαμβάνει σχέδια για την απεξάρτηση από τον άνθρακα στους τομείς της ηλεκτροπαραγωγής και της παραγωγής θερμότητας. Στα πλαίσια αυτής της συνιστώσας περιλαμβάνεται η διάχυση των ΑΠΕ και οι δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας, με στόχο έως το 2050 η ΕΕ να είναι «κλιματικά ουδέτερη» (“climate neutral”).
- **Απανθρακοποίηση του τομέα των μεταφορών (“Decarbonize transport”):** Περιλαμβάνει δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας στον τομέα των μεταφορών (βελτίωση της υπάρχουσας τεχνολογίας), εξηλεκτρισμός του τομέα των μεταφορών (ηλεκτρικά οχήματα) και αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με βιοκαύσιμα φιλικά προς το περιβάλλον.
- **Απανθρακοποίηση του τομέα της βιομηχανίας (“Decarbonize industry”):** Περιλαμβάνει μείωση της ενεργειακής ζήτησης μέσα από την κυκλική οικονομία (“circular economy”) και την βελτίωση της αλυσίδας εφοδιασμού (“supply chain - logistics”). Παράλληλα, περιλαμβάνει τον εξηλεκτρισμό των διαδικασιών παραγωγής θερμότητας, αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας μέσα από δράσεις εξοικονόμησης και τέλος, χαρακτηρίζεται από αυξημένη διάχυση βιομάζας & βιοκαυσίμων.
- **Αποφυγή μελλοντικών εκπομπών και πρόσβαση στην ενέργεια:** Περιλαμβάνει την σύνδεση 3,5 δισεκατομμυρίων ανθρώπων που ζουν σε καθεστώς «ενεργειακής ένδειας» και χαρακτηρίζονται από υψηλές εκπομπές, σε ένα ενεργειακό σύστημα που θα είναι βιώσιμο (τόσο περιβαλλοντικά, όσο και οικονομικά). Στόχος είναι η μείωση της ενεργειακής ένδειας και παράλληλα η μείωση των εκπομπών από τα νοικοκυριά.

Στο πλαίσιο των παραπάνω συνιστωσών που αναφέρουν τα Ηνωμένα Έθνη, κάθε χώρα θα πρέπει να προσαρμόζει του δικούς της ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους. Με στόχο την προσαρμογή της στους παραπάνω στόχους, η ΕΕ έχει θεσπίσει μια σειρά δεσμευτικών διατάξεων, όπως είναι «Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία» (“European Green Deal”). Βασικός στόχος της συμφωνίας είναι η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας της ΕΕ έως το 2050 (*Kleanthis et al., 2022; Stavrakas et al., 2018*).

Μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, τίθενται 6 βασικοί στόχοι για τα κράτη μέλη της ΕΕ:

- Μετριασμός της «κλιματικής κρίσης» (**Ενότητα 2.1**).
- Προσαρμογή στην «κλιματική κρίση».
- Βιωσιμότητα και προστασία των υδάτων και των θαλάσσιων πόρων.
- Μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία.
- Αποφυγή και έλεγχος της ρύπανσης του περιβάλλοντος.
- Προστασία και αποκατάσταση της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημάτων.

Με τη σειρά τους, τα Κράτη Μέλη υιοθετούν τις οδηγίες που προέρχονται από το Ευρωπαϊκή Επιτροπή (“European Commission - EC”), με στόχο την επίτευξη όλων των παραπάνω μέσα από μια δίκαιη για όλους ενεργειακή μετάβαση (“Just Transition”). Οι ενεργειακοί & κλιματικοί στόχοι των υπό μελέτη κρατών μελών της ΕΕ στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αναφέρονται στην **Ενότητα 4.2**.

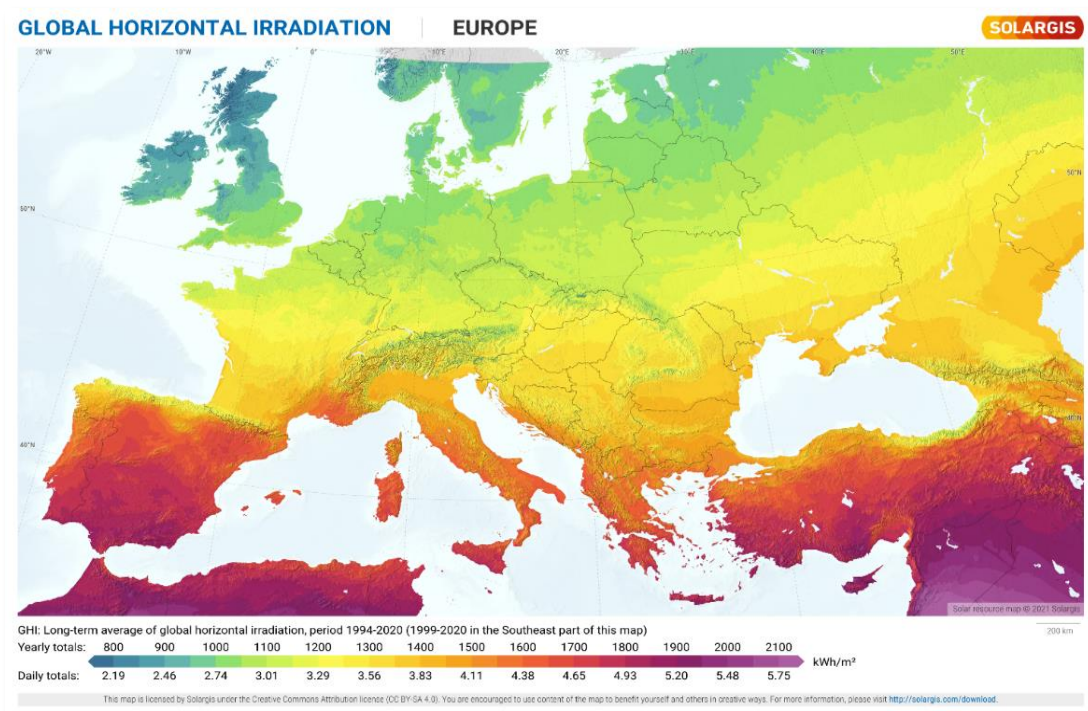
2.3. Φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας & ηλιακό δυναμικό

Όπως αναφέρεται και στον τίτλο, σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υποστηρικτικού πλαισίου μοντελοποίησης με στόχο την προσομοίωση σεναρίων διάχυσης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (“Small-scale PV Systems”). Με τον όρο «φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας» ορίζονται οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών (κυρίως σε στέγες) μέχρι **100 kW_p**. Ωστόσο, στον οικιακό τομέα οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στέγης, συνήθως φτάνουν μέχρι **20 kW_p**. Φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης με ισχύ μεγαλύτερη από 20 kW_p, συνήθως αφορούν κτήρια με εμπορικό σκοπό.

Το βασικότερο ίσως μέγεθος για την επιλογή μιας τοποθεσίας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι το υπάρχον ηλιακό δυναμικό (“solar energy potential”). Το ηλιακό δυναμικό εκφράζεται με βάση την Ολική Οριζόντια Ακτινοβολία (“Global Horizontal Irradiance - GHI”) και μετράται σε kW (ή kWh) ανά m². Η “GHI” εξάγεται συναρτήσει της Άμεσης Κανονικής Ακτινοβολίας (“Direct Normal Irradiance - DNI”), της Διάχυτης Οριζόντιας Ακτινοβολίας (“Diffuse Horizontal Irradiance - DHI”), καθώς επίσης και της γωνίας ζενίθ (θ_z). Ισχύει η μαθηματική σχέση:

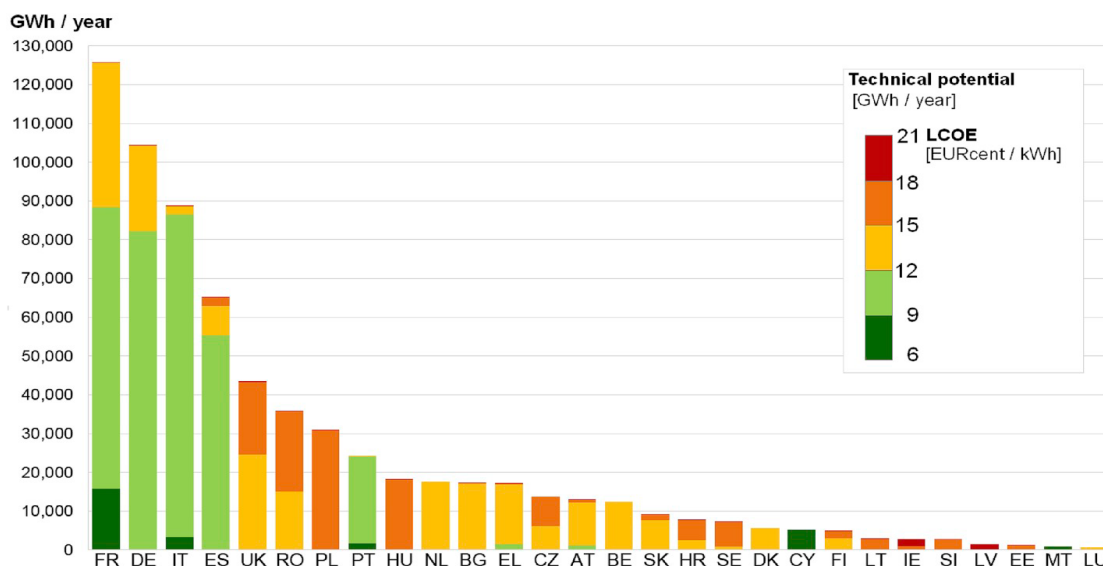
$$GHI = DNI * \sigma\upsilon\nu\theta_z + DHI$$

Όσον αφορά την Ευρώπη, η μέση ολική οριζόντια ακτινοβολία των περισσότερων χωρών και ειδικά των χωρών της Μεσογείου, ξεπερνάει τις **1400 kWh/m² ανά έτος** (Gholami & Rostvik, 2020), όπως αποτυπώνεται και στην **Εικόνα 1**.



Εικόνα 1. Μέση ολική οριζόντια ακτινοβολία στην Ευρώπη για την περίοδο 1999-2020. Πηγή: Solargis, 2020.

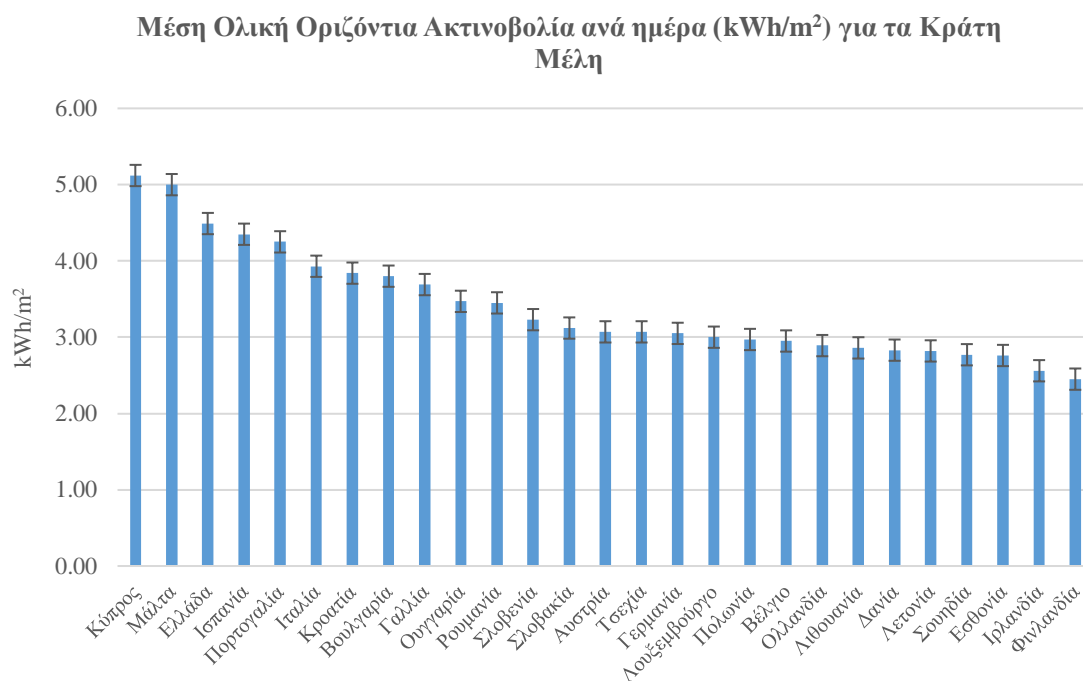
Μία ακόμη σκοπιά, η οποία μελετήθηκε από τους Bodis *et al.* (2019) στα πλαίσια έρευνας, είναι το δυναμικό των φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης που υπάρχει σε όρους παραγόμενης ενέργειας ανά έτος, υποθέτοντας ότι εγκαθίστανται φωτοβολταϊκά στέγης σε όλες τις τοποθεσίες που είναι κατάλληλες για εγκατάσταση, ανά κράτος μέλος της ΕΕ (**Διάγραμμα 1**).



Διάγραμμα 1. Δυναμικό φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης ανά κράτος μέλος της ΕΕ (εκφρασμένο σε παραγόμενες GWh ανά έτος). Πηγή: Bodis et al., 2019.

Όπως αποτυπώνεται και στο **Διάγραμμα 1** με βάση την έκταση και το ηλιακό δυναμικό των κρατών μελών της ΕΕ, η Γαλλία θα είχε την δυνατότητα να παράγει περισσότερες από **126 TWh/έτος** ηλεκτρικής ενέργειας εάν εγκαθιστούσε φωτοβολταϊκά στέγης σε κάθε δυνατή τοποθεσία. Μάλιστα, μέχρι τις **89 TWh**, το “LCOE” των επενδύσεων θα ήταν λιγότερο από **0,12 €/kWh** (Bodis et al., 2019).

Πιο αναλυτικά, στο **Διάγραμμα 2** αποτυπώνεται η μέση ολική οριζόντια ακτινοβολία (“average GHI”) **ανά ημέρα** για όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ, βάσει δεδομένων από το “Global Solar Atlas”.



Διάγραμμα 2. Μέση ολική οριζόντια ακτινοβολία ανά ημέρα για τα κράτη μέλη της ΕΕ.

Πολλαπλασιάζοντας τις τιμές από το **Διάγραμμα 2** με 365 μέρες/έτος, εξάγονται οι τιμές από την **Εικόνα 1**.

2.4. Υπάρχουσα κατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση

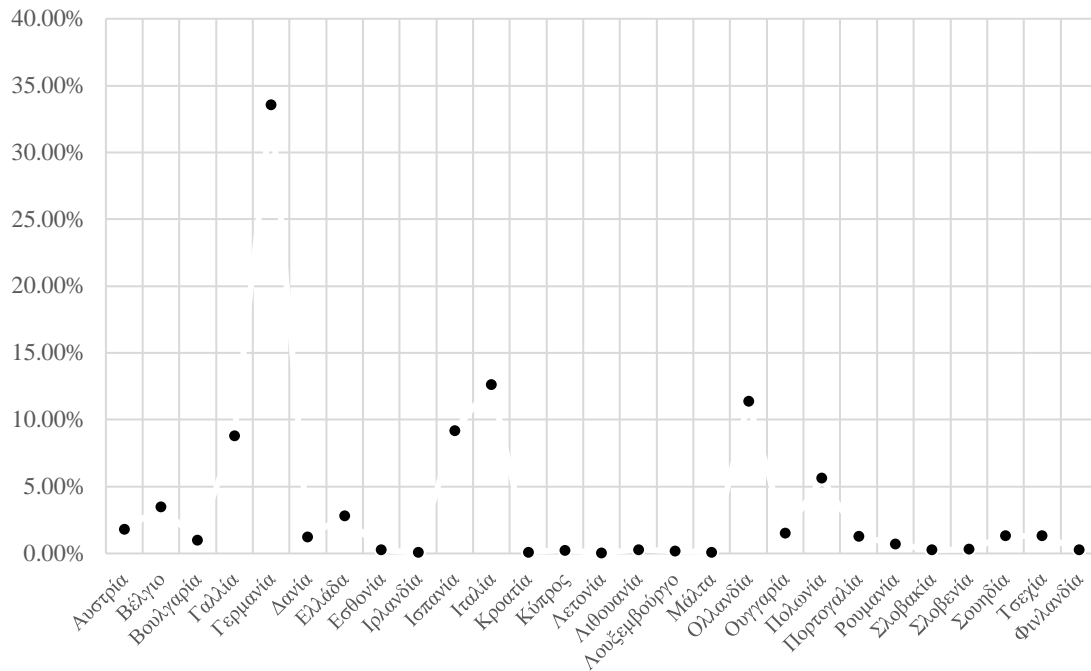
Από το 2017 μέχρι το 2021, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων στο σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης αυξήθηκε κατά **67,58%**. Πιο συγκεκριμένα, από τα **94.318 MW** ισχύος σε φωτοβολταϊκά συστήματα που ήταν εγκατεστημένα το 2017, έφτασε τα **158.061 MW** το 2021 (*IRENA, 2022*).

Ο **Πίνακας 1** αποτυπώνει τη συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά συστήματα (όχι μόνο φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας) από το 2017 μέχρι το 2021 στο σύνολο των κρατών μελών της ΕΕ (βάσει δεδομένων του “IRENA”), ενώ στο **Διάγραμμα 3** αποτυπώνεται το ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος από φωτοβολταϊκά ανά κράτος μέλος της ΕΕ σε σχέση με το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών της ΕΕ (**158 GW**).

Πίνακας 1. Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων (σε MW) στο σύνολο της ΕΕ για την περίοδο 2017-2021.

Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	2017	2018	2019	2020	2021
ΕΕ	94318	102149	118356	136661	158061
Αυστρία	1269	1455	1702	2043	2692
Βέλγιο	3621	4000	4637	5575	6585
Βουλγαρία	1036	1033	1048	1097	1186
Γαλλία	8610	9672	10808	12022	14709
Γερμανία	42291	45156	48912	53719	58459
Δανία	906	998	1080	1304	1540
Ελλάδα	2606	2652	2834	3288	3530
Εσθονία	15	32	121	208	414
Ιρλανδία	17	32	58	93	136
Ισπανία	4723	4764	8839	10285	13648
Ιταλία	19682	20108	20865	21650	22692
Κροατία	60	68	85	109	109
Κύπρος	110	118	151	229	316
Λετονία	1	2	3	5	8
Λιθουανία	78	92	133	248	338
Λουξεμβούργο	128	131	160	187	209
Μάλτα	112	132	155	188	196
Ολλανδία	2911	4608	7226	10950	14249
Ουγγαρία	344	728	1400	2131	2131
Πολωνία	287	562	1539	3955	6257
Πορτογαλία	579	667	901	1100	1801
Ρουμανία	1374	1386	1398	1383	1398
Σλοβακία	528	472	590	535	535
Σλοβενία	247	247	278	370	367
Σουηδία	244	428	714	1107	1577
Τσεχία	2070	2075	2086	2123	2119
Φινλανδία	82	140	222	318	404

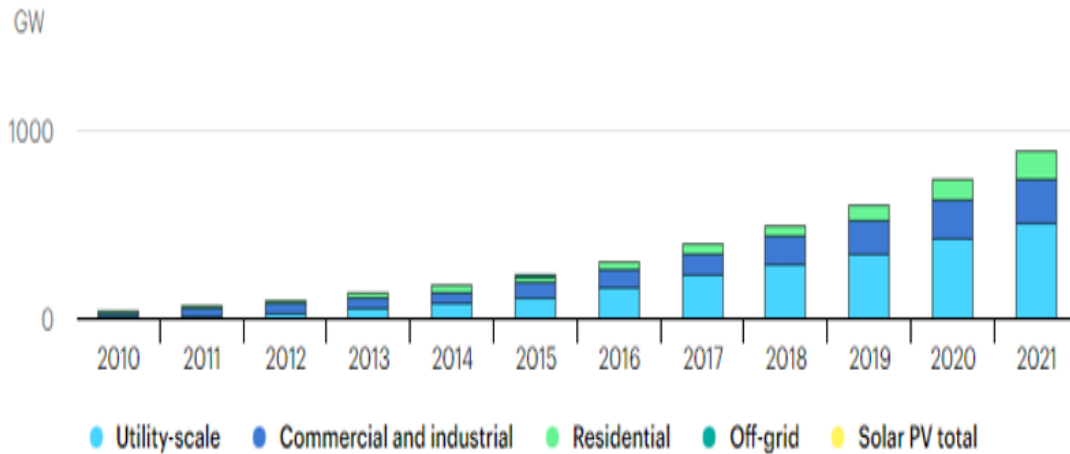
Ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β ανά Κράτος μέλος σε σχέση με το σύνολο της ΕΕ



Διάγραμμα 3. Μερίδιο εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά κράτος μέλος της ΕΕ σε σχέση με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών της ΕΕ.

Όπως αποτυπώνεται και στο **Διάγραμμα 3**, η Γερμανία κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στην ΕΕ (**33,56%**), με αποτέλεσμα να διαθέτει την ανταγωνιστικότερη αγορά φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων για τον οικιακό τομέα. Ακολουθεί η Ιταλία (**12,64%**), η Ολλανδία (**11,39%**), η Ισπανία (**9,18%**) και η Γαλλία (**8,78%**). Όμως, όπως προαναφέρθηκε, αυτές οι μετρήσεις περιλαμβάνουν όλα τα συστήματα φωτοβολταϊκών (π.χ., φωτοβολταϊκά πάρκα) και όχι μόνο τα φωτοβολταϊκά στέγης (μικρής κλίμακας) του οικιακού τομέα. Επισημαίνεται ότι στις παραπάνω μετρήσεις δεν περιλαμβάνονται τα συστήματα “CSP (Concentrated Solar Power)”.

Στο **Διάγραμμα 4** αποτυπώνεται η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα (“residential” - πράσινο χρώμα), σε σχέση με το σύνολο των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων παγκοσμίως μέχρι και το 2021. Το 2021, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στέγης οικιακού τομέα σε παγκόσμιο επίπεδο, ήταν ίση με **145,4 GW**, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων ήταν **884,5 GW** (IEA, 2022b). Αυτό σημαίνει ότι το **16,44%** της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων παγκοσμίως, αφορά φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας του οικιακού τομέα.



Διάγραμμα 4. Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ανά τομέα παγκοσμίως για τη περίοδο 2010-2021. Πηγή: IEA, 2022.

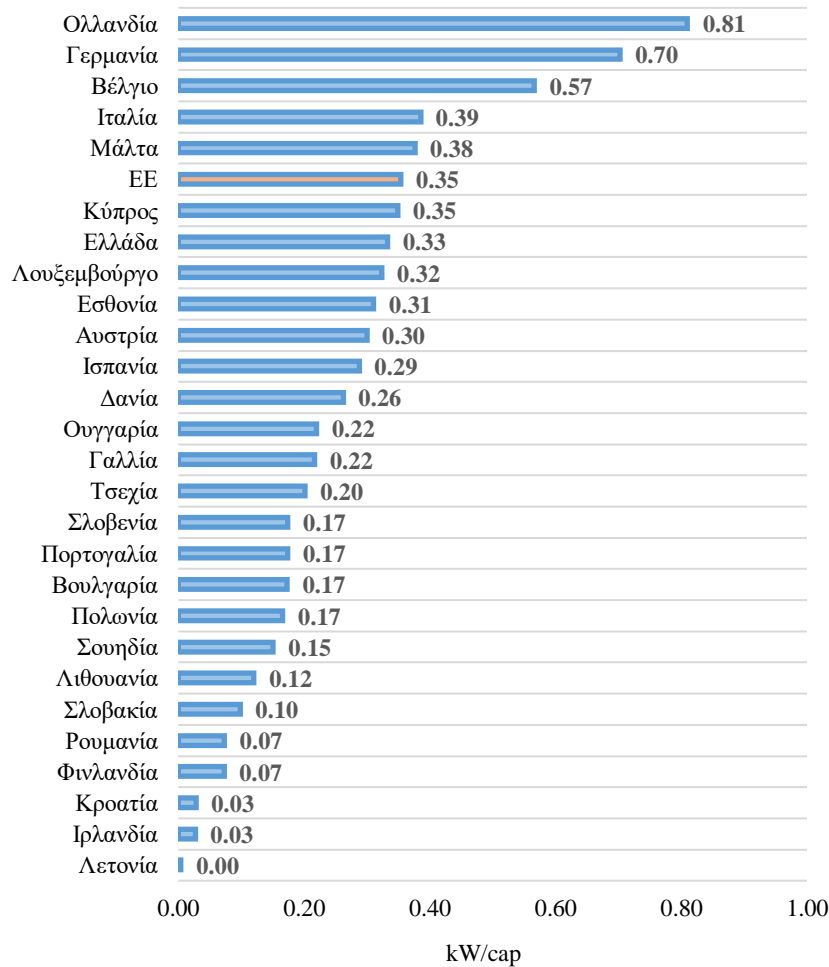
Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η παγκόσμια προσφορά σε ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις για το 2021 ήταν **1.003 TWh** (IEA, 2022c) και ότι τα φωτοβολταϊκά στέγης του οικιακού τομέα αποτελούν το **28%** της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων (IEA, 2022b), προκύπτει η πληροφορία ότι περίπου **281 TWh** παγκοσμίως παράγονται από φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας του οικιακού τομέα.

Σύμφωνα με τους *Masson & Kaizuka (2021)*, το **55%** της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων των κρατών μελών της ΕΕ αφορά φωτοβολταϊκά στέγης. Δεδομένου ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων στο σύνολο της ΕΕ ήταν **158 GW** (Πίνακας 1), σχεδόν **87 GW** αφορούν φωτοβολταϊκά στέγης¹.

Σύμφωνα με δεδομένα του 2022, όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών που αντιστοιχεί σε κάθε πολίτη της ΕΕ, αναλογικά με τον πληθυσμό της κάθε χώρας, η Ολλανδία είναι πρώτη σε εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών ανά κάτοικο με **0,81 kW/cap** (Διάγραμμα 5). Ακολουθεί η Γερμανία με **0,70 kW/cap**, το Βέλγιο με **0,57 kW/cap**, η Ιταλία με **0,39 kW/cap** και η Μάλτα με **0,38 kW/cap**. Ενώ ο μέσος όρος της ΕΕ είναι στα **0,35 kW/cap**.

¹ Τόσο του οικιακού, όσο και του εμπορικού τομέα.

**Κατά κεφαλήν εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στην ΕΕ
(kW/cap)**



Διάγραμμα 5. Εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά (εκτός CSP) ανά κάτοικο για τα κράτη μέλη της ΕΕ (δεδομένα 2022).

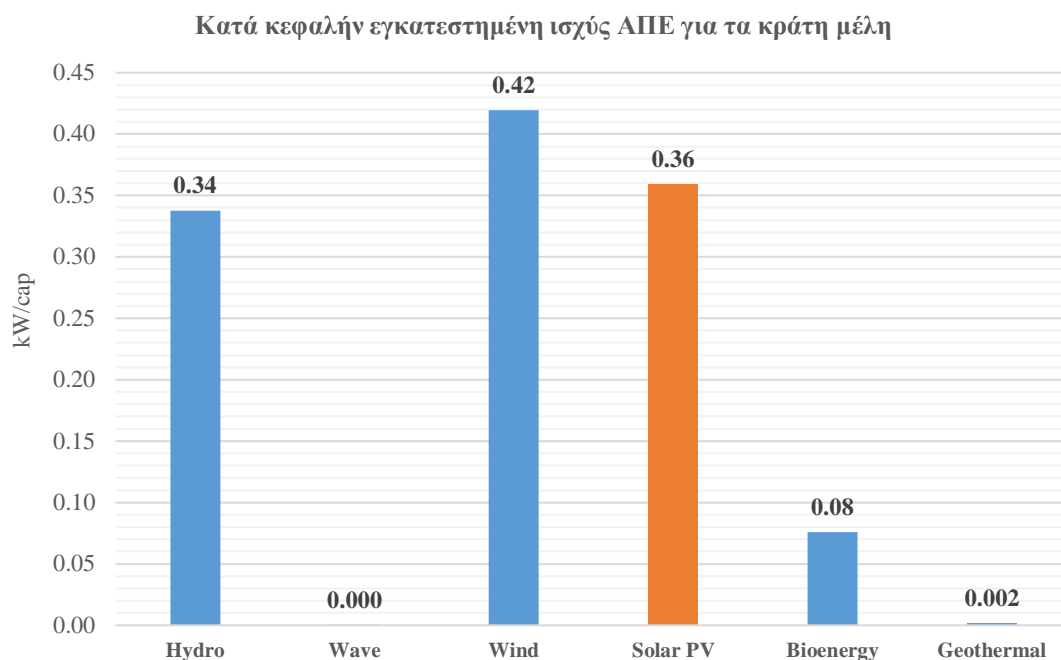
Η αύξηση της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα (έως 20 kW) εξαρτάται άμεσα από τα εργαλεία/σχήματα ενεργειακής πολιτικής που υποστηρίζουν Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας που χρησιμοποιούνται σε κάθε χώρα. Ανάλυση των εργαλείων/σχημάτων αυτών γίνεται στην **Ενότητα 4.2** ανά υπό μελέτη κράτος μέλος της ΕΕ.

2.5. Ανάγκη για ενεργειακό συμψηφισμό και αυτοπαραγωγή με αποθήκευση στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης

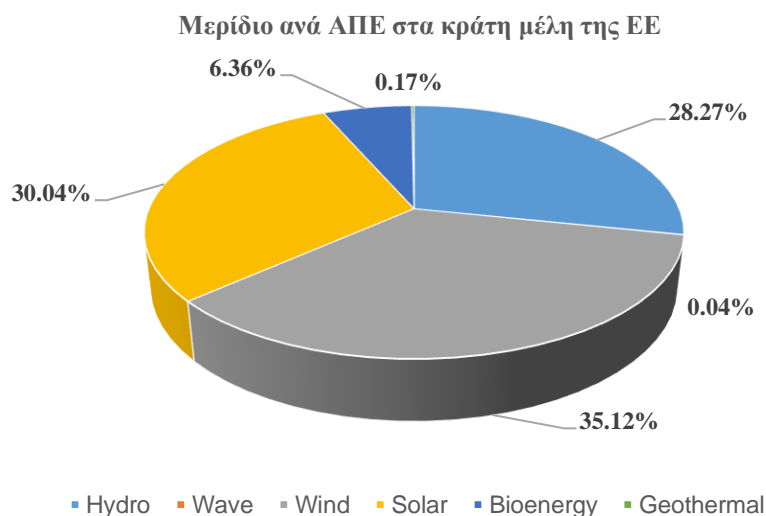
Η κλιματική κρίση που βιώνει ο πλανήτης καθιστά επιτακτική την ανάγκη για ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στους ενεργειακούς χάρτες των χωρών παγκοσμίως. Στα πλαίσια της ένταξης αυτής, δημιουργείται η ανάγκη για εργαλεία ενεργειακής πολιτικής τα οποία υποστηρίζουν την διάχυση των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (μεταξύ των οποίων και τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας).

Οι τρεις ευρέως διαδεδομένες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι η αιολική (“wind”), η ηλιακή (“solar”) και η υδροηλεκτρική (“hydro”). Στο **Διάγραμμα 6** επισημαίνεται η ισχύς που αναλογεί σε κάθε κάτοικο της ΕΕ για κάθε ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ενώ στο **Διάγραμμα**

7 αποτυπώνεται το ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος ανά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας σε σχέση με το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ΕΕ.



Διάγραμμα 6. Εγκατεστημένη ισχύς ανά ΑΠΕ και ανά κάτοικο της ΕΕ για το 2021.



Διάγραμμα 7. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στα κράτη μέλη της ΕΕ για το 2021.

Στα πλαίσια της διάχυσης των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με σκοπό την σταδιακή απανθρακοποίηση και την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, έχουν θεσπιστεί συμφωνίες μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ, οι οποίες ορίζουν τα νομοθετικά και ρυθμιστικά πλαίσια μέσα στα οποία οφείλουν να δράσουν τα κράτη μέλη της ΕΕ. Αυτές είναι:

- Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (“European Green Deal”).
- Το Πακέτο Fit-for-55 (“Fit-for-55 Package”).
- Η Συμφωνία του Παρισιού (“Paris Agreement”).

Για την επίτευξη των στόχων που αναφέρονται στις παραπάνω συμφωνίες, τα κράτη μέλη της ΕΕ εφαρμόζουν διάφορα εργαλεία ενεργειακής πολιτικής. Στόχος αυτής της ενότητας είναι να αποτυπωθεί η ανάγκη που υπάρχει για ενεργειακό συμψηφισμό (“net metering”), με στόχο

την διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, καθώς επίσης και η ανάγκη για αυτοπαραγωγή με αποθήκευση ενέργειας.

Για να γίνει αντιληπτή η ανάγκη για “net metering”, αρκεί να συγκριθεί η Καθαρή Παρούσα Αξία που θα έχει ένα έργο εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα για κάθε μία από τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Ο αυτοπαραγωγός (“prosumer”) αποζημιώνεται για την ηλεκτρική ενέργεια που εγχέει στο δίκτυο με τη μέθοδο του “net metering”.
- Ο αυτοπαραγωγός (“prosumer”) αποζημιώνεται για την ηλεκτρική ενέργεια που εγχέει στο δίκτυο με τη μέθοδο του “net billing”.

Σύμφωνα με έρευνα των *Dufo-Lopez & Bernal-Agustin (2015)*, το “Levelised Cost of Energy (LCOE)” για τις παρακάτω περιπτώσεις έχει ως εξής (Πίνακας 1.2):

- “Net metering (NM)” - για εγκατάσταση 1,5 kW_p και 2 kW_p
- “Net billing (NB)” - για εγκατάσταση 1,5 kW_p και 2 kW_p
- Καταναλωτής χωρίς φωτοβολταϊκό σύστημα (nonPV)
- Μόνο ιδιοκατανάλωση (onlySC) - για εγκατάσταση 1,5 kW_p και 2 kW_p

Πίνακας 2. LCOE (€/kWh) ανά μηχανισμό και ανά εγκατάσταση (1,5 και 2 kW).

Περίπτωση	LCOE (€/kWh)
NM (1,5 kW _p)	0,1472
NB (1,5 kW _p)	0,1625
onlySC (1,5 kW _p)	0,1933
NM (2 kW _p)	0,1594
NB (2 kW _p)	0,1746
onlySC (2 kW _p)	0,2042
nonPV	0,2042

Πηγή: Dufo-Lopez & Bernal-Agustin, 2015.

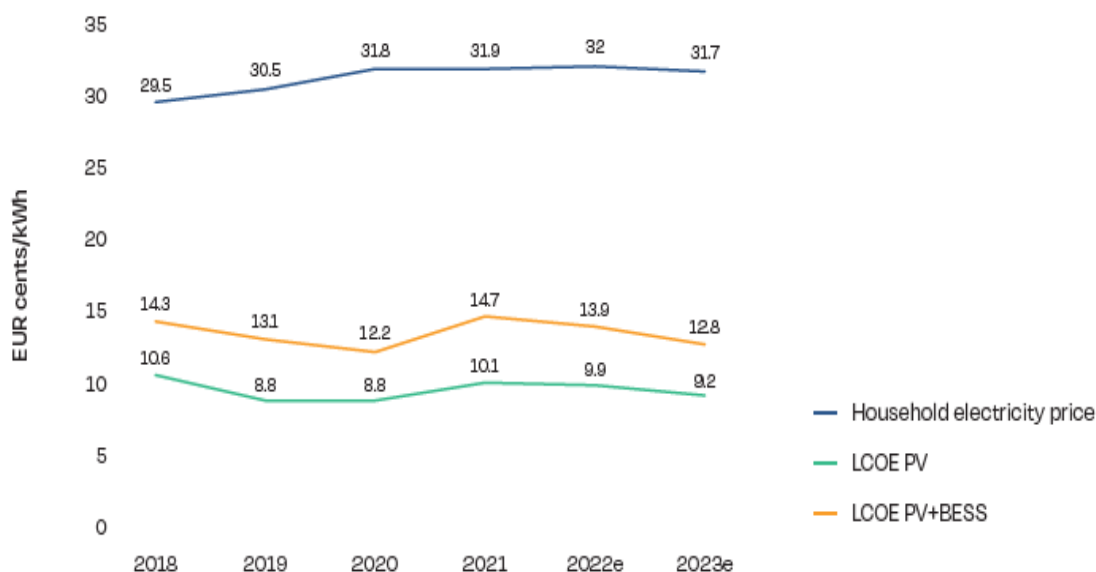
Οι εν λόγω τιμές είναι ενδεικτικές (η έρευνα έγινε για την Ισπανία το 2015), ωστόσο ο **Πίνακας 2**, καθιστά σαφές ότι το “LCOE” είναι εμφανώς χαμηλότερο όταν η πίστωση του αυτοπαραγωγού γίνεται με τη μέθοδο του ενεργειακού συμψηφισμού, δηλαδή με βάση την λιανική τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παραπάνω τιμές ενδέχεται να είναι διαφορετικές σε σύγκριση με τις σημερινές (2022), ωστόσο η διαφορά που έχουν μεταξύ τους παραμένει σταθερή. Συνεπώς, η προώθηση του ενεργειακού συμψηφισμού σε όλο και περισσότερα κράτη μέλη της ΕΕ, αποτελεί ισχυρό χρηματοοικονομικό κίνητρο για τους πολίτες και μπορεί να φέρει όλο και περισσότερες επενδύσεις, με αποτέλεσμα την αύξηση της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα. Επιπρόσθετα, η υιοθέτηση εργαλείων αποζημίωσης τύπου “feed-in tariff” που βρίσκονται τουλάχιστον στο ύψος του “LCOE” της επένδυσης, μπορούν επίσης να υποστηρίξουν τη περαιτέρω διάχυση της εν λόγω τεχνολογίας (*Comello & Reichelstein, 2017*). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το “LCOE” για μία εγκατάσταση 2 kW_p χωρίς τροφοδοσία του δικτύου (μόνο κατανάλωση), είναι ίδιο με το να μην εγκατασταθεί φωτοβολταϊκό σύστημα.

Το δεύτερο κομμάτι που καθίσταται αναγκαίο για την διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, είναι η δυνατότητα αυτοπαραγωγής με αποθήκευση ενέργειας. Η αυτοπαραγωγή με αποθήκευση ενέργειας έχει οφέλη τόσο για τους αυτοπαραγωγούς, όσο και για το δίκτυο διανομής. Τα λεγόμενα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία (“BESS”) μπορούν να βοηθήσουν το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να επιλύσει το πρόβλημα της συμφόρησης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας,

μετατοπίζοντας το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας σε χρόνους με αυξημένη ζήτηση (Henni et al., 2021). Όσον αφορά τους αυτοπαραγωγούς, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία τείνουν να γίνονται όλο και πιο αναγκαία, καθώς εν καιρώ ενεργειακής κρίσης (2022), η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας γίνεται όλο και μεγαλύτερη, αφού η μεγαλύτερη αυτοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πραγματοποιείται ώρες που πιθανόν οι κάτοικοι να μην κάνουν χρήση του κτηρίου (για παράδειγμα τις μεσημβρινές ώρες). Με την χρήση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία, μεγιστοποιείται η ιδιοκατανάλωση, καθώς οι αυτοπαραγωγοί έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μεταγενέστερο χρόνο, ανάλογα με τις ανάγκες τους σε ηλεκτρική ενέργεια (Zakeri et al., 2021), κάνοντας έτσι το δίκτυο πιο σταθερό.

Σχετικά με την εξοικονόμηση κόστους που μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την εφαρμογή τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, οι Zakeri et al. (2021) σε πρόσφατη έρευνά τους υπολόγισαν ότι ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να μειώσει τον λογαριασμό ηλεκτρισμού για τους πολίτες από **41%** έως και **74%**. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή φωτοβολταϊκών με δυνατότητα αποθήκευσης δεν είναι βιώσιμη οικονομικά χωρίς πολιτικές παρεμβάσεις (λόγω του υψηλού κεφαλαιουχικού κόστους που προκαλεί η αυξημένη τιμή στις μπαταρίες), ωστόσο, το υψηλό κόστος των μπαταριών αναμένεται να μειωθεί, καθώς αυξάνεται η παραγωγή μπαταριών παγκοσμίως (Kumar et al., 2022).

Κλείνοντας, πρωτοπόρο κράτος μέλος της ΕΕ στην εφαρμογή της εν λόγω τεχνολογίας είναι η Γερμανία (SolarPower Europe, 2021), της οποίας το “LCOE” της τεχνολογίας (**Διάγραμμα 8**) έφτασε έως και **0,101 €/kWh** το 2021, πολύ χαμηλότερο από το ύψος της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα (**0,319 €/kWh**).



Διάγραμμα 8. Σύγκριση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας με το LCOE των Φ/Β (με αποθήκευση) στη Γερμανία. Πηγή: SolarPower Europe, 2021.

3. Μεθοδολογικό πλαίσιο

3.1. Μοντελοποίηση βάσει πρακτόρων (“agent-based modelling”)

Στόχος αυτής της ενότητας είναι να παρουσιάσει στον αναγνώστη τον τρόπο λειτουργίας της λεγόμενης «μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων» (“Agent-based modelling”). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το υπολογιστικό εργαλείο μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων “ATOM” (Ενότητα 3.2) χρησιμοποιείται για την εξαγωγή σεναρίων διάχυσης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα.

Οι 4 περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται τα μοντέλα βάσει πρακτόρων είναι οι εξής (Bonabeau, 2002):

- Προσομοιώσεις Ροής (“flow simulations”).
- Οργανωτικές Προσομοιώσεις (“organisational simulations”).
- Προσομοιώσεις Αγοράς (“market simulations”).
- Προσομοιώσεις Διάχυσης (“diffusion simulations”).

Η περιοχή στην οποία θα εφαρμοστεί στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας το υπολογιστικό εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης βάσει πρακτόρων “ATOM”, είναι για την **προσομοίωση διάχυσης** φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα.

Βασική αρχή των μοντέλων βάσει πρακτόρων είναι να προσομοιώνουν ένα γεγονός από την οπτική γωνία των μονάδων που το αποτελούν. Στα πλαίσια της μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων, ένα σύστημα μοντελοποιείται ως ένα σύνολο αυτόνομων οντοτήτων, οι οποίες λαμβάνουν αποφάσεις και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε τοπικό επίπεδο (Bonabeau, 2002; Railsback & Grimm, 2019). Αυτές οι οντότητες ονομάζονται «πράκτορες» (“agents”). Η αλληλεπίδρασή τους σε τοπικό επίπεδο σημαίνει ότι συνήθως οι «πράκτορες» δεν αλληλεπιδρούν με όλους τους άλλους «πράκτορες», αλλά κυρίως με τους γειτονικούς (σε όρους γεωγραφικούς ή δικτυακούς όταν μελετώνται συμπεριφορές στα πλαίσια του διαδικτύου). Τα μοντέλα βάσει πρακτόρων συχνά βασίζονται σε κοινωνιολογικές και ψυχολογικές θεωρίες, στην θεωρία παιγνίων, κ.λπ., παρά στην βελτιστοποίηση ενός μεγέθους (Krumm et al., 2022).

Επιπροσθέτως, σε ένα μοντέλο βάσει πρακτόρων, οι «πράκτορες» θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα για εξέλιξη, επιτρέποντας έτσι μη αναμενόμενες συμπεριφορές να λάβουν χώρα. Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι τα μοντέλα βάσει πρακτόρων δεν ανάγονται στις μονάδες του συστήματος, αλλά στο σύνολο των μερών, λόγω των αλληλεπιδράσεων που υπάρχουν μεταξύ τους (Bonabeau, 2002).

Οι «πράκτορες» μπορεί να είναι οργανισμοί, άνθρωποι (μονάδες), επιχειρήσεις και γενικότερα οποιαδήποτε οντότητα εκπροσωπεί έναν κοινό στόχο. Αυτό συνεπάγεται ότι οι «πράκτορες» συνήθως διαφέρουν μεταξύ τους ως προς κάποια χαρακτηριστικά, όπως είναι το μέγεθος, η τοποθεσία που βρίσκονται, τα αποθέματα πόρων που διαθέτουν και τα ιστορικά στοιχεία τους (Railsback & Grimm, 2019). Επομένως, οι «πράκτορες» χαρακτηρίζονται από προσαρμοστική συμπεριφορά (adoptive behavior). Προσαρμόζονται στις τρέχουσες καταστάσεις τις οποίες βιώνουν, στις συμπεριφορές άλλων «πρακτόρων» και στο περιβάλλον τους (Bonabeau, 2002; Railsback & Grimm, 2019).

Σύμφωνα με τον Bonabeau (2002), ειδικό στα «πολύπλοκα συστήματα» και αρχισυντάκτη του επιστημονικού περιοδικού «Advances in Complex Systems» και τους Rai & Douglas (2016), τα βασικά πλεονεκτήματα της μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων είναι τα εξής:

- Εντοπίζει τα *αναδιδόμενα φαινόμενα* (“emergent phenomena”). Ο όρος «αναδιδόμενα φαινόμενα» περιγράφει φαινόμενα που συμβαίνουν όταν μια οντότητα παρατηρείται ότι έχει ιδιότητες τις οποίες δεν έχουν τα μέρη που την αποτελούν ή συμπεριφορές που εμφανίζονται μόνο όταν τα μέρη που την αποτελούν αλληλεπιδρούν με ένα ευρύτερο σύνολο.
- Παρέχει μια φυσική περιγραφή ενός συστήματος παρά τεχνική, λαμβάνοντας υπόψη κοινωνικές παραμέτρους.
- Είναι ευέλικτα.

3.2. Το υπολογιστικό εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης βάσει πρακτόρων “ATOM”

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, η προσομοίωση σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, γίνεται με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης βάσει πρακτόρων “ATOM” (“Agent-based Technology adOption Model”), το οποίο αναπτύχθηκε μεταξύ άλλων εργαλείων που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία (*Chatterjee et al., 2022; Stavrakas & Flamos, 2020*), από το Εργαστήριο Τεχνοοικονομικής Ενεργειακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς και αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου “Business Strategy Assessment Model (BSAM)” που αναπτύχθηκε από τους *Papadelis et al. (2012)*, με στόχο να εστιάζει στους τελικούς καταναλωτές, αντί για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας.

Το “ATOM” είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων, το οποίο εκτός από την αναμενόμενη υιοθέτηση τεχνολογιών από τους χρήστες («πράκτορες») υπό διαφορετικά υποστηρικτικά πλαίσια και πολιτικές, επιτρέπει στον χρήστη του μοντέλου να εξετάζει και να ποσοτικοποιεί τις αβεβαιότητες (“uncertainties”) που σχετίζονται με τις προτιμήσεις και τις επιλογές των «πρακτόρων» και τα κριτήρια με τα οποία λαμβάνουν τις αποφάσεις τους (*Michas et al., 2020; Stavrakas et al., 2019*). Προσομοιώνει το κατά πόσο οι «πράκτορες» θα αποφασίσουν να υιοθετήσουν την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας για την κατοικία τους, με βάση πολύπλοκες παραμέτρους που καθορίζουν αυτήν την απόφαση. Αυτές οι παράμετροι διακρίνονται σε κοινωνικές (“social”), τεχνολογικές (“technological”) και σχετιζόμενες με την αγορά (“market-related”). Ο Πίνακας 3 αποτυπώνει επιγραμματικά τις “agent-related” παραμέτρους που επηρεάζουν την απόφαση των «πρακτόρων» σχετικά με το αν θα επενδύσουν σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, όπως προσομοιώνονται στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” (*Stavrakas et al., 2019*):

Πίνακας 3. Περιγραφή των “agent-related” παραμέτρων που προσομοιώνει το υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” και επηρεάζουν την απόφαση των «πρακτόρων» σχετικά με την επένδυση σε Φ/Β μικρής κλίμακας.

Παράμετροι σχετιζόμενες με τους «πράκτορες»	Περιγραφή
<i>Κοινωνικές</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Οι αρχικές πεποιθήσεις των «πρακτόρων» όσον αφορά την κερδοφορία της επένδυσης. • Το φαινόμενο της κοινωνικής εκμάθησης των «πρακτόρων» (στο οποίο οι «πράκτορες» αναθεωρούν τις αρχικές τους πεποιθήσεις βασισμένοι στην εμπειρία που έχουν άλλοι «πράκτορες» στον κοινωνικό τους κύκλο, οι οποίοι έκαναν την επένδυση).

	<ul style="list-style-type: none"> • Η αντίσταση των «πρακτόρων» να επενδύσουν που εξαρτάται από τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης της επένδυσης και από το πλήθος των «πρακτόρων» που έχουν ήδη επενδύσει στην εν λόγω τεχνολογία. • Η πιθανότητα οι «πράκτορες» να υλοποιήσουν την επένδυση (αυξάνεται όσο η «αντίσταση» μειώνεται). • Η αδράνεια των «πρακτόρων» να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες.
<i>Σχετιζόμενες με την Αγορά</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Η εξέλιξη της λιανικής τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας. • Η εξέλιξη της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα.
<i>Τεχνολογικές</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Η εξέλιξη του κόστους επένδυσης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία. • Την εξέλιξη του κόστους επένδυσης των φωτοβολταϊκών πάνελ.

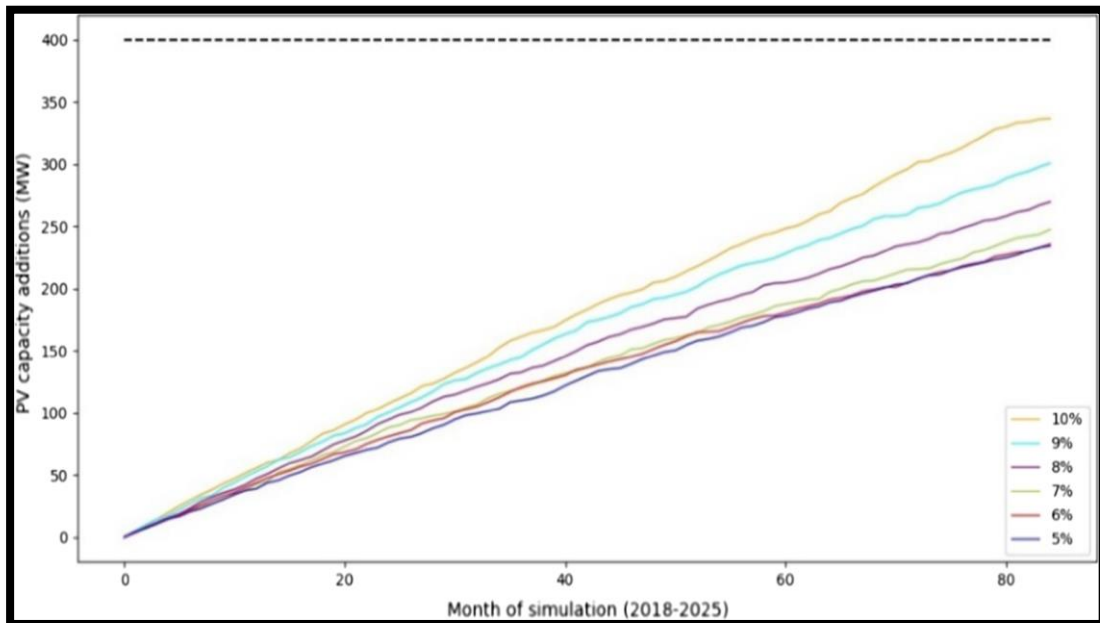
Πηγή: Stavrakas et al., 2019.

Ενώ τα πέντε (5) μεθοδολογικά βήματα που εκτελούνται για την χρήση του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”, είναι τα εξής (*Stavrakas et al., 2019*):

1. **Ορισμός (“Definition”) του συνόλου των παραμέτρων** που σχετίζονται με τους «πράκτορες» και καθορίζουν την συμπεριφορά και τις αποφάσεις τους. Στη συνέχεια, ανάπτυξη των μαθηματικών συναρτήσεων που αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους με στόχο την παραγωγή αποδεκτών ευρών τιμών.
2. **Βαθμονόμηση (“Calibration”) των τιμών των παραμέτρων** του βήματος 1 για τον εντοπισμό του κατάλληλου εύρους αυτών των τιμών. Η βαθμονόμηση των τιμών γίνεται με βάση ιστορικά δεδομένα, παρατηρήσεις σχετικές με την τεχνολογία υπό μελέτη και γεωγραφικά και κοινωνικοοικονομικά δεδομένα, υποθέτοντας πως η αβεβαιότητα σχετικά με τις τιμές που θα έχουν οι παράμετροι στο μέλλον, συνεπάγεται ότι οι ιστορικές διακυμάνσεις των τιμών είναι αντιπροσωπευτικές για να προσομοιώσουν το μέλλον. Στο τέλος της βαθμονόμησης, αν τα εύρη των τιμών είναι μικρά, ο χρήστης θα πρέπει να τα επανεξετάσει πριν συνεχίσει, ενώ αν είναι μεγαλύτερα από ότι χρειάζεται, απαιτείται ανάλυση ευαισθησίας (“sensitivity analysis”) για να ελεγχθεί το εάν και για ποιες παραμέτρους ισχύουν τα μεγάλα εύρη τιμών.
3. **Ανάλυση Ευαισθησίας (“Sensitivity Analysis”)**, με στόχο την ποσοτικοποίηση της σημαντικότητας των αβέβαιων παραμέτρων, εξηγώντας ποιοι παράμετροι του συνόλου δεδομένων εισόδου (“input dataset”) είναι περισσότερο υπεύθυνες για την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου.
4. **Ανάλυση Σεναρίων (“Scenario Analysis”)** για σύγκριση μεταξύ δύο ή περισσότερων καταστάσεων και ποσοτικοποίηση των διαφορών τους. Πρόκειται για προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής που εστιάζει στην εξέλιξη του συστήματος που προκύπτει από την αλληλεπίδραση των «πρακτόρων» (προβλέψεις πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του κατά πόσο τα εργαλεία πολιτικής οδηγούν σε επιθυμητά αποτελέσματα.
5. **Οπτικοποίηση (“Visualisation”) των αποτελεσμάτων**, μέσα από διαγράμματα στα οποία υπάρχουν μπάρες σφαλμάτων (“error bars”), οι οποίες αποτυπώνουν γραφικά τον

βαθμό της αβεβαιότητας που υπάρχει στα αποτελέσματα του μοντέλου. Τα αποτελέσματα σχετικά με τον βαθμό υιοθέτησης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα ανάγονται σε εθνικό επίπεδο μέσα από ιστορικά δεδομένα και παρατηρήσεις του παρελθόντος.

Ενδεικτικά, στο **Διάγραμμα 9** αποτυπώνεται ο βαθμός υιοθέτησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στην Ελλάδα από το 2018 μέχρι το 2025, δεδομένης πτώσης στο κόστος επένδυσης για αποθήκευση ενέργειας (από 5% μέχρι 10% με βήμα 1%).



Διάγραμμα 9. Βαθμός υιοθέτησης Φ/Β μικρής κλίμακας στην Ελλάδα για την περίοδο 2018-2025 συναρτήσει της μείωσης του κόστους επένδυσης σε αποθήκευση ενέργειας (από 5% μέχρι 10%). Πηγή: Stavrakas et al., 2019.

Στη συνέχεια, συνοψίζονται επιγραμματικά οι εισοδοί (“inputs”) και οι έξοδοι (“outputs”) που απαιτούνται για την λειτουργία του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” (**Πίνακας 4**). Όλα τα δεδομένα που εισέρχονται στο μοντέλο είναι γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού Python και υπό τη μορφή αρχείων “CSV (Comma-Separated Values)”.

Πίνακας 4. Είσοδοι και έξοδοι του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”.

Είσοδοι	Έξοδοι
<ul style="list-style-type: none"> • Ιστορικά δεδομένα σχετικά με την ζήτηση για επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας • Κόστος επένδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας • Κόστος επένδυσης σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία (“BESS”) • Λιανική τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας • Εργαλεία και σχήματα αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών 	<ul style="list-style-type: none"> • Σενάρια (οπτικοποιημένα) για τις μελλοντικές προσθήκες σε εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας

Πηγή: TEESlab, 2022.

3.3. Μεθοδολογικό πλαίσιο βαθμονόμησης του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”

Στο κεφάλαιο αυτό αποτυπώνονται αναλυτικά οι εισοδοί (“inputs”) που δίνονται στο μοντέλο για την εξαγωγή σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στα υπό μελέτη κράτη μέλη της ΕΕ.

Η βαθμονόμηση (“calibration”) ενός μοντέλου ορίζεται ως η εύρεση ενός μοναδικού συνόλου παραμέτρων/εισόδων του μοντέλου, οι οποίες παρέχουν μια καλή περιγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος και μπορεί να επιτευχθεί αντιπαραθέτοντας τις προβλέψεις του μοντέλου με τα πραγματικά μεγέθη που προκύπτουν στο σύστημα (Sun & Sun, 2015).

Οι εισοδοί των παραμέτρων στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” δίνονται στο μοντέλο σε μηνιαίο επίπεδο. Έτσι, γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Η ιστορική εξέλιξη της ζήτησης σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας δίνεται στο μοντέλο σε αθροιστικούς όρους.
- Το κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (“PV Cost”), το κόστος αποθήκευσης ενέργειας (“Battery Cost”) και η λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (“Retail Electricity Price”) παραμένουν σταθερά μέσα στη διάρκεια ενός έτους, δηλαδή είναι σταθερά για τους 12 (ή 6 σε ορισμένες περιπτώσεις όπως στην Πορτογαλία και την Πολωνία) μήνες κάθε έτους.
- Το ίδιο με παραπάνω ισχύει και για τις επιδοτήσεις τύπου “feed-in” (όπου υφίστανται).
- Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως εισοδοί στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” για τη βαθμονόμησή του, εξήχθησαν με βάση τις παρακάτω πηγές:
- Τα “National Survey Reports” του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (“International Energy Agency-IEA”) για την ιστορική εξέλιξη της ζήτησης, το κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας και τις “Feed-in” επιδοτήσεις (όπου υφίστανται).
- Έρευνα αγοράς για το κόστος των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία.
- Τους ιστότοπους του “Global Petrol Prices”² και του “Statista”³ για την λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο αφορά την εξέταση της διάχυσης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα για τα υπό μελέτη κράτη μέλη της ΕΕ και ως εκ τούτου την εξέταση των πολιτικών που εφαρμόζονται ή που είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν για την επίτευξη των στόχων που ορίζονται στα Εθνικά Σχέδια Ενέργειας & Κλίματος των εκάστοτε χωρών. Ο προσδιορισμός αυτών των δύο τομέων εξέτασης προσδιορίζεται μέσα από το υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” (**Ενότητα 3.2**), το οποίο αποτελείται από τρεις βασικές ενότητες μοντελοποίησης (Stavrakas & Flamos, 2022):

- **Ενότητα Βαθμονόμησης (“Calibration”)**: Καθορίζονται τα σύνολα των βασικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά των οντοτήτων («πρακτόρων») και μέσα από αυτή τη διαδικασία βρίσκεται το κατάλληλο εύρος τιμών ανά παράμετρο με βάση ιστορικά δεδομένα και παραμέτρους. Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται η βαθμονόμηση του μοντέλου για τα υπό μελέτη κράτη μέλη της ΕΕ.
- **Ενότητα Ανάλυσης Ευαισθησίας (“Sensitivity Analysis”)**: Σε αυτή την ενότητα γίνεται ποσοτικοποίηση και εξέταση των αβεβαιοτήτων που διέπουν τα χαρακτηριστικά

² https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/.

³ <https://www.statista.com/statistics/263492/electricity-prices-in-selected-countries/>.

και τα κριτήρια λήψης αποφάσεων των «πρακτόρων» με βάση τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης.

- **Ενότητα Ανάλυσης Σεναρίων (“Scenario Analysis”)**: Σε αυτή την ενότητα εφαρμόζεται προσομοίωση σε μελλοντικό χρονικό ορίζοντα με βάση τα ιστορικά δεδομένα και τις παρατηρήσεις που διέπουν την αληθοφανή συμπεριφορά των «πρακτόρων», οι οποίοι δυνητικά υιοθετούν (ή όχι) την επένδυση σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας. Η προσομοίωση γίνεται με βάση το υπό μελέτη γεωγραφικό και κοινωνικοοικονομικό πλαίσιο που διέπει την κάθε χώρα. Στόχος της ενότητας αυτής είναι η εξέταση και η ανάπτυξη υποστηρικτικών πολιτικών για την διάχυση της τεχνολογίας, καθώς και η εξέταση της τροχιάς των αποτελεσμάτων. Στο **Κεφάλαιο 6** εφαρμόζεται η προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, για τη μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας.

Με βάση την παραπάνω περιγραφή, το πρώτο βήμα που θα πρέπει να γίνει είναι ο σωστός καθορισμός του συνόλου των βασικών παραμέτρων (“agent-related parameters”) που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά και τη διαδικασία λήψης αποφάσεων των «πρακτόρων». Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, οι «πράκτορες» αποτελούν ιδιοκτήτες νοικοκυριών, οι οποίοι είτε υιοθετούν, είτε απορρίπτουν την επένδυση σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας (έως 10 kW_p) στην προσομοιωμένη χρονική περίοδο (2023-2030). Αξίζει να σημειωθεί ότι για την ποσοτικοποίηση του μοντέλου, οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών ελέγχου (βλ. Γλωσσάριο) περιγράφονται με χρήση μαθηματικών εξισώσεων με ντετερμινιστικές τιμές (δηλαδή δεν εκφράζονται ως πιθανότητες) και ως αποτέλεσμα τα προς εξέταση αριθμητικά εύρη των τιμών είναι σαφώς καθορισμένα. Οι παράμετροι που ορίζουν την κάθε οντότητα του μοντέλου είναι οι εξής (Stavrakas & Flamos, 2022):

- **Αρχικές Πεποιθήσεις (“Initial Beliefs”)**: Κάθε «πράκτορας» έχει μια ιδιωτική αρχική πεποίθηση σχετικά με τις αναμενόμενες ετήσιες καθαρές ταμειακές ροές (“cash flows”) που προκύπτουν από την επένδυση σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 300 W_p (δηλώνει την μέση ισχύ ανά φωτοβολταϊκό πάνελ). Αυτή η πεποίθηση εκφράζεται μαθηματικά στο μοντέλο ως μια κανονική κατανομή (κατανομή “Gauss”) με μέση τιμή μ^{CF} και τυπική απόκλιση ρ^{CF} . Συνεπώς, ισχύει ότι, υψηλό μ^{CF} και χαμηλό ρ^{CF} σημαίνει προθυμία για την ανάληψη του επενδυτικού ρίσκου, ενώ αντίθετα χαμηλό μ^{CF} και υψηλό ρ^{CF} σημαίνει μη προθυμία για την ανάληψη του επενδυτικού ρίσκου. Για την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”, οι αρχικές πεποιθήσεις κάθε οντότητας προσδιορίζονται με τυχαίο τρόπο από δύο καθολικές πιθανοτικές κατανομές (μία για την μ^{CF} και μία για την ρ^{CF}). Τα αριθμητικά εύρη της παραμέτρου αυτής καθορίζονται με ακρίβεια μέσα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης.
- **Κοινωνική Εκμάθηση (“Social Learning”)**: Αυτή η παράμετρος χαρακτηρίζει την κοινωνική δομή του μοντέλου και εκφράζει την επικοινωνία και την αλληλεπίδραση μεταξύ των «πρακτόρων». Επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη λήψη της απόφασης για υιοθέτηση (ή μη) της τεχνολογίας. Στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”, κάθε οντότητα («πράκτορας») λαμβάνει πληροφορίες από τις οντότητες που ανήκουν στον κοινωνικό της περίγυρο, οι οποίες έχουν ήδη λάβει την απόφαση να επενδύσουν στην τεχνολογία (έχουν ήδη εγκαταστήσει φωτοβολταϊκό σύστημα στην κατοικία τους). Οι πληροφορίες αυτές αφορούν κατά κύριο λόγο την κερδοφορία της επένδυσης σε κάθε χρονικό σημείο και χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των πεποιθήσεων της κάθε οντότητας. Επισημαίνεται ότι κάθε οντότητα αλληλεπιδρά με λίγες άλλες οντότητες, λόγω του ότι

στην πραγματικότητα, τέτοιου είδους επενδυτικές αποφάσεις επηρεάζονται από έναν μικρό κύκλο ανθρώπων (οικογένεια, στενοί φίλοι, κ.λπ.).

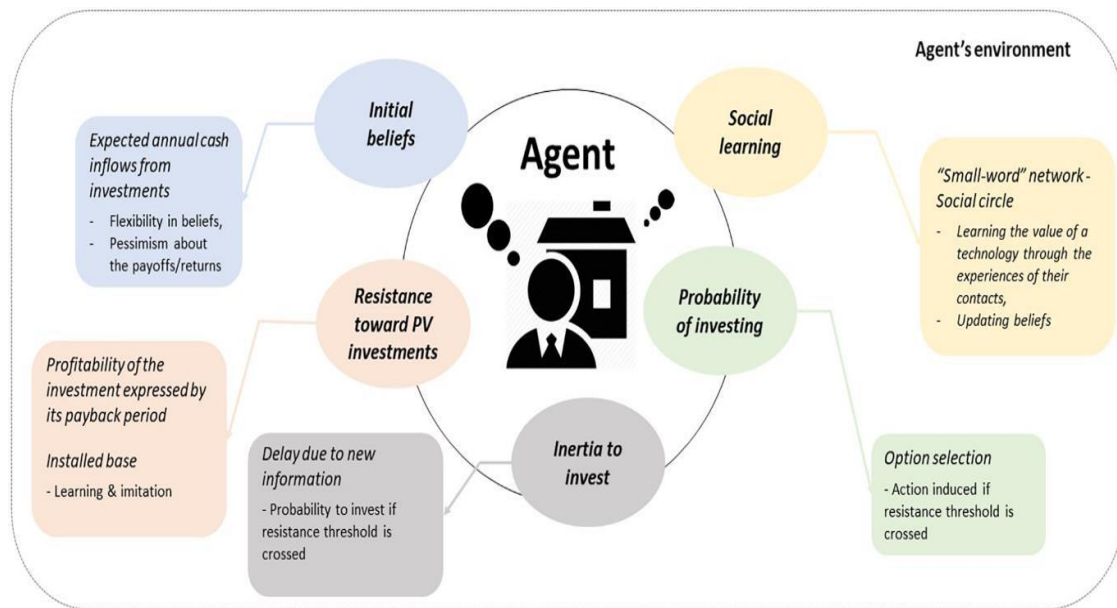
- **Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης σε Φ/Β (“Resistance Towards PV Investment”)**: Η παράμετρος αυτή μοντελοποιείται ως το σταθμισμένο άθροισμα δύο άλλων παραμέτρων και πιο συγκεκριμένα, της κερδοφορίας της επένδυσης εκφρασμένη σε όρους παρούσας αξίας και της διαφοράς μεταξύ του συνολικού αριθμού των οντοτήτων της προσομοίωσης και του αριθμού των οντοτήτων που έχουν ήδη επενδύσει στην τεχνολογία σε μια δεδομένη χρονική περίοδο i . Η πιθανότητα η περίοδος προεξόφλησης z_i να είναι ίση με το έτος i , ορίζεται υπό κανονική κατανομή, ως εξής:

$$z_i = \frac{\mu^{CF} * \sum_t^i \left(\frac{1}{(1+d)^t} \right) - capex}{\frac{i}{\rho^{CF}}} * N(0,1)$$

,όπου $capex$ το αρχικό κεφάλαιο για την υλοποίηση της επένδυσης, d το επιτόκιο προεξόφλησης και z_i η πιθανότητα η περίοδος προεξόφλησης να είναι ίση με το έτος i . Σημειώνεται ότι όσο ελαττώνεται η διαφορά μεταξύ του συνολικού αριθμού των οντοτήτων και αυτών που έχουν υλοποιήσει την επένδυση, μειώνεται και η παράμετρος της αντίστασης ως προς την υλοποίηση επένδυσης σε φωτοβολταϊκά. Αυτό καθιστά σαφή την σημασία που έχει η επιρροή που ασκεί σε μια μεμονωμένη οντότητα ο κοινωνικός της περίγυρος. Το αριθμητικό εύρος της παραμέτρου καθορίζεται σαφώς μέσα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

- **Πιθανότητα υλοποίησης της επένδυσης (“Probability of Investing”)**: Οι «πράκτορες» έχουν μια τιμή κατωφλίου (“threshold”) για την παράμετρο αντίστασής τους (παραπάνω παράμετρος). Όταν η παράμετρος αυτή είναι μικρότερη από την τιμή κατωφλίου, είναι πιθανό να λάβουν την απόφαση να υλοποιήσουν την επένδυση (όχι όμως απαραίτητα). Για τη διαδικασία της βαθμονόμησης, γίνεται η υπόθεση ότι όταν οι «πράκτορες» αποφασίζουν να υλοποιήσουν την επένδυση, το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος στο οποίο θα επενδύσουν, καθορίζεται από την εμπειρική κατανομή πιθανότητας που προκύπτει από τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα για κάθε υπό μελέτη χώρα.
- **Αδράνεια ως προς την υλοποίηση επένδυσης (“Inertia to Invest”)**: Βασικός παράγοντας για τον οποίο οι νέες τεχνολογίες χρειάζονται χρόνο να διαδοθούν, είναι ότι οι άνθρωποι αργούν να προσαρμοστούν σε νέες πληροφορίες και να ενεργούν με βάση τα νέα δεδομένα. Συνεπώς, η παράμετρος που περιγράφει την αδράνεια ως προς την υλοποίηση της επένδυσης, εισάγεται στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” ως μια καθολική τιμή για κάθε οντότητα της προσομοίωσης και αντιπροσωπεύει την πιθανότητα υλοποίησης επένδυσης υπό την προϋπόθεση ότι η τιμή της παραμέτρου της αντίστασης υπερβαίνει την τιμή κατωφλίου της παραμέτρου. Παρ’ όλα αυτά, θα πρέπει να γίνει σαφές ότι κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, η παράμετρος της αδράνειας ως προς την υλοποίηση της επένδυσης παραμένει σταθερή. Μια πιθανή αλλαγή στην τιμή της παραμέτρου χωρίς ταυτόχρονη μεταβολή στο πλήθος των προσομοιωμένων «πρακτόρων» επηρεάζει στο τέλος της προσομοιωμένης περιόδου το ποσοστό διάχυσης της τεχνολογίας υπό εξέταση (φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας).

Το περιβάλλον υπό το οποίο δρουν οι «πράκτορες» του μοντέλου, καθώς και οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των οντοτήτων, αποτυπώνονται στην **Εικόνα 2**.



Εικόνα 2. Οπτική απεικόνιση των παραμέτρων που διέπουν την συμπεριφορά των «πρακτόρων» και βαθμονομούνται. Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.

Τα αρχικά εύρη των παραμέτρων που περιεγράφηκαν παραπάνω για τη βαθμονόμηση του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”, προσδιορίζονται όπως αποτυπώνει ο **Πίνακας 5** και είναι κοινά για όλες τις υπό μελέτη χώρες της παρούσας εργασίας. Επισημαίνεται ότι η αρχική επιλογή αυτών των τιμών, είναι αρχικά αυθαίρετη.

Πίνακας 5. Αρχικά εύρη τιμών των παραμέτρων που σχετίζονται με τους «πράκτορες».

Παράμετροι	Min	Max	Κατηγορία
Initial belief_mu (shape parameter)	40	200	Αρχικές Πεποιθήσεις
Initial belief_std (shape parameter)	10	50	
Precision_mu (scale parameter)	5	50	Κοινωνική Εκμάθηση
Precision_std (scale parameter)	1	5	
Payback_mu (shape parameter)	2	15	Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης
Payback_std (shape parameter)	0,5	8	
Installed_Base_mu (shape parameter)	5	50	
Installed_Base_std (scale parameter)	1	20	
Propensity_mu (shape parameter)	20	50	Πιθανότητα Επένδυσης
Propensity_std (scale parameter)	5	30	
Inertia	0,1	0,3	Αδράνεια ως προς την επένδυση

Όπως αναγράφει ο **Πίνακας 5**, οι παράμετροι μορφής (“shape parameters”) προσδιορίζουν τη μορφή/τροχιά της καμπύλης και είναι ανεξάρτητες από τον αριθμό των προσομοιωμένων

οντοτήτων («πρακτόρων»), ενώ οι παράμετροι κλίμακας (“scale parameters”) καθορίζουν τη διασπορά των παραμέτρων γύρω από τον μέσο όρο και εξαρτώνται άμεσα από τον αριθμό των προσομοιωμένων «πρακτόρων».

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου για τα υπό μελέτη κράτη μέλη της ΕΕ βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα (εξέλιξη ζήτησης, κόστος εγκατάστασης, κόστος αποθήκευσης, λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και επιδοτήσεις τύπου “feed-in”). Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε υποθέτοντας ότι το μοντέλο αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα ικανοποιητικά, εφόσον μπορεί να αναπαράγει τους ρυθμούς με τους οποίους αναπτύχθηκαν ιστορικά οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (*Stavrakas & Flamos, 2022*). Ουσιαστικά, η μέθοδος στοχεύει στην αναζήτηση παρόμοιων σχημάτων αθροιστικής κατανομής της διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων έως 10 kW_p στον οικιακό τομέα ανά περίπτωση, με την κλίμακα αυτής να είναι διαφορετική. Για την αποφυγή προβλημάτων μη αναγνωσιμότητας του μοντέλου (“overfitting”), τα δεδομένα εισόδου υπέστησαν κανονικοποίηση (*Stavrakas & Flamos, 2022*).

Στα πλαίσια του **Κεφαλαίου 4**, γίνεται ανάπτυξη του υποστηρικτικού πλαισίου μοντελοποίησης για τα υπό μελέτη Κράτη Μέλη, αναλύοντας τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” για τη βαθμονόμησή του, καθώς επίσης και των χαρακτηριστικών καμπύλων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα για δύο τοποθεσίες (μία βόρεια και μία νότια). Επισημαίνεται ότι για την βαθμονόμηση του μοντέλου, χρησιμοποιείται επιτόκιο προεξόφλησης ίσο με **4%**.

Τέλος, λόγω μη διαθεσιμότητας επαρκών δεδομένων, η βαθμονόμηση και η εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για εξαγωγή σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Πολωνίας δεν εφαρμόζεται. Συνεπώς, στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, η ενεργειακή ανάλυση της Πολωνίας σταματάει στα χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού της συστήματος (**Υποενότητα 4.3.6**).

Στα πλαίσια της βαθμονόμησης (**Κεφάλαιο 5**) του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων “ATOM”, η απεικόνιση των τεχνοοικονομικών δεδομένων (**Κεφάλαιο 5**) των υπό μελέτη κρατών μελών της ΕΕ πραγματοποιείται με διαγράμματα αντί πινάκων, με στόχο να είναι περισσότερο ευανάγνωστα για τους αναγνώστες.

4. Ανάπτυξη υποστηρικτικού πλαισίου μοντελοποίησης στα υπό μελέτη κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης

4.1. Επιλογή των υπό μελέτη κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Σε αυτή την ενότητα, αφού έχει ολοκληρωθεί το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, γίνεται η αναφορά των επιλεγμένων προς μελέτη Κρατών Μελών και η αιτιολόγηση της επιλογής τους. Σε αυτό το σημείο, επισημαίνεται ότι τα κράτη μέλη της ΕΕ με τη μεγαλύτερη διάχυση φωτοβολταϊκών συστημάτων⁴ είναι τα εξής (σύμφωνα με δεδομένα του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας για το 2021):

- Ισπανία - 14,2%
- Ελλάδα - 13,6%
- Ολλανδία - 11,8%
- Γερμανία - 10,9%
- Ιταλία - 9,3%

Τα κράτη μέλη της ΕΕ για τα οποία αναπτύσσεται το υποστηρικτικό πλαίσιο μοντελοποίησης για την προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής με στόχο την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, είναι η Γαλλία, η Δανία, η Ελλάδα, η Ισπανία, η Πορτογαλία, και η Πολωνία. Παρακάτω, ακολουθεί η αιτιολόγηση της επιλογής για κάθε ένα από τα έξι (6) υπό μελέτη κράτη μέλη της ΕΕ ξεχωριστά.

1) Γαλλία:

Ο βασικός λόγος για τον οποίον επιλέχθηκε η Γαλλία, είναι το υψηλό δυναμικό της σχετικά με την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσε να παράγει εάν σε κάθε δυνατή τοποθεσία του οικιακού τομέα, εγκαθίσταντο φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας (**Διάγραμμα 1**). Όπως αποτυπώθηκε στο **Διάγραμμα 1 (Ενότητα 2.3)**, η Γαλλία με ηλιακό δυναμικό **2,97-4,42 kWh/m² ανά ημέρα**, θα ήταν ικανή να παράγει περίπου **127 TWh/έτος** (*Bodis et al., 2019*). Μάλιστα, αν η Γαλλία κάλυπτε το **1%** της έκτασής της με φωτοβολταϊκά συστήματα⁵, θα μπορούσε να καλύψει την ετήσια ζήτησή της σε ηλεκτρική ενέργεια, δεδομένης της ενεργειακής της κατανάλωσης (*Suri et al., 2020*).

Ένας άλλος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η Γαλλία, είναι η σχετικά χαμηλή κατά κεφαλήν εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων (**Διάγραμμα 5**). Η Γαλλία με **0,22 kW/cap** βρίσκεται στην **14^η** θέση από τα 27 κράτη μέλη της ΕΕ, ενώ η μέση τιμή για όλη την ΕΕ βρίσκεται στα **0,35 kW/cap**. Συνεπώς, παρά το υψηλό της δυναμικό, η Γαλλία βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο όσον αφορά την διάχυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα.

Τέλος, η ηλεκτροπαραγωγή της Γαλλίας προέρχεται κατά **70%** από πυρηνική ενέργεια, σύμφωνα με το ενεργειακό της ισοζύγιο (“energy balance”). Στα πλαίσια της εναρμόνισης με τους στόχους της ΕΕ (**Ενότητα 2.5** - “European Green Deal”, κ.λπ.), η Γαλλία θα πρέπει να αυξήσει την διάχυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό της μείγμα και ιδιαίτερα στην ηλεκτροπαραγωγή, δεδομένου ότι σήμερα (2022), μόλις το **22%** της ηλεκτροπαραγωγής προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ από φωτοβολταϊκά

⁴ Με τον όρο «διάχυση φωτοβολταϊκών συστημάτων» περιγράφεται το ποσοστό των ατόμων που απέκτησε φωτοβολταϊκό σύστημα σε σχέση με το συνολικό πλήθος στο οποίο στοχεύει η τεχνολογία, σε μια ορισμένη χρονική περίοδο. Επισημαίνεται ότι στα ποσοστά που αναφέρονται στο κείμενο συμπεριλαμβάνονται όλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα και όχι μόνο τα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα.

⁵ Όχι μόνο στον οικιακό τομέα.

συστήματα μόλις το **2,67%**⁶. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πυρηνική ενέργεια δεν επιβαρύνει το περιβάλλον (*Danish et al., 2021*), αλλά ενέχει πολλούς κινδύνους όσον αφορά την ασφάλεια της χώρας.

2) Δανία:

Η επιλογή της εν λόγω χώρας προς μελέτη, βασίστηκε στο πολύ χαμηλό ποσοστό διάχυσης που έχουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα. Από το 2016 και μετά, μόλις **3.699** νοικοκυριά έχουν εγκαταστήσει φωτοβολταϊκά στο κτήριό τους (*Hansen et al., 2022*). Σύμφωνα με δεδομένα του “Our World In Data”, μόλις το **3,83%** της ηλεκτροπαραγωγής της χώρας προέρχεται από ηλιακή ενέργεια, ενώ το **48%** προέρχεται από αιολική. Αυτό συνεπάγεται υψηλότερο “LCOE” για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας του οικιακού τομέα. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, το “LCOE” των φωτοβολταϊκών του οικιακού τομέα είναι **0,1153 €/kWh**, καθιστώντας τα την πιο ακριβή πηγή ενέργειας μετά την βιομάζα.

Το “LCOE” για τα φωτοβολταϊκά με εμπορικό σκοπό (μεγαλύτερα από 100 kW_p) είναι **0,0783 €/kWh**, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μεγάλης κλίμακας (μεγαλύτερα από 8 MW) είναι **0,0439 €/kWh**. Αυτό υποδεικνύει ότι η διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της χώρας είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο.

3) Ελλάδα:

Η επιλογή της Ελλάδας ως υπό μελέτη κράτος μέλος της ΕΕ, βασίζεται κυρίως στο πολύ υψηλό ηλιακό δυναμικό το οποίο την χαρακτηρίζει. Όπως αποτυπώθηκε στο **Διάγραμμα 2**, η Ελλάδα είναι τρίτη στην κατάταξη σε “GHI” (βλ. Γλωσσάριο) με **1.639 kWh/m² ανά έτος**. Μάλιστα, όπως αποδεικνύεται κι από το **Διάγραμμα 1**, η Ελλάδα έχει τη δυνατότητα να παράγει **18 TWh/έτος** από φωτοβολταϊκά, εάν τοποθετούνταν φωτοβολταϊκά στέγης σε κάθε διαθέσιμη τοποθεσία. Αυτό την καθιστά **12^η** στην κατάταξη στην δυναμικότητα που έχουν τα κράτη μέλη της ΕΕ. Βάσει δεδομένων του “Enerdata”, η μέση κατά κεφαλήν ενεργειακή κατανάλωση στη χώρα για το 2021, ήταν **2.555 kWh/cap** (περίπου **28 TWh**, δεδομένου του πληθυσμού της χώρας). Συνεπώς, τα φωτοβολταϊκά στέγης έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν το **64%** των ενεργειακών αναγκών του οικιακού τομέα της Ελλάδας (*Nikas et al., 2020*).

4) Ισπανία:

Ο βασικός λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η Ισπανία στα υπό μελέτη κράτη μέλη της ΕΕ είναι ότι παρόλο που βρίσκεται πολύ υψηλά στην κατάταξη με βάση το ηλιακό δυναμικό (**Διάγραμμα 2 - 4^η θέση με μέση GHI ίση με 4,35 kWh/m² ανά ημέρα**) και στην κατάταξη με το δυναμικό όσον αφορά την παραγόμενη ενέργεια αν τοποθετούσε σε κάθε κτήριο του οικιακού τομέα φωτοβολταϊκά στέγης (**Διάγραμμα 1 - 4^η θέση με δυναμικό περίπου 68 TWh/έτος**), βρίσκεται χαμηλά στην κατάταξη με βάση την κατά κεφαλήν εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών (**Διάγραμμα 5 - 11^η θέση με 0,29 kW/cap**). Μάλιστα, σύμφωνα με το **Διάγραμμα 1**, οι **55** από τις 68 TWh που θα μπορούσαν να παράγουν τα φωτοβολταϊκά στέγης του οικιακού τομέα της Ισπανίας, θα είχαν αντίστοιχο “LCOE” (για την απαιτούμενη επένδυση) **0,09-0,12 €/kWh** (*Bodis et al., 2019*), πολύ πιο οικονομικό σε σύγκριση με το “LCOE” άλλων κρατών μελών της ΕΕ για την ίδια επένδυση.

Ένας ακόμη λόγος για τον οποίον επιλέγεται η Ισπανία για τη συγκεκριμένη μελέτη, είναι ο ενεργειακός στόχος που έχει θέσει με χρονικό ορίζοντα το 2030, το **74%** του ενεργειακού μείγματος της ηλεκτροπαραγωγής να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (**Υποενότητα 4.2.4**). Αναμφίβολα, σε αυτόν τον στόχο θα συμβάλλουν κι άλλες ανανεώσιμες

⁶ Δεδομένα του “Our World In Data” στη διεύθυνση: <https://ourworldindata.org/energy/country/france>.

πηγές ενέργειας (όπως για παράδειγμα η αιολική), ωστόσο, με βάση το ηλιακό δυναμικό της χώρας, η διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα θα μπορούσε να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη του ανωτέρω στόχου, δεδομένου ότι το **20%** της ενεργειακής κατανάλωσης ανήκει στον οικιακό τομέα (σύμφωνα με δεδομένα του ενεργειακού ισοζυγίου της χώρας). Επίσης, το **80%** των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας, είναι αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια, ενώ μόλις το **15%** είναι ηλιακή (IEA, 2021d).

5) Πορτογαλία:

Ο βασικός λόγος για τον οποίον επιλέγεται η Πορτογαλία, δεν διαφέρει ιδιαίτερα από τον αντίστοιχο για την επιλογή της Ισπανίας. Η Πορτογαλία είναι μια χώρα με πολύ υψηλό ηλιακό δυναμικό (μέση “GHI” ίση με **4,25 kWh/m² ανά ημέρα**), το οποίο την κατατάσσει στην **5^η** θέση μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ (Διάγραμμα 4). Εάν στην Πορτογαλία τοποθετούνταν φωτοβολταϊκά στέγης σε κάθε κτήριο του οικιακού τομέα, θα παράγονταν **24 TWh/έτος** (Διάγραμμα 1). Σύμφωνα με στοιχεία του “Enerdata”, η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας της χώρας το 2021 ήταν **238 TWh**. Αυτό σημαίνει ότι το 10% των ενεργειακών αναγκών της χώρας, θα μπορούσε να καλυφθεί από τα φωτοβολταϊκά στέγης του οικιακού τομέα.

Όσον αφορά το “LCOE” των επενδύσεων για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, η Πορτογαλία βρίσκεται στην ίδια πλεονεκτική θέση με την Ισπανία, καθώς το “LCOE” για τα φωτοβολταϊκά αυτά κυμαίνεται μεταξύ **0,09-0,12 €/kWh**. Τα μόνα Κράτη Μέλη με πλεονέκτημα χαμηλότερου “LCOE” για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα είναι η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιταλία, η Ισπανία, η Πορτογαλία, η Κύπρος, και η Μάλτα (Διάγραμμα 1). Για την Ιταλία, την Ισπανία, την Πορτογαλία, την Κύπρο, και τη Μάλτα, αυτό οφείλεται κυρίως στο υψηλό επίπεδο παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (“output”) που έχει η εν λόγω επένδυση, λόγω του πολύ υψηλού ηλιακού δυναμικού που διαθέτουν αυτές οι χώρες. Εν αντιθέσει, για τη Γαλλία και τη Γερμανία, το χαμηλότερο “LCOE” στο μεγαλύτερο μέρος των επενδύσεων, οφείλεται κυρίως στον μεγάλο πληθυσμό της χώρας, το οποίο συνεπάγεται ότι εάν υιοθετηθούν οι επενδύσεις σε μεγάλο βαθμό, το κεφαλαιουχικό κόστος της επένδυσης εγχώρια θα μειωθεί, αφού η τεχνολογία θα «προχωρήσει» στην αντίστοιχη καμπύλη εκμάθησης.

Αυτή τη στιγμή (2023), η Πορτογαλία βρίσκεται στην **18^η** θέση της κατάταξης για την κατά κεφαλήν εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ με **0,17 kW/cap** (Διάγραμμα 5), ενώ κράτη μέλη της ΕΕ με πολύ χαμηλότερο ηλιακό δυναμικό, όπως είναι η Αυστρία, βρίσκονται σε υψηλότερες θέσεις στην κατάταξη (**0,30 kW/cap**).

6) Πολωνία:

Όσον αφορά την αιτιολόγηση της επιλογής της Πολωνίας για τη μελέτη, η Πολωνία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς το ενεργειακό της προφίλ διαφέρει σε μεγάλο βαθμό σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κράτη μέλη της ΕΕ. Το ενεργειακό μείγμα της χώρας κυριαρχείται μέχρι σήμερα από ορυκτά καύσιμα και ειδικά από λιγνίτη, καθώς μεγάλα χρηματικά ποσά δαπανώνται από την κυβέρνηση σε αυτόν τον τομέα (IEA, 2022a). Μάλιστα, η χώρα δεν έχει στα άμεσα πλάνα της την απεξάρτηση του ενεργειακού της συστήματος από τον άνθρακα, γεγονός που προκαλεί απόκλιση από τις δεσμεύσεις της προς την ΕΕ. Επομένως, ο βασικότερος λόγος για τον οποίο επιλέγεται η Πολωνία, είναι η εναρμόνιση του ενεργειακού προφίλ της χώρας με τους ενεργειακούς/κλιματικούς στόχους της ΕΕ.

Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο επιλέγεται η Πολωνία, είναι ο δείκτης ενεργειακής ασφάλειας (“energy security”). Σχετικά με τις εισαγωγές της σε άνθρακα, η Πολωνία εισάγει

το μεγαλύτερο μέρος σκληρού άνθρακα (“hard coal”) από τη Ρωσία. Από το 2018 έως το 2020, οι εισαγωγές από τη Ρωσία μειώθηκαν κατά **30%**, ενώ το **8%** του όγκου της εισαγωγής χρησιμοποιήθηκε για την ηλεκτροπαραγωγή (Kulpa et al., 2022). Συνεπώς, η υποστήριξη της διάχυσης των φωτοβολταϊκών στη χώρα μέσω της ανάπτυξης της αγοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, θα μπορούσε να συμβάλει στη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης της χώρας από την Ρωσία.

Η Πολωνία έχει κάνει μεγάλα βήματα τα τελευταία χρόνια όσον αφορά την ενεργειακή της μετάβαση, με την αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων να σημειώνει σημαντική αύξηση την διετία 2020-2021 (Πίνακας 1). Η Πολωνία **υπερτετραπλασίασε** την εγκατεστημένη ισχύ της σε φωτοβολταϊκά μέσα σε δύο έτη (**από 1.539 MW το 2019 σε 6.257 MW το 2021**) και σύμφωνα με πρόβλεψη των Kulpa et al. (2022), η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών μέχρι το τέλος του 2022 θα έχει ξεπεράσει τα **11.000 MW**. Επισημαίνεται ότι το 2022 σημειώθηκε αύξηση μεγαλύτερη από **93%** σε σχέση με το προηγούμενο έτος (Kulpa et al., 2022), με το μεγαλύτερο μέρος των εγκαταστάσεων να είναι στον οικιακό τομέα από ιδιοκαταναλωτές/αυτοπαραγωγούς (“prosumer installations”).

Η μεγάλη αύξηση των φωτοβολταϊκών στη χώρα τα δύο τελευταία έτη, αποτυπώνεται και στην κατά κεφαλήν εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών, η οποία από **0,04 kW/cap** το 2019, αυξήθηκε σε **0,17 kW/cap** το 2021 (Διάγραμμα 5). Ωστόσο, παρά τη μεγάλη αύξηση, η Πολωνία βρίσκεται στην 20^η θέση της κατάταξης μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ, παρά την υψηλή δυναμικότητα που έχει σχετικά με την ενέργεια που θα ήταν ικανή να παράγει από τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα (Διάγραμμα 1 - 7^η θέση με **31 TWh/έτος**).

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι 31 TWh που θα μπορούσε να παράγει η χώρα εάν τοποθετούνταν φωτοβολταϊκά σε κάθε στέγη των κτηρίων του οικιακού τομέα, έχουν αρκετά υψηλό “LCOE” (**0,15-0,18 €/kWh**), καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας δεν έχουν σημειώσει μεγάλη διάχυση τα προηγούμενα χρόνια (με εξαίρεση την διετία 2020-2022). Αυτό σημαίνει ότι ένας λόγος ακόμη για την υποστήριξη της διάχυσης αυτής της τεχνολογίας, είναι και η πτώση του “LCOE” για τους αυτοπαραγωγούς που θα υλοποιήσουν την επένδυση και θα υιοθετήσουν την τεχνολογία, δεδομένου ότι με την περαιτέρω διάχυση της τεχνολογίας αυτής, θα μειωθεί και το κόστος παραγωγής, αφού η τεχνολογία θα μετατοπίζεται προς τα δεξιά πάνω στην καμπύλη εκμάθησης (Grafstrom & Poudineh, 2021).

4.2. Ενεργές πολιτικές υποστήριξης διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα στα υπό μελέτη Κράτη Μέλη

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά και περιγραφή του υποστηρικτικού πλαισίου για την διάχυση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας, μέσα από μία βιβλιογραφική ανασκόπηση, σχετικά με τις αντίστοιχες υποστηρικτικές πολιτικές που διέπουν τα Κράτη Μέλη που εξετάζονται στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία (Ενότητα 4.1), καθώς επίσης και στους ενεργειακούς & κλιματικούς στόχους των υπό μελέτη κρατών μελών της ΕΕ. Οι πολιτικές υποστήριξης των χωρών επιμερίζονται σε 6 βασικούς πυλώνες ενδιαφέροντος, οι οποίοι είναι (Πίνακας 8):

- Υπάρχουσα **φορολογία και νομοθεσία** σχετικά με την ηλεκτροπαραγωγή των κρατών μελών της ΕΕ (φόροι εκπομπών/φόροι κατανάλωσης).
- Σχήματα αποζημίωσης για φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα με επιδότηση τύπου “**feed-in tariff**” ή “**feed-in premium**”.

- Εργαλεία πολιτικής που υποστηρίζουν την ανάπτυξη της ιδιοκατανάλωσης (“**self-consumption**”) και της αποκεντρωμένης (“**decentralised**”) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Προώθηση του ενεργειακού συμψηφισμού (“**net metering**”), ο οποίος υποστηρίζει την προώθηση και τη διάχυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (με έμφαση στον οικιακό τομέα).
- Ύπαρξη και εφαρμογή καθεστώτων επιβολής ενεργειακής απόδοσης και πιο συγκεκριμένα αγοράς πράσινων πιστοποιητικών (“**Green Certificates Market**”) στον οικιακό τομέα των Κρατών Μελών.
- Πολιτικές προώθησης τεχνολογιών αυτοπαραγωγής με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας στον οικιακό τομέα.

4.2.1. Γαλλία

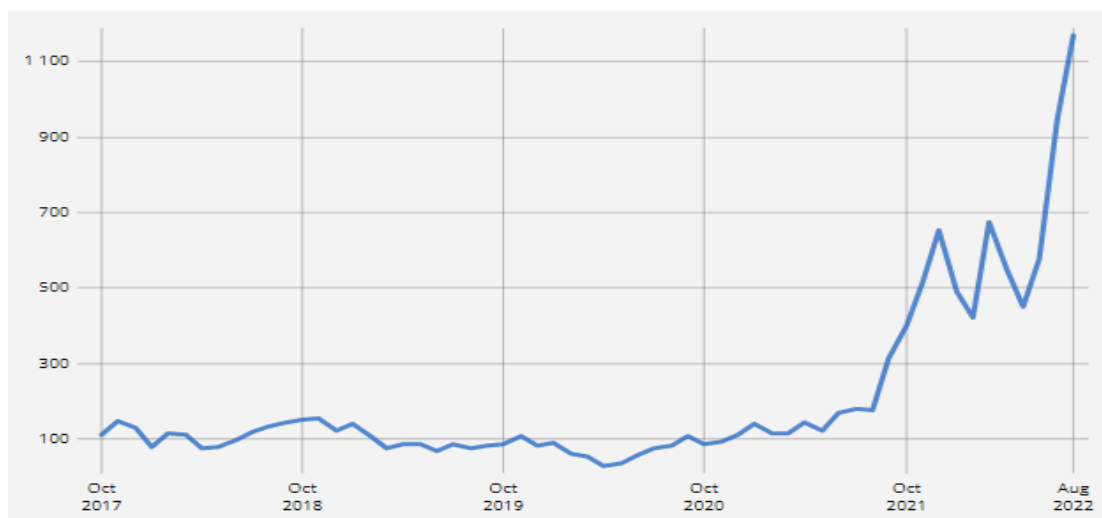
Οι ενεργειακές πολιτικές που προωθεί σήμερα (2022) η Γαλλία, έχουν σκοπό την επίτευξη των παρακάτω βασικών στόχων (IEA, 2021a):

- Σε σύγκριση με το 2012, η τελική κατανάλωση ενέργειας να μειωθεί κατά **7,6%** μέχρι το 2023 και κατά **16,5%** μέχρι το 2028.
- Σε σύγκριση με το 2012, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από ορυκτά καύσιμα να μειωθεί κατά **20%** μέχρι το 2023 και κατά **35%** μέχρι το 2028.
- Σε σύγκριση με το 1990, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την καύση για παραγωγή ενέργειας να μειωθούν κατά **27%** μέχρι το 2023 και κατά **40%** μέχρι το 2028.
- Σε σύγκριση με το 2017, η παραγωγή θερμικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές να αυξηθεί κατά **25%** μέχρι το 2023 και κατά **40-60%** μέχρι το 2028.
- Η παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο το 2028, να κυμαίνεται από **24 έως 32 TWh**.
- Σε σύγκριση με το 2017, η εγκατεστημένη ισχύς για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές να αυξηθεί κατά **50%** μέχρι το 2023 και κατά **100%** μέχρι το 2028.

Ένα από τα εργαλεία που εφαρμόζει η Γαλλία για την επίτευξη των ενεργειακών στόχων της, είναι η επιβολή *φόρου κατανάλωσης*. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον φόρο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των τελικών καταναλωτών (οικιακός τομέας και επιχειρήσεις), δεν περιλαμβάνεται φόρος για το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς όλα τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας ανήκουν στο “EU ETS” (IEA, 2021a). Επομένως, ο *φόρος εκπομπών CO₂* αφορά τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής και όχι τους οικιακούς καταναλωτές και βάσει δεδομένων του Tax Foundation για το 2022, είναι ίσος με **45 €/tnCO₂**.

Στις 6 Ιουλίου του 2022, η κυβέρνηση ανακοίνωσε την πρόθεσή της για πλήρη κρατικοποίηση της “EDF (Electricite de France)” στο **100%**, από 84% που είναι σήμερα (Zissler, 2022). Τον Δεκέμβριο του 2021 προκλήθηκαν πολλά τεχνικά προβλήματα στα πυρηνικά εργοστάσια, εξαιτίας του βαρύ χειμώνα που αντιμετώπισε η χώρα, πιθανώς λόγω της κλιματικής αλλαγής (Plackett, 2022). Πιο συγκεκριμένα, 56 πυρηνικοί αντιδραστήρες τέθηκαν εκτός λειτουργίας για συντήρηση και έλεγχο, αριθμός ρεκόρ για τη Γαλλία, δεδομένου ότι ο συνολικός «πυρηνικός στόλος» της χώρας είναι 58 πυρηνικοί αντιδραστήρες (Bizet et al., 2022). Ενδεικτική είναι η ραγδαία πτώση της ηλεκτροπαραγωγής από πυρηνική ενέργεια της χώρας από την πρώτη εβδομάδα του Ιανουαρίου 2022, κατά την οποία ήταν **7 TWh**, στην τελευταία εβδομάδα του Μαΐου 2022, κατά την οποία ήταν **4,5 TWh** (European Commission, 2022b). Στις 29 Αυγούστου 2022, το **57%** της ηλεκτροπαραγωγής από πυρηνική ενέργεια ήταν εκτός λειτουργίας σύμφωνα με την “EDF”. Σύμφωνα με το Εθνικό Ινστιτούτο Στατιστικών και Οικονομικών Ερευνών (“INSEE”), αποτέλεσμα της αστάθειας αυτής ήταν η ραγδαία αύξηση στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (**Διάγραμμα 10**), η οποία τον Αύγουστο του 2022

ξεπέρασε τα **1.000 €/MWh** λόγω της αντικατάστασης των πυρηνικών με φυσικό αέριο, του οποίου η τιμή εκτοξεύθηκε μετά τον Μάρτιο του 2022.



Διάγραμμα 10. Χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Γαλλία (€/MWh). Πηγή: Insee, 2022.

Μια ακόμη πολιτική που ακολουθεί η Γαλλία για την υποστήριξη της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στην χώρα, είναι η αποζημίωση των αυτοπαραγωγών μέσω επιδότησης τύπου “*feed-in tariff (FiT)*”. Πιο συγκεκριμένα, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας της Γαλλίας (“CRE”) εξέδωσε τα “FiTs” για το δεύτερο τρίμηνο του 2022, για τα φωτοβολταϊκά στέγης (έως και **100 kW**), με τις τιμές να αυξάνονται για κάθε κατηγορία (Πίνακας 6). Μάλιστα, τα παρακάτω “FiTs” έχουν ισχύ για **20 έτη** (CRE, 2022).

Πίνακας 6. “Feed-in tariff” ανά κατηγορία φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στην Γαλλία.

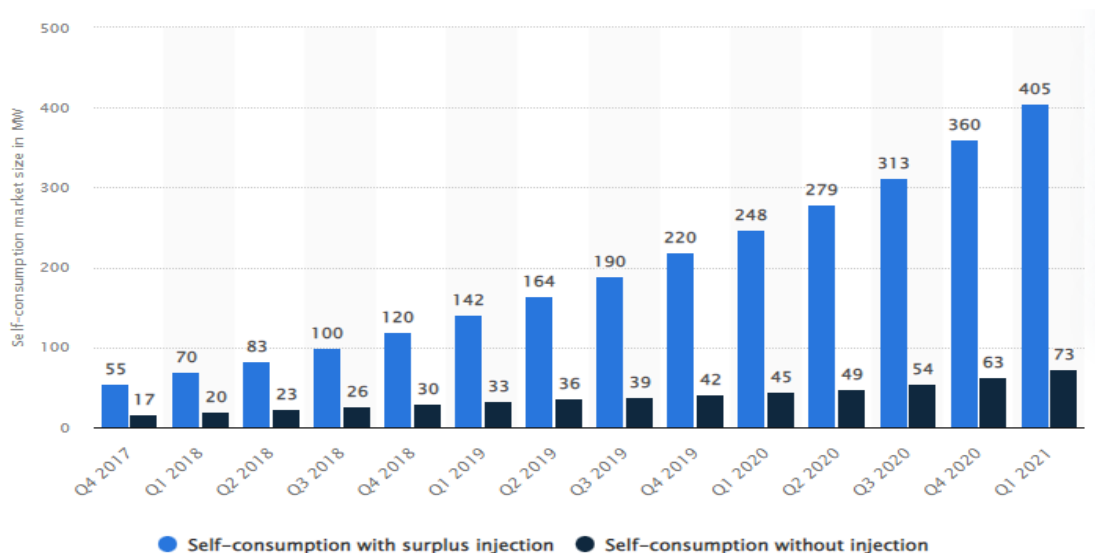
Ισχύς Εγκατάστασης (P σε kW _p)	“Feed-in Tariff” (€/MWh)
$P \leq 3 \text{ kW}_p$	181,4 €/MWh
$3 \text{ kW}_p < P \leq 9 \text{ kW}_p$	154,2 €/MWh
$9 \text{ kW}_p < P \leq 36 \text{ kW}_p$	111,5 €/MWh
$36 \text{ kW}_p < P \leq 100 \text{ kW}_p$	96,9 €/MWh

Πηγή: Commission de Regulation de l’ Energie (CRE), 2022.

Όσον αφορά την ενεργειακή πολιτική που ακολουθεί η Γαλλία σχετικά με την ιδιοκατανάλωση (“self-consumption”), με βάση την “CRE”, η ιδιοκατανάλωση της χώρας διακρίνεται σε «ατομική»⁷ (“individual”) και «συλλογική»⁸ (“collective”) (Oriol, 2018). Η ενέργεια που καταναλώνεται από τους ατομικούς ιδιοκαταναλωτές δεν μεταφέρεται από το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (CRE, 2021). Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας της Γαλλίας ορίζει την απαλλαγή από φόρους και εισφορές όσων είναι ατομικοί ιδιοκαταναλωτές ως προς την δημόσια υπηρεσία ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, επιτρέποντας έτσι την κερδοφορία των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων μικρής κλίμακας (CRE, 2018). Στο **Διάγραμμα 11** αποτυπώνεται η μεγάλη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ιδιοκατανάλωσης από φωτοβολταϊκά της Γαλλίας (διακρίνεται σε ιδιοκατανάλωση με πλεόνασμα που εγχέεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και σε ιδιοκατανάλωση χωρίς πλεόνασμα, κατά την οποία η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιείται εξ’ ολοκλήρου για την ικανοποίηση των αναγκών της εγκατάστασης).

⁷ Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται και καταναλώνεται ταυτόχρονα σε ένα συγκεκριμένο σημείο από ένα νοικοκυριό.

⁸ Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται και καταναλώνεται από διάφορους καταναλωτές και παραγωγούς, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο δίκτυο χαμηλής τάσης.



Διάγραμμα 11. Εγκατεστημένη ισχύς για ιδιοκατανάλωση από Φ/Β στη Γαλλία (σε MW). Πηγή: Statista, 2022.

Ένας σημαντικός στόχος της ενεργειακής πολιτικής της Γαλλίας σχετικά με την ιδιοκατανάλωση από φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, είναι η εκμετάλλευση **65.000-100.000** τοποθεσιών για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στέγης, μέσα στο 2023, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την συνολική εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας για ιδιοκατανάλωση (*Ministry of Ecological and Solidary Transition, 2022*). Χαρακτηριστική είναι η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων (όχι μόνο στον οικιακό τομέα) στη χώρα για το 2021, αφού προστέθηκαν **3,4 GW**, δηλαδή τριπλάσια ποσότητα σε σχέση με το 2020 (*REN21, 2022*).

Μια ακόμη διάσταση, η οποία έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση, είναι ο συνδυασμός ιδιοκατανάλωσης με δυνατότητα για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με μελέτη του Ινστιτούτου Τεχνοοικονομικών Ενεργειακών Συστημάτων της Γαλλίας, η διάχυση των φωτοβολταϊκών στέγης με δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι το 2030, θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από την τιμή που θα έχουν τα διάφορα είδη μπαταριών που χρησιμοποιούνται, καθώς επίσης και από το σημείο στο οποίο θα βρίσκεται τότε η χώρα πάνω στην καμπύλη εκμάθησης της εν λόγω τεχνολογίας. Αυτοί οι παράγοντες διαμορφώνουν το “Levelised Cost of Energy (LCOE)” της τεχνολογίας. Το 2015, το LCOE για αυτή την τεχνολογία στην Γαλλία ήταν ίσο με **0,42 €/kWh**, ενώ η πρόβλεψη για το 2030 είναι **0,24 €/kWh** (*Yu, 2018*).

Όσον αφορά την υποστήριξη της ιδιοκατανάλωσης χρησιμοποιώντας το εργαλείο ενεργειακής πολιτικής της αποζημίωσης των ιδιοκαταναλωτών μέσω ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”), σύμφωνα με το ρυθμιστικό πλαίσιο της CRE το 2018, το “net metering” επιτρέπεται στα έργα ιδιοκατανάλωσης, το οποίο σημαίνει ότι ένα νοικοκυριό που έχει πλεόνασμα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να αποζημιωθεί στη λιανική τιμή της αγοράς. Όμως η συλλογική ιδιοκατανάλωση επιτρέπεται μόνο μεταξύ αυτοπαραγωγών που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους στο δίκτυο, με ανώτατο όριο απόστασης τα **2 χιλιόμετρα**, με εξαίρεση αγροτικές απομονωμένες περιοχές, όπου εκεί το όριο είναι **20 χιλιόμετρα** (*Climate Action Network, 2022; Frieden et al., 2020*).

Σχετικά με την εφαρμογή καθεστώτων επιβολής ενεργειακής απόδοσης και πιο συγκεκριμένα με την εφαρμογή πράσινων πιστοποιητικών στον οικιακό τομέα, μέχρι και σήμερα δεν εφαρμόζεται κάποια σχετική πολιτική στη χώρα. Επομένως, η Γαλλία δεν διαθέτει αγορά πράσινων πιστοποιητικών για τον οικιακό τομέα.

Τέλος, όσον αφορά την προώθηση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, από το 2021 η χώρα προάγει την διάχυση των μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας μέσα από το άρθρο “L. 352-1-1”⁹, με το οποίο δίνει το δικαίωμα στον υπουργό ενέργειας να προσφύγει σε οργάνωση πλειστηριασμού για τη διανομή έργων αποθήκευσης ενέργειας, εάν υπάρχει απόκλιση από τους στόχους του “PPE” (*Ministry of Ecological and Solidary Transition, 2022*). Παράλληλα, μέσα στο διάταγμα “Decree No. 2022-788”¹⁰ που ψηφίστηκε στις 6 Μαΐου 2022, η κυβέρνηση ορίζει τους όρους και τις προϋποθέσεις για την υλοποίηση της διαδικασίας του προαναφερθέντος πλειστηριασμού (*Champy & Castro, 2022*). Ωστόσο, τα έργα δεν αφορούν τον οικιακό τομέα, στον οποίο η διάχυση τεχνολογιών αυτοπαραγωγής με αποθήκευση ενέργειας δεν υποστηρίζεται από νομοθετικά διατάγματα. Επίσης, η χαμηλή μέση τιμή λιανικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2021 (**0,196 €/kWh**), αποτέλεσε σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα για τη διάχυση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στον οικιακό τομέα (*SolarPower Europe, 2021*).

4.2.2. Δανία

Σύμφωνα με τον νόμο αρ. 965 26/06/2020¹¹, ο οποίος τροποποιήθηκε με τις αλλαγές που προέκυψαν από τον νόμο αρ. 2387 14/12/2021, η Δανία θέτει τους παρακάτω κλιματικούς στόχους:

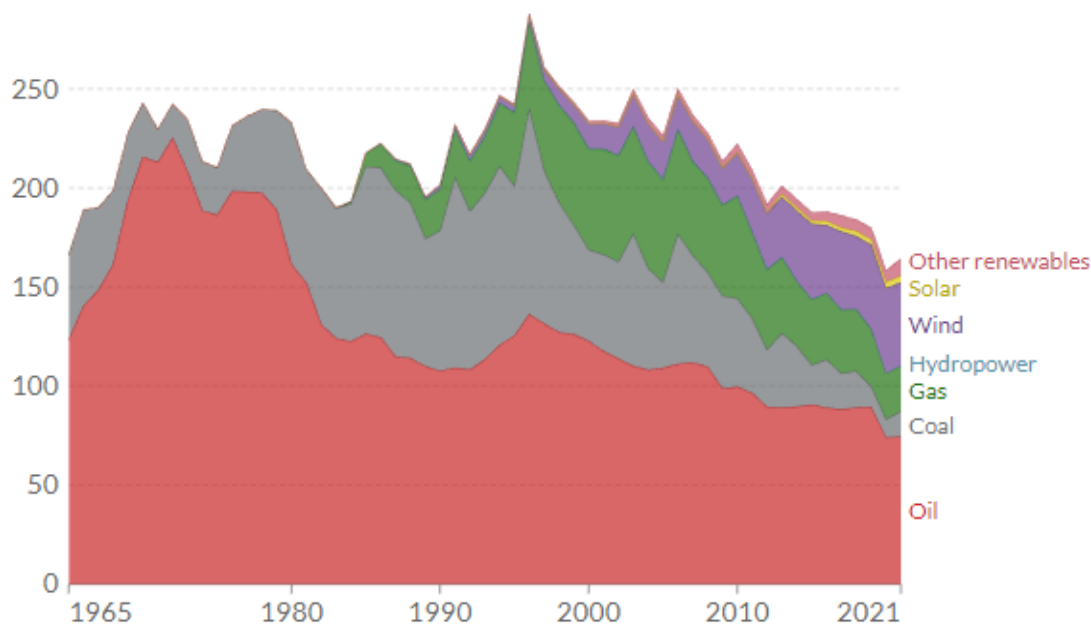
- Μέχρι το 2030 να υπάρχει μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά **70%**, σε σύγκριση με το 1990.
- Έως το 2050, η χώρα να είναι **κλιματικά ουδέτερη**.
- Μέχρι το 2030 να έχει επιτευχθεί πλήρης απανθρακοποίηση της χώρας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κυβέρνηση της Δανίας ανέβαλε την παύση της λειτουργίας τριών (3) λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το 2024, λόγω του κινδύνου διακοπής ηλεκτροδότησης εξαιτίας του πολέμου στην Ουκρανία. Σύμφωνα με το υπουργείο ενέργειας της Δανίας, αυτή η απόφαση δεν θα επηρεάσει τους κλιματικούς στόχους της χώρας για το 2025-2030 (*Danish Ministry of Climate Energy and Utilities, 2022*).
- Έως το 2030, το **100%** της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (επισημαίνεται ότι η Δανία είναι η πρώτη χώρα στην παγκόσμια κατάταξη σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα σε ποσοστό επί της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας).

Ξεκινώντας την ανάλυση των σχημάτων ενεργειακής πολιτικής της χώρας, αξίζει να αναφερθεί η υπάρχουσα κατάσταση σχετικά με τις πηγές προέλευσης της ενεργειακής της κατανάλωσης. Για το 2021, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση της χώρας ήταν **164 TWh** (**Διάγραμμα 12**), εκ των οποίων μόλις **3 TWh** προέρχονταν από ηλιακή ενέργεια (*BP, 2022*).

⁹ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043963945.

¹⁰ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045766492>.

¹¹ <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2020/965>.



Διάγραμμα 12. Ενεργειακή κατανάλωση Δανίας ανά πηγή ενέργειας. Πηγή: BP, 2022.

Σχεδόν το **50%** της ηλεκτροπαραγωγής της χώρας, προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με βασική πηγή ενέργειας την αιολική (Rovekamp et al., 2021).

Σχετικά με την κλιματική φορολογία που επιβάλλεται στην χώρα για το 2022, ο φόρος εκπομπών CO₂ αυτή τη στιγμή βρίσκεται στα **24 €/tnCO₂** και αφορά τον τομέα των μεταφορών, καθώς επίσης και τη θέρμανση των κτηρίων και του οικιακού τομέα, με εξαίρεση όσα κτήρια ανήκουν σε δίκτυο τηλεθέρμανσης (Ministry of Finance, 2022). Ωστόσο, αυτό αποτελεί μεγάλο ποσοστό, αφού το **64%** της θέρμανσης της χώρας πραγματοποιείται με τηλεθέρμανση (Olesen, 2020). Μάλιστα, σύμφωνα με τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD), το 2020 τα έσοδα από τους περιβαλλοντικούς φόρους που επιβάλλονταν στην Δανία, ήταν ίσα με το **3,17%** του ΑΕΠ της χώρας.

Όσον αφορά τις επιδοτήσεις πάνω στα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας της χώρας για τον οικιακό τομέα, η κυβέρνηση της Δανίας επιδιώκει να προωθήσει την εν λόγω τεχνολογία αποζημιώνοντας τους αυτοπαραγωγούς μέσω επιδότησης τύπου “*feed-in premium*”, με τη μορφή διμερούς σύμβασης μεταξύ καταναλωτή και κυβέρνησης. Αναλυτικότερα, με βάση το δανικό ενεργειακό μοντέλο (Danish Energy Agency, 2020), εξάγεται μια «τιμή αναφοράς»¹² (“reference price”) της ηλεκτρικής ενέργειας για το τρέχον έτος. Ο καταναλωτής στην αρχή του έτους δίνει προσφορά για την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (“bid price”). Εάν η προσφερόμενη τιμή του καταναλωτή για το τρέχον έτος υπερβαίνει την τιμή αναφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας του τρέχοντος έτους, η κυβέρνηση αποζημιώνει τον καταναλωτή πληρώνοντάς του την διαφορά μεταξύ προσφερόμενης τιμής και της τιμής αναφοράς επί την ενέργεια που κατανάλωσε (“price premium”). Ενώ εάν η προσφερόμενη τιμή του καταναλωτή για το τρέχον έτος είναι χαμηλότερη από την τιμή αναφοράς, ο καταναλωτής καταβάλλει ποσό ίσο με τη διαφορά της τιμής αναφοράς και της προσφερόμενης τιμής επί την ενέργεια που κατανάλωσε. Όσον αφορά τους όρους της διμερούς σύμβασης, ισχύουν τα παρακάτω (Danish Energy Agency, 2020; Wikberg, 2019):

- Δεν υφίσταται ανώτατο όριο (cap) στις πληρωμές από τους καταναλωτές προς το κράτος.

¹² Η «τιμή αναφοράς» του τρέχοντος έτους είναι ίση με την μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας του προηγούμενου έτους.

- Το συνολικό ανώτατο όριο πληρωμών από το κράτος προς τους καταναλωτές είναι **80.665.000 €**.
- Οι όροι ισχύουν για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με εγκατεστημένη ισχύ μέχρι **500 kW_p** και η μέγιστη επιδότηση που μπορεί να αποκτήσει ένα νοικοκυριό από το μοντέλο είναι **0,17 €/kWh**. Ισχύει μόνο για καταναλωτές που είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο και για εγκαταστάσεις ιδιοκατανάλωσης. Ο βασικός λόγος για τον οποίο οι όροι ισχύουν μέχρι και εγκαταστάσεις 500 kW_p (ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα φτάνουν μέχρι τα 10 kW_p), είναι η παροχή ευνοϊκών ρυθμίσεων και για μικρές επιχειρήσεις και ενεργειακές κοινότητες.
- Η διάρκεια ισχύος της διμερούς σύμβασης είναι **10 έτη** μετά την σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Σχετικά με την προώθηση της ιδιοκατανάλωσης (“self-consumption”) και του ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”) στη χώρα, το βασικό εργαλείο ενεργειακής πολιτικής που εφαρμόζεται στη χώρα, είναι η αποζημίωση των αυτοπαραγωγών μέσω επιδότησης τύπου “feed-in premium”, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Για εγκαταστάσεις που δεν προορίζονται για ιδιοκατανάλωση, ισχύει μέγιστο price premium ίσο με **0,12 €/kWh** (Wikberg, 2019). Σύμφωνα με το ρυθμιστικό πλαίσιο “BEK 999/2016”¹³, επιτρέπεται ο ενεργειακός συμψηφισμός για όλες τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής, εκτός των γεωθερμικών. Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μέχρι **50 kW** που είναι διασυνδεδεμένες με το δίκτυο, δεν έχουν υποχρέωση να καταβάλλουν τέλος για τις δημόσιες υπηρεσίες (“Public Service Obligation Tariff - PSO tariff”). Από το 2012, ο ενεργειακός συμψηφισμός άλλαξε από ετήσιος σε “real-time”, προωθώντας σε μεγάλο βαθμό την διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (Hansen et al., 2022). Αξίζει να σημειωθεί ότι η υποστήριξη του ενεργειακού συμψηφισμού στη χώρα με εργαλεία ενεργειακής πολιτικής, μείωσε από το 2010 δραστικά την φορολογία των πολιτών (Ziras et al., 2021).

Όσον αφορά τα πράσινα πιστοποιητικά, η χώρα διαθέτει αγορά πράσινων πιστοποιητικών, τα οποία επίσης υποστηρίζουν την διάχυση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και πιο συγκεκριμένα, τη διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (για τον οικιακό τομέα). Η αγορά πράσινων πιστοποιητικών της Δανίας εναρμονίζεται με την οδηγία “2009/28/EC”¹⁴ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου (Zhang et al., 2022), μέσα στην οποία αποσαφηνίζεται η έννοια των πιστοποιητικών “Guarantees of Origin (GOs)”, τα οποία πιστοποιούν ότι η παραγόμενη ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τέλος, στα πλαίσια της υποστήριξης της διάχυσης τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, η Δανία θεσπίζει πρόγραμμα χρηματοδότησης ύψους **17.200.000€** για την πραγματοποίηση έργων “Power-to-X”. Στόχος των έργων είναι η μαζική παραγωγή και αποθήκευση πράσινου υδρογόνου (Danish Ministry of Climate Energy and Utilities, 2019), προάγοντας με αυτόν τον τρόπο την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, για τον οικιακό τομέα, η χώρα δεν έχει θεσπίσει κάποιο νομοθετικό ή ρυθμιστικό πλαίσιο για την υποστήριξη της αποθήκευσης ενέργειας, καθώς τα έργα που χρηματοδοτεί στοχεύουν κυρίως στην εκμετάλλευση του πλεονάσματος ενέργειας που προκύπτει από τα αιολικά (η Δανία είναι πρώτη παγκοσμίως στην κατά κεφαλήν εγκατεστημένη ισχύ αιολικών με **1 kW/cap**).

4.2.3. Ελλάδα

Με βάση το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) της χώρας, το οποίο αναθεωρήθηκε τον Ιανουάριο του 2023, οι βασικοί ενεργειακοί/κλιματικοί στόχοι που

¹³ <https://www.retsinformation.dk/eli/ta/2016/999>.

¹⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0028>.

έχουν τεθεί με χρονικό ορίζοντα το 2030, είναι οι παρακάτω (*Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2023*):

- Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου να μειωθούν κατά **55%** σε σχέση με το 1990.
- Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως ποσοστό της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας (“final gross energy consumption”) να ισούται κατ’ ελάχιστον με **45%**.
- Το **80%** της ηλεκτροπαραγωγής της χώρας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Το **47%** της θερμικής ισχύος για θέρμανση και ψύξη να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Η τελική κατανάλωση ενέργειας (“final energy consumption”) να ισούται με **178 TWh (15,30 Mtoe)**.
- Αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτηριακού δυναμικού της χώρας κατά **6%** σε σύγκριση με το 2019.

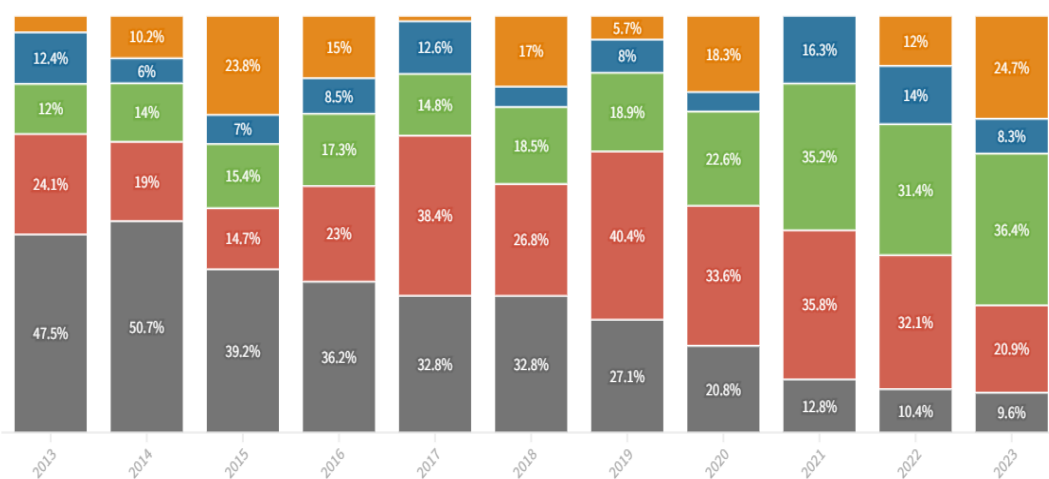
Πριν ξεκινήσει η ανάλυση των μηχανισμών υποστήριξης διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στη χώρα, είναι χρήσιμο να επισημανθεί ένα σημείο αναφοράς, σχετικά με το στάδιο στο οποίο βρίσκεται σήμερα (2023) η χώρα. Στο **Διάγραμμα 13** αποτυπώνεται το μείγμα της ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας, για τον πρώτο μήνα κάθε έτους από το 2013 έως το 2023. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, από το 2019 και μετά, το μείγμα ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή έχει σημειώσει τεράστια αύξηση, ενώ αντίστοιχα η συμμετοχή του φυσικού (ορυκτού) αερίου έχει μειωθεί (*Papadelis et al., 2016*). Επισημαίνεται επίσης, ότι το ποσοστό των εισαγωγών σημείωσε το 2023 τη μεγαλύτερη τιμή της δεκαετίας (**24,7%**), ενώ η συμμετοχή του λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή τη μικρότερη τιμή της δεκαετίας (**9,6%**).

Electricity mix shares in Greece per year

First month of each year



■ Lignite ■ Fossil Gas ■ Renewables ■ Large Hydro ■ Net Imports



Διάγραμμα 13. Μείγμα ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας την περίοδο 2013-2023. Πηγή: The Green Tank, 2023.

Όσον αφορά την υπάρχουσα φορολογία που εφαρμόζεται στη χώρα, η Ελλάδα δεν έχει επιβάλλει φόρο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ενώ ενεργοβόρες βιομηχανίες, εγκαταστάσεις και εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υποχρεούνται να αποκτούν άδειες εκπομπών από το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών της ΕΕ (“EU ETS”) με βάση τις εκπομπές τους (*IEA, 2023*). Το κόστος της απόκτησης των δικαιωμάτων μετακυλύεται

στους τελικούς καταναλωτές. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι ο ΦΠΑ για τα παράγωγα πετρελαίου είναι **24%**, ενώ για τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο εφαρμόζεται μειωμένος ΦΠΑ ίσος με **6%** (IEA, 2023).

Για την υποστήριξη της διάχυσης των φωτοβολταϊκών (τόσο μικρής, όσο και μεγάλης κλίμακας), η Ελλάδα εφαρμόζει μια σειρά από μηχανισμούς υποστήριξης (όπως θα αναφερθεί και στις επόμενες παραγράφους). Ένας βασικός μηχανισμός υποστήριξης είναι η αποζημίωση των αυτοπαραγωγών φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας μέσω επιδότησης τύπου “*feed-in tariff*”. Το σχήμα έχει στόχο να υποστηρίξει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών έως και 10 kW_p. Το ύψος του “*feed-in tariff*” για εγκαταστάσεις έως και 10 kW_p από τον Φεβρουάριο του 2017 ήταν ίσο με **105 €/MWh** και η διάρκεια της διμερούς σύμβασης είχε ισχύ για **25 έτη** (Maroulis, 2019). Το σχήμα εφαρμόστηκε για νοικοκυριά, μικρές επιχειρήσεις και δημόσιες οντότητες. Επισημαίνεται ότι το “*feed-in tariff*” στην Ελλάδα αφορά κυρίως καινοτόμες και μικρής κλίμακας επενδύσεις, καθώς σε μεγάλη κλίμακα η χώρα επιδιώκει να μεταβεί σε ένα σύστημα όπου η υποστήριξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα επιτυγχάνεται μέσα από ανταγωνιστικούς διαγωνισμούς (tender/auction) για την επιδότηση αυτών των επενδύσεων, μέσω διμερών συμβάσεων. Αξιοσημείωτο είναι ότι το 2006, το ύψος του “*feed-in tariff*” για την αποζημίωση των αυτοπαραγωγών, ήταν ίσο με **450 €/MWh** (Danchev et al., 2010), ενώ το 2009 το ύψος της ταρίφας έφτασε τα **550 €/MWh**, στα πλαίσια του ειδικού κυβερνητικού προγράμματος για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε κτήρια και στέγες (Süsser et al., 2022b). Από το 2022 και έπειτα εφαρμόζεται επιδότηση τύπου “*feed-in tariff*” για φωτοβολταϊκά έως και 6 kW_p ίσο με **87 €/MWh** και ισχύ για **20 έτη** (Climate Action Network, 2022). Επιπροσθέτως, από τον Ιούνιο του 2022, θεσπίστηκε νομοθεσία για τη δημιουργία ενός λογαριασμού υποστήριξης έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που τέθηκαν σε λειτουργία μετά τον Ιανουάριο του 2021, και ενός λογαριασμού υποστήριξης έργων αποθήκευσης ενέργειας (IEA, 2023). Παράλληλα, η αποζημίωση για φωτοβολταϊκά (έως και 500 kW_p) γίνεται και με χρήση εργαλείου επιδότησης τύπου “*feed-in premium*”, όπου το ύψος της αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών, εξάγεται ως εξής¹⁵ (Maroulis, 2019):

Premium Price = 120% * Μέση Οριακή Τιμή Συστήματος Προηγούμενου Έτους

Σχετικά με την υποστήριξη της ιδιοκατανάλωσης (“SC”) και της αυτοπαραγωγής, εφαρμόζεται μείωση του φορολογικού συντελεστή μόνο για επιχειρήσεις, όταν το κόστος κεφαλαίου της επένδυσης ξεπερνάει τα 100.000 € για μικρές επιχειρήσεις και τα 250.000 € για μεσαίες επιχειρήσεις (Maroulis, 2019).

Το 2014, για πρώτη φορά εφαρμόστηκε στη χώρα ο μηχανισμός του ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”) για αυτόνομους παραγωγούς. Επιπρόσθετα, ο «εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός» (“virtual net metering”) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 2016 μέσα από την τροποποίηση του Αρθ.2/Ν.3428/2006. Οι επιλέξιμες επενδύσεις για τον εν λόγω μηχανισμό αφορούν και διασυνδεδεμένες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη από 20 kW_p (Maroulis, 2019). Ο συμψηφισμός εφαρμόζεται σε ετήσια βάση (Stavrakas et al., 2020) και κάθε φορά που ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας διαμορφώνει έναν λογαριασμό, οφείλει να αναγράφει ρητά το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας με το οποίο τροφοδοτήθηκε το δίκτυο από τον ιδιοκαταναλωτή/αυτοπαραγωγό, καθώς επίσης και το ποσό που καταναλώθηκε, μέσω μετρήσεων. Εάν το ποσό τροφοδότησης του δικτύου ξεπερνάει την κατανάλωση, το πλεόνασμα πιστώνεται στον αυτοπαραγωγό στον επόμενο λογαριασμό, ενώ εάν η κατανάλωση ξεπερνάει το ποσό τροφοδότησης, ο αυτοπαραγωγός υποχρεούται να πληρώσει τη διαφορά (Maroulis, 2019).

¹⁵ Αρθ.4/Παρ.1β/Ν.4414/2016.

Όσον αφορά την ύπαρξη αγοράς πράσινων πιστοποιητικών για τα νοικοκυριά και τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις, έως και σήμερα (2023), δεν υφίσταται αγορά, συνεπώς ο οικιακός τομέας της χώρας δεν συμμετέχει σε αγορά πράσινων πιστοποιητικών.

Τέλος, σύμφωνα με το “Balkan Green Energy News”¹⁶, η υποστήριξη των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στην Ελλάδα, αναμένεται να εφαρμοστεί μέσα στο 2023, μέσα από επιδοτήσεις για εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία, έως και **100%**, σε συνδυασμό με επιδότηση για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, έως και **60%**. Το σχήμα αναμένεται να υποστηρίξει **100.000 νοικοκυριά** και να κοστίσει **700.000.000 €**. Σημειώνεται ότι στα σχέδια της κυβέρνησης είναι τα φωτοβολταϊκά στέγης να επιδοτούνται, μόνο σε περίπτωση που συνδυάζονται με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

4.2.4. Ισπανία

Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος (“National Energy and Climate Plan”) της Ισπανίας, οι βασικοί στόχοι που έχει θέσει η χώρα προς επίτευξη μέχρι το 2030, είναι οι εξής (MITECO, 2020):

- Να έχουν μειωθεί οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά **23%** σε σύγκριση με το 1990.
- Το **42%** της ακαθάριστης τελικής ενεργειακής κατανάλωσης (“final gross energy consumption”) να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Το **74%** του ενεργειακού μείγματος (“energy mix”) της χώρας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Η ενεργειακή αποδοτικότητα των κτηρίων της χώρας να έχει αυξηθεί κατά **39,5%**.
- Να υπάρχει **15%** διασύνδεση με άλλα κράτη μέλη της ΕΕ.

Σχετικά με την ισχύουσα φορολογία που επιβάλλεται στη χώρα, αρνητικό αντίκτυπο στη διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας έχει ο χαμηλός φόρος εκπομπών CO₂ της χώρας. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα, ο φόρος εκπομπών CO₂ της Ισπανίας είναι ίσος με **15 €/tnCO₂**¹⁷. Αυτός ο φόρος αποτιμάται περίπου στο **7%** του συνολικού κόστους ενός οικιακού λογαριασμού ηλεκτρικής ενέργειας (REN21, 2022). Επίσης, οι οικιακοί καταναλωτές επιβαρύνονται με ΦΠΑ **21%** στους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, τον Ιούνιο του 2022, η κυβέρνηση της Ισπανίας ανακοίνωσε τη μείωση του ΦΠΑ από **21%** σε **10%**, στα πλαίσια της υποστήριξης των πολιτών της χώρας εν καιρώ παγκόσμιας ενεργειακής κρίσης (REN21, 2022).

Όσον αφορά την υποστήριξη της διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας μέσω επιδοτήσεων, η Ισπανία έχει εντάξει στο ρυθμιστικό της πλαίσιο επιδοτήσεις τύπου “feed-in premium”, παρόμοιων χαρακτηριστικών με των επιδοτήσεων τύπου “feed-in premium” της Δανίας (Υποενότητα 4.2.2). Ωστόσο, για την υποστήριξη του οικονομικού συστήματος της χώρας εν καιρώ ενεργειακής κρίσης, η κυβέρνηση της χώρας ανακοίνωσε τον όρο ότι η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από ιδιοκαταναλωτές με εγκατεστημένη ισχύ έως και **100 kW**, οι οποίοι τροφοδοτούν το δίκτυο με ηλεκτρική ενέργεια, δεν θα υπερβαίνει τη χονδρεμπορική τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Διάγραμμα 14). Η μόνη διαφορά με την επιδότηση τύπου “feed-in premium” της Δανίας, είναι ότι την τιμή αναφοράς¹⁸ (“reference price” - Υποενότητα 4.2.2) στην Ισπανία, με βάση την οποία αποζημιώνεται ο αυτοπαραγωγός,

¹⁶<https://balkangreenenergynews.com/greece-to-subsidize-rooftop-photovoltaics-only-if-batteries-are-included/#:~:text=The%20mechanism%20is%20for%20net,when%20his%20demand%20exceeds%20production>.

¹⁷ https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data.

¹⁸ Η τιμή αναφοράς με βάση την οποία αποζημιώνεται ο prosumer Φ/Β μικρής κλίμακας, είναι διαθέσιμη στην δ/νση: <https://www.esios.ree.es/es/pvpc>.

την ορίζει ο διαχειριστής του ηλεκτρικού συστήματος της χώρας (“Red Eléctrica”). Αυτή η τιμή συνήθως είναι ελαφρώς χαμηλότερη από τη χονδρεμπορική τιμή της αγοράς, η οποία εξάγεται από την Ιβηρική Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας (“OMIE”)¹⁹ (Ordonez et al., 2022; Prol & Steininger, 2020).



Διάγραμμα 14. Χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ισπανία (€/MWh). Πηγή: Statista, 2022.

Στα πλαίσια της υποστήριξης της ιδιοκατανάλωσης μέσω ρυθμιστικών πλαισίων, η Ισπανία θέσπισε τον νόμο “RD-L15/2018”²⁰ τον Οκτώβριο του 2018, ο οποίος επιτρέπει στους ιδιοκαταναλωτές να πωλούν την αυτοπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο (Fernandez-Gonzalez et al., 2021). Επίσης, καταργείται ο λεγόμενος «Ηλιακός Φόρος» που είχε θεσπιστεί από την προηγούμενη κυβέρνηση το 2015, ο οποίος είχε σαν αντίκτυπο το «πάγωμα» της αγοράς φωτοβολταϊκών. Ο νόμος “RD-L15/2018” αντιμετωπίζει σε μεγάλο βαθμό και τα γραφειοκρατικά εμπόδια που προκάλυπταν σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρότερα από **100 kW** (Toporek & Campos, 2019). Αξίζει να σημειωθεί ότι η συλλογική ιδιοκατανάλωση (“collective self-consumption”) που υφίσταται αυτή τη στιγμή στη χώρα, επιτρέπει τον διαμοιρασμό της ηλεκτρικής ενέργειας από αυτοπαραγωγούς σε άλλους καταναλωτές, σε απόσταση μέχρι **500 m** και μόνο εάν ανήκουν στην ίδια κτηματολογική περιοχή και στο ίδιο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (Climate Action Network, 2022; Frieden et al., 2021).

Στην Ισπανία η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι απελευθερωμένη (και όχι κρατική). Συγκεκριμένα, δραστηριοποιούνται πάνω από **5.000** εταιρείες στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο μόλις **3 εταιρείες παράγουν το 66% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας** της χώρας (Ordonez et al., 2022). Στη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας δραστηριοποιούνται πάνω από **300** εταιρείες, με μόλις **5 να είναι οι κυρίαρχοι παίκτες της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας** της χώρας.

¹⁹ Η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας της Ισπανίας (και της Πορτογαλίας) από την OMIE είναι διαθέσιμη στην διεύθυνση: <https://www.omie.es/es>.

²⁰ <https://www.boe.es/boe/dias/2018/10/06/pdfs/BOE-A-2018-13593.pdf>.

Το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας δεν αποζημιώνεται με τη μέθοδο του ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”). Αντιθέτως, ο μηχανισμός χρέωσης που χρησιμοποιείται είναι ο συμψηφισμός λογαριασμού (“net billing”). Πιο αναλυτικά, στην Ισπανία, ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας μετράει κάθε **15 λεπτά** με πόσες kWh έχει επιβαρύνει ο καταναλωτής το δίκτυο και με πόσες kWh έχει τροφοδοτήσει το δίκτυο (Ordonez et al., 2022). Η τιμή αγοράς από την (χονδρεμπορική) τιμή πώλησης διαφέρουν, καθώς ο πάροχος επιδιώκει να έχει κέρδος επί των εσόδων που έχει ο αυτοπαραγωγός από την τροφοδοσία που παρέχει στο δίκτυο. Το τελικό ποσό που καλείται να καταβάλλει ο αυτοπαραγωγός είναι ίσο με (Ordonez et al., 2022):

$$\text{Ποσό (Net – Billing)} = (\text{kWh επιβάρυνσης δικτύου} * \text{Λιανική Τιμή Η.Ε.}) - (\text{kWh τροφοδοσίας δικτύου} * \text{Χονδρεμπορική Τιμή Η.Ε.})$$

Όσον αφορά την ύπαρξη αγοράς πράσινων πιστοποιητικών για τον οικιακό τομέα, αυτή τη στιγμή δεν υφίσταται χρήση του εν λόγω εργαλείου ενεργειακής πολιτικής. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Ciarreta et al. (2017), αν αντί της χρήσης του εργαλείου επιδότησης των αυτοπαραγωγών τύπου “feed-in premium”, η Ισπανία υποστήριζε τη διάχυση τεχνολογιών φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας μέσω της δημιουργίας αγοράς πράσινων πιστοποιητικών μετά το 2009, θα είχε επιτύχει να έχει χαμηλότερο κόστος σήμερα η ηλεκτρική ενέργεια στην χώρα (υποθέτοντας ότι θα ίσχυαν τα ίδια ρυθμιστικά πλαίσια). Ο λόγος είναι ότι ένα ρυθμιστικό σύστημα βασισμένο στα πράσινα πιστοποιητικά «αντιδράει» στις μεταβολές της αγοράς, εν αντιθέσει με ένα σύστημα που είναι βασισμένο σε επιδοτήσεις τύπου “feed-in tariff” και “feed-in premium” (Ciarreta et al., 2017).

Τέλος, όσον αφορά την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα, η χώρα έχει ορίσει τον χάρτη αποθήκευσης ενέργειας στα πλαίσια του οποίου υπάρχουν μεγάλα επενδυτικά κίνητρα για ιδιοκατανάλωση από φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας σε συνδυασμό με αποθήκευση μέχρι το 2023. Μάλιστα, το μεγάλο ύψος της λιανικής τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τα επενδυτικά κίνητρα, αναμένεται να φέρουν ταχεία και μεγάλη ανάπτυξη στην αγορά συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία της χώρας (SolarPower Europe, 2021). Η ισπανική κυβέρνηση επιθυμεί να εντάξει στο ενεργειακό της προφίλ την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, θέτοντας ως στόχο τα **20 GW** αποθηκευτικής χωρητικότητας (“storage capacity”) μέχρι το 2030 και τα **30 GW** μέχρι το 2050 (MITECO, 2021). Σύμφωνα με τους Gomez-Exposito et al. (2020), η αστική επιφάνεια της Ισπανίας μπορεί να δεχτεί αριθμό φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (οικιακός τομέας), ικανό να τροφοδοτήσει το **90%** της εγχώριας ενεργειακής ζήτησης, σε συνδυασμό με εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας.

4.2.5. Πορτογαλία

Με βάση το Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος (“National Energy and Climate Plan”) της Πορτογαλίας, το οποίο εξάγεται κατόπιν σχετικής οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ, η Πορτογαλία θέτει τους παρακάτω ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους μέχρι το 2030 (European Commission, 2020):

- Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στη χώρα να έχουν μειωθεί από **45% μέχρι 55%**, σε σύγκριση με το 2005. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η Πορτογαλία έχει συντάξει το “ENAAC 2020 (National Strategy for Adaptation to Climate Change)”.
- Η συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ακαθάριστη τελική ενεργειακή κατανάλωση (“final gross energy consumption”) να αγγίζει το **47%**. Όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή, το **80%** της ηλεκτρικής ενέργειας να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

- Η εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά στον τομέα ηλεκτρικής ενέργειας²¹, να κυμαίνεται από **8,8 μέχρι 9,2 GW**.
- Ο Δείκτης Ενεργειακής Εξάρτησης της χώρας να μειωθεί στο **65%**.
- Επιπροσθέτως, η χώρα έχει θέσει ως στόχο της να γίνει **κλιματικά ουδέτερη** έως το 2050 (όπως και η Δανία - **Υποενότητα 4.2.2**).

Σχετικά με τη χρήση φορολογίας, η Πορτογαλία έχει ενσωματώσει από το 2015 *φόρο εκπομπών CO₂* στα ενεργειακά προϊόντα. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα, ο φόρος αυτός σήμερα ισούται με **23,92 €/tnCO₂**. Μέχρι και το τέταρτο τρίμηνο του 2022, η αύξηση της εν λόγω φορολογίας είναι υπό σκέψη από την κυβέρνηση της χώρας. Με βάση την “Eurostat”, το συγκεκριμένο φορολογικό πλαίσιο συμβάλλει στην αύξηση της τιμής των λογαριασμών ηλεκτρικής ενέργειας των πολιτών, οι οποίοι επιβαρύνονται με επιπλέον χρέωση (πέραν της τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας), περίπου ίση με **0,095 €/kWh**. Αξιοσημείωτο είναι ότι η προαναφερθείσα χρέωση αποτελεί περίπου το **67%** του συνολικού ποσού χρέωσης του οικιακού καταναλωτή (IEA, 2021b).

Όσον αφορά προγράμματα επιδοτήσεων για την υποστήριξη τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μέχρι το 2019, η Πορτογαλία επιδοτούσε τους αυτοπαραγωγούς φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας με τη χρήση εργαλείου επιδότησης τύπου “*feed-in tariff*”. Η μέση τιμή του “*feed-in tariff*” για την εγκατάσταση νέων φωτοβολταϊκών συστημάτων μέχρι και **500 kW** ήταν **95 €/MWh** (IEA, 2021b), η οποία τιμή ήταν αρκετά υψηλότερη από τη χονδρεμπορική τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας (**Διάγραμμα 15**), για εκείνη τη χρονική περίοδο. Οι σταθερές τιμές (“*fixed prices*”) αποζημίωσης που συμφωνήθηκαν για τους οικιακούς καταναλωτές οι οποίοι τροφοδοτούν το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ισχύ για **20 έτη** ή έως ότου παραχθούν **34 GWh** για κάθε MW εγκατεστημένης ισχύος (“*Decree-Law 132-A/2010*”²²). Ιστορικά, αξίζει να σημειωθεί ότι η αποζημίωση μέσω επιδότησης τύπου “*feed-in tariff*” στην Πορτογαλία ξεκίνησε το 2009 με τιμή ίση με **650 €/MWh** για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας έως και **3,68 kW**, ενώ το μέσο κόστος για τον τελικό καταναλωτή στη χώρα ήταν μόλις **110 €/MWh** (Pestana et al., 2018). Σήμερα, η αποζημίωση μέσω επιδοτήσεων σταθερής τιμής τείνει να αντικατασταθεί σταδιακά από ένα υβριδικό σχήμα ενεργειακής πολιτικής για την υποστήριξη της ιδιοκατανάλωσης.

²¹ Χωρίς να συνυπολογίζεται η εγκατεστημένη ισχύς της συμπαραγωγής (cogeneration) ή της τριπαραγωγής (trigeneration).

²² <https://dre.tretas.org/dre/281179/decreto-lei-132-A-2010-de-21-de-dezembro>.



Διάγραμμα 15. Χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Πορτογαλία (€/MWh). Πηγή: Statista, 2022.

Όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η Πορτογαλία επιδιώκει να προωθήσει τη διάχυση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας μέσω ρυθμιστικών πλαισίων (“Decree-Law No. 15/2022”) που υποστηρίζουν την ιδιοκατανάλωση (“self-consumption”)²³, παράλληλα με τη διάχυση τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης σε μεγαλύτερη κλίμακα από την ήδη υπάρχουσα (Pereira & Pereira, 2022). Συγκεκριμένα, η χώρα έχει θέσει ως στόχο για το 2030, να φτάσει τα **2 GW** εγκατεστημένης ισχύος **αποκεντρωμένων** φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (IEA, 2021b). Το τελικό συνολικό ποσό με το οποίο αποζημιώνεται αυτή τη στιγμή ο αυτοπαραγωγός στην Πορτογαλία για το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει στο δίκτυο ανά μήνα είναι (Camilo et al., 2017):

$$\text{ΠΠμ} = \text{Εμ} * \text{ΟΜΙΕμ} * 90\%$$

,όπου: ΠΠμ: το ποσό που πιστώνεται ο αυτοπαραγωγός για τον μήνα μ, Εμ: η ενέργεια με την οποία τροφοδότησε το δίκτυο ο αυτοπαραγωγός τον μήνα μ, ΟΜΙΕμ: η μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στο κλείσιμο του μήνα μ (βάσει του “ΟΜΙΕ” - **Υποενότητα 4.2.4**).

Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τους Foles et al. (2020), από τεχνοοικονομικής σκοπιάς, μία από τις περισσότερο κερδοφόρες επιλογές για τα πορτογαλικά νοικοκυριά, είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας, ισχύος **3,45 kW** σε συνδυασμό με μπαταρία χωρητικότητας **14,35 Ah** (για δίκτυο χαμηλής τάσης ίσο με **230 V**). Ωστόσο, εξαιτίας του υψηλού κόστους των μπαταριών στην χώρα την δεδομένη χρονική στιγμή (2022), αναμένεται η εν λόγω τεχνολογία να είναι ελκυστικότερη στο μέλλον.

Όσον αφορά το εργαλείο του ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”), αντί για την χρήση αυτού, η χώρα κάνει χρήση του συμψηφισμού λογαριασμού (“net billing”). Επομένως, η τιμή με την οποία αποζημιώνονται οι ιδιοκαταναλωτές που τροφοδοτούν το δίκτυο, βασίζεται στη χονδρεμπορική τιμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (βλ. “ΟΜΙΕ”). Μάλιστα, όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω, βάσει νομοθεσίας και ρυθμιστικών πλαισίων, οι ιδιοκαταναλωτές/αυτοπαραγωγοί αποζημιώνονται στο **90%** της χονδρεμπορικής τιμής που έχει η ηλεκτρική ενέργεια στην αγορά. Το υπόλοιπο **10%** καλύπτει τα λειτουργικά κόστη του δικτύου (IRENA, 2019). Ωστόσο, οι Koumparou et al. (2017), προτείνουν την υιοθέτηση πλήρους “net metering” με επιβάρυνση για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου.

²³ Τόσο την ατομική (“individual self-consumption”), όσο και τη συλλογική (“collective self-consumption”).

Σχετικά με την ύπαρξη αγοράς πράσινων πιστοποιητικών, η Πορτογαλία διαθέτει αγορά πράσινων πιστοποιητικών, η οποία δημιουργείται επίσημα το 2010 στα πλαίσια του νόμου “Decree-Law No. 141/2010”. Τα πιστοποιητικά έχουν ισχύ για **12 μήνες** και κάθε πιστοποιητικό ισούται με **1 MWh** πράσινης ενέργειας (Koengkan et al., 2022). Ωστόσο, το εν λόγω εργαλείο ενεργειακής πολιτικής δεν έχει επεκταθεί μέχρι και σήμερα στον οικιακό τομέα.

Τέλος, σχετικά με την προώθηση της αυτοπαραγωγής από φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας με αποθήκευση ενέργειας στον οικιακό τομέα, η χώρα δεν έχει θέσει σε εφαρμογή κάποιο ρυθμιστικό πλαίσιο που να υποστηρίζει την εν λόγω τεχνολογία. Μέχρι και το 2020, η μέση τιμή των μπαταριών στην χώρα ξεπερνούσε τα **492 €/kWh**, το οποίο καθιστούσε την κεφαλαιουχική δαπάνη (“Capital Expenditure - CAPEX”) αποτρεπτική για τη διάχυση της εν λόγω τεχνολογίας (Foles et al., 2020).

4.2.6. Πολωνία

Στα πλαίσια της εναρμόνισης με τους στόχους της ΕΕ για το κλίμα και την ενέργεια, η Πολωνία έχει θέσει τους παρακάτω εθνικούς στόχους για την ενέργεια και το κλίμα (Πίνακας 7), με στόχο να τους υλοποιήσει μέχρι το 2030 και το 2040 (IEA, 2022a; Ministry of Climate and Environment, 2021):

Πίνακας 7. Κλιματικοί και ενεργειακοί στόχοι της Πολωνίας για την περίοδο 2030-2040.

Στόχοι	2030	2040
Μερίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας		
Ακαθάριστη Τελική Κατανάλωση Ενέργειας	23%	28,5%
Ηλεκτροπαραγωγή	32%	40%
Θέρμανση και Ψύξη	28%	34%
Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου (σε σχέση με το 1990)	- 30%	- ²⁴
Μερίδιο Άνθρακα στην Ηλεκτροπαραγωγή	< 56%	- ²⁵
Εγκατεστημένη Ισχύς Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	5-7 GW	10-16 GW
Εγκατεστημένη Ισχύς Πυρηνικών Εργοστασίων	1-1,6 GW (2033)	6-9 GW (2043)
Ποσοστό Πολιτών με Έξυπνους Μετρητές για “net metering”	80% (2028)	-

Πηγές: IEA, 2022 & Υπουργείο Κλίματος και Περιβάλλοντος Πολωνίας, 2021.

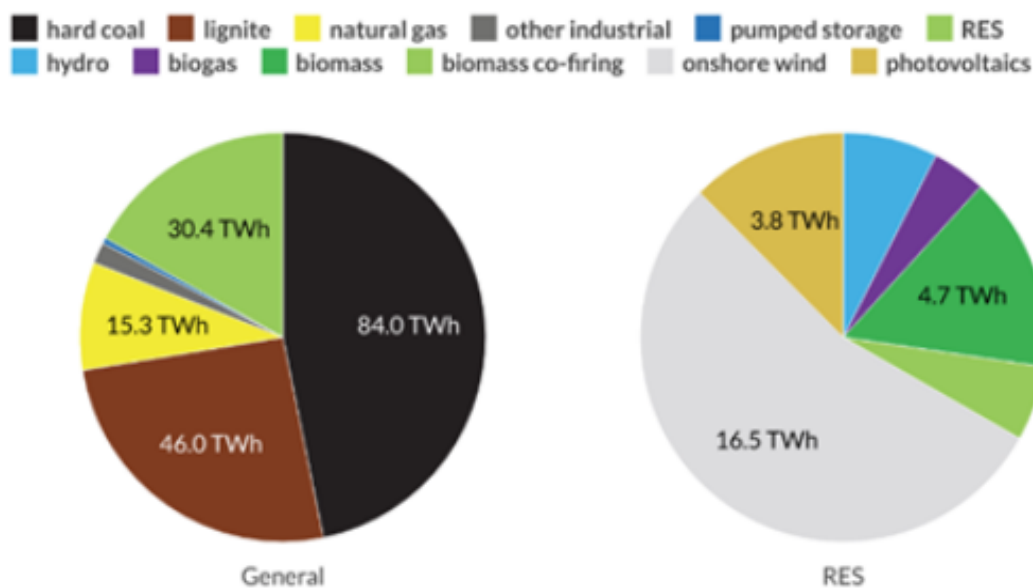
Όσον αφορά την επιβολή φορολογίας για τις εκπομπές CO₂, η χώρα έχει επιβάλει έναν υποτυπώδη φόρο εκπομπών CO₂, ίσο με **0,07 €/tnCO₂**. Επίσης, βάσει οδηγίας της ΕΕ, η χώρα επιβάλλει φόρο κατανάλωσης στην ηλεκτρική ενέργεια ίσο με **0,96 €/MWh**. Από τη φορολογία εξαιρείται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (Ignaciuk, 2019). Ωστόσο, η κυβέρνηση ανακοίνωσε προσωρινή μείωση στον φόρο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της παγκόσμιας ενεργειακής κρίσης.

Είναι σαφές ότι η Πολωνία δεν έχει εναρμονιστεί με τις οδηγίες της ΕΕ και αυτό πιθανότατα συμβαίνει γιατί τα στερεά καύσιμα (τα οποία αποτελούν το **60%** των εξαγωγών της χώρας) είναι η βασική ενεργειακή πηγή της χώρας για την ηλεκτροπαραγωγή (Διάγραμμα 16).

²⁴ Η χώρα δεν έχει θέσει κλιματικό στόχο για την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2040.

²⁵ Το 2040 η χώρα έχει θέσει ως στόχο να έχει αντικαταστήσει πλήρως τον άνθρακα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πυρηνικά.

Μάλιστα, σύμφωνα με δεδομένα της “Eurostat”, ο Δείκτης Ενεργειακής Εξάρτησης της χώρας το 2022 βρισκόταν στο **42,8%**, με μεγάλο ποσοστό των εξαγωγών της χώρας να οφείλεται στην παραγωγή στερεών καυσίμων. Απεξάρτηση από τον άνθρακα σημαίνει εκθετική αύξηση του Δείκτη Ενεργειακής Εξάρτησης για την χώρα (Malec, 2022). Αυτός είναι ένας από τους βασικούς λόγους για τους οποίους η Πολωνία θέλει να εντάξει την **πυρηνική ενέργεια** στο ενεργειακό της προφίλ. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Djikuc et al. (2021), η αδυναμία της Πολωνίας να επενδύσει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πιθανώς να οδηγήσει τη χώρα στο να αγοράζει πλεονάσματα πράσινης ενέργειας από άλλες χώρες, το οποίο θα έχει επιπτώσεις στην οικονομία της χώρας.

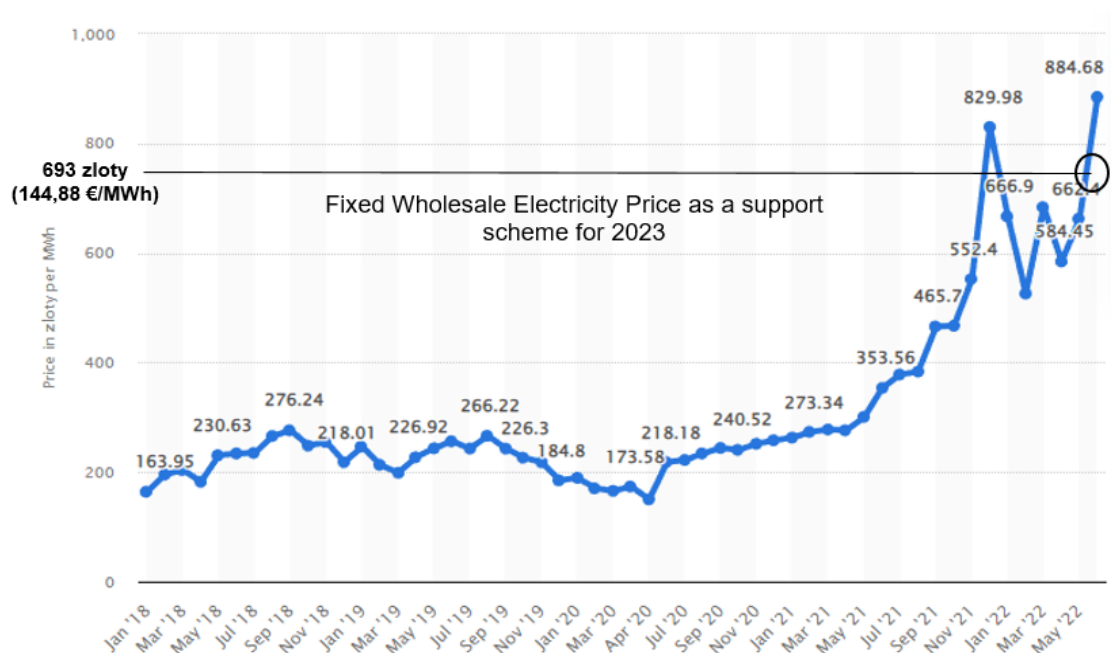


Διάγραμμα 16. Μερίδιο πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή της Πολωνίας (σε TWh). Πηγή: International Trade Administration, 2022.

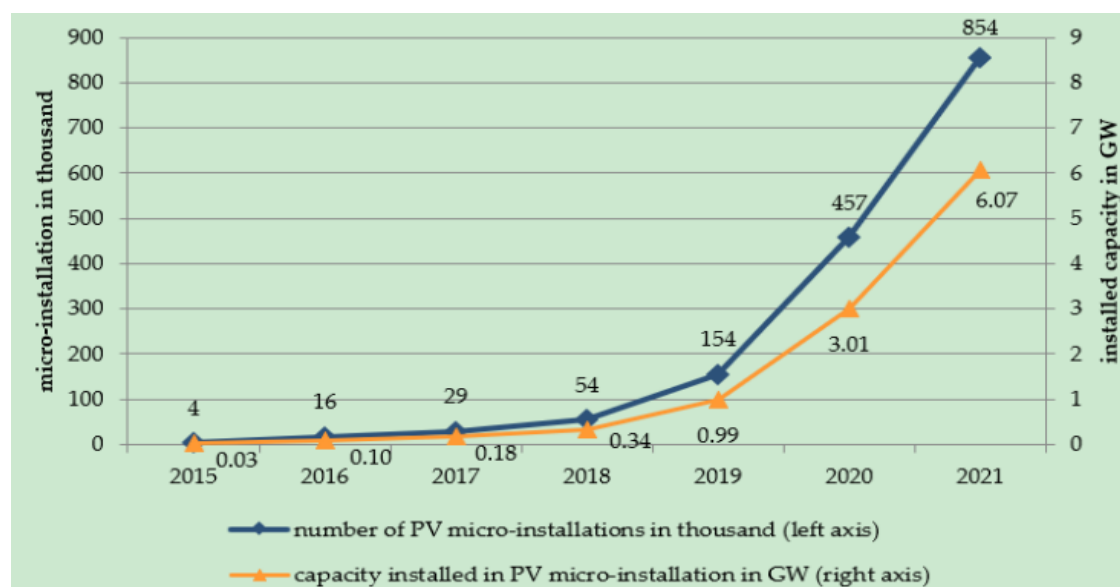
Όσον αφορά την υποστήριξη της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας μέσω επιδοτήσεων τύπου “feed-in tariff” ή “feed-in premium”, η Πολωνία δεν επιδοτεί με κάποιο από τα δύο εργαλεία την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, αλλά τα υδροηλεκτρικά έργα και τα έργα βιομάζας/βιοαερίου (IEA, 2022a; Ignaciuk, 2019). Η Πολωνία υποστηρίζει τη διάχυση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (για εγκαταστάσεις μικρότερες από 500 kW) υιοθετώντας εργαλεία **πλειστηριασμού (“tender/auction”)**, στα οποία νικητής του πλειστηριασμού είναι ο πλειοδότης με τη χαμηλότερη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος αποζημιώνεται με την τιμή αυτή για **15 έτη**, αλλά με χρονικό όριο το τέλος του 2035 (Ignaciuk, 2019). Ωστόσο, τα συγκεκριμένα εργαλεία **δεν αφορούν φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις του οικιακού τομέα**, οι οποίες δεν υποστηρίζονται από το συγκεκριμένο “tender/auction” σχήμα.

Σχετικά με την προώθηση της ιδιοκατανάλωσης, η χώρα επιδιώκει να υποστηρίξει την ατομική ιδιοκατανάλωση (“individual self-consumption”) μέσα από προγράμματα επιδότησης. Τα προγράμματα εστιάζουν σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις από **2 έως και 10 kW** (Zdonek et al., 2022). Η Πολωνία προωθεί την ατομική ιδιοκατανάλωση αποζημιώνοντας τους αυτοπαραγωγούς με εγκατεστημένη ισχύ **μέχρι 10 kW** που τροφοδοτούν το δίκτυο, στο **80-100%** της χονδρεμπορικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (Διάγραμμα 17) και τους αυτοπαραγωγούς με εγκατεστημένη ισχύ **πάνω από 10 kW (μέχρι 50 kW)** στο **70-100%** της χονδρεμπορικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποδοτικότητα των ρυθμιστικών και κανονιστικών πλαισίων της χώρας σχετικά με τη διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα αποτυπώνεται στο **Διάγραμμα 18** (Wicki et al., 2022),

στο οποίο παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Πολωνίας την περίοδο 2015-2021.



Διάγραμμα 17. Χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Πολωνία (σε zloty/MWh)²⁶. Πηγή: Statista, 2022.



Διάγραμμα 18. Εγκατεστημένη ισχύς (σε GW) και πλήθος φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Πολωνίας για την περίοδο 2015-2021. Πηγή: L. Wicki et al., 2022.

Στα πλαίσια της υποστήριξης του ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”), η χώρα είχε υιοθετήσει το εν λόγω σχήμα ενεργειακής πολιτικής για τη διάχυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας από το 2016, και είχε ισχύ μέχρι τον Απρίλιο του 2022. Στα πλαίσια του “net metering” που ίσχυε στην χώρα, οι αυτοπαραγωγοί αποζημιώνονταν στο **70-80%** της ενέργειας που διοχέτευαν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη λιανική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (Trela & Dubel, 2022). Σήμερα, η Πολωνία έχει υιοθετήσει το εργαλείο του συμψηφισμού λογαριασμού (“net billing”), με το οποίο οι

²⁶ 1 zloty = 0,21 €.

αυτοπαραγωγοί αποζημιώνονται με βάση τη χονδρεμπορική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χώρα σχεδιάζει να θέσει **σταθερή τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για το 2023**, εν καιρώ ενεργειακής κρίσης, ίση με **144,88 €/MWh**. Στα τέλη του 2020, πραγματοποιήθηκε τεχνοοικονομική ανάλυση σχετικά με το εργαλείο υποστήριξης, το οποίο θα είχε το βέλτιστο αποτέλεσμα στη διάχυση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στην Πολωνία (Gornowicz & Castro, 2020). Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η χρήση μηχανισμού “net metering” αντί του “feed-in tariff” θα καθιστούσε την «Καθαρή Παρούσα Αξία» (“Net Present Value - NPV”) των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας τουλάχιστον τέσσερις (4) φορές μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση χρήσης επιδότησης τύπου “feed-in-tariff” (Gornowicz & Castro, 2020).

Η Πολωνία διέθετε αγορά πράσινων πιστοποιητικών, αλλά όχι για τον οικιακό τομέα. Τα πράσινα πιστοποιητικά ήταν ανταλλάξιμα και αφορούσαν τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Το εν λόγω εργαλείο υιοθετήθηκε το 2016 στα πλαίσια της υποχρέωσης της χώρας να εναρμονιστεί με τις οδηγίες της ΕΕ και τα πράσινα πιστοποιητικά πήραν την ονομασία «Πιστοποιητικά Προέλευσης» ή “Certificates of Origin” (Wedzik et al., 2017). Σύμφωνα με το Χρηματιστήριο Ενέργειας της Πολωνίας (“TGE”), το 2019 η μέση τιμή των πράσινων πιστοποιητικών στην Πολωνία ήταν **27 €/MWh** (Wedzik et al., 2017). Ωστόσο, τη δεδομένη χρονική στιγμή (2023), η αγορά πράσινων πιστοποιητικών σταδιακά αντικαθίσταται από το νέο θεσμικό πλαίσιο υποστήριξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων της χώρας, το οποίο χαρακτηρίζεται από πλειστηριασμούς (βλ. προηγούμενη παράγραφο).

Τέλος, η Πολωνία δεν εφαρμόζει κάποιο ρυθμιστικό πλαίσιο που να υποστηρίζει τη διάχυση τεχνολογιών αυτοπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δυνατότητα για αποθήκευση. Μάλιστα, σύμφωνα με τους Djikuc et al. (2022), τυχόν εκπώσεις και ευνοϊκά ρυθμιστικά πλαίσια που ίσχυαν για τους αυτοπαραγωγούς μέχρι τον Μάρτιο του 2022, δεν ισχύουν για τους νέους αυτοπαραγωγούς που θα εισέρχονται στην αγορά μετά την 1 Απριλίου 2022.

4.2.7. Ενεργά εργαλεία υποστήριξης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα ανά υπό μελέτη Κράτος Μέλος

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει επιγραμματικά τα εργαλεία που είναι σε εφαρμογή στα υπό μελέτη κράτη μέλη της ΕΕ και λειτουργούν με θετικό τρόπο στη διάχυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα.

Πίνακας 8. Ενεργά εργαλεία υποστήριξης διάχυσης Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα ανά υπό μελέτη Κράτος Μέλος²⁷.

	Φόρος Εκπομπών CO ₂	“Feed-in tariff”	“Feed-in premium”	“Net metering”	“Net billing”	Αγορά πράσινων πιστοποιητικών	“BESS”
Γαλλία	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Δανία	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗
Ελλάδα	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓
Ισπανία	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Πορτογαλία	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗
Πολωνία	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗

Επισημαίνεται ότι η σύνοψη των εν λόγω υποστηρικτικών εργαλείων διάχυσης αφορά τον οικιακό τομέα. Για παράδειγμα, η Γαλλία εφαρμόζει φόρο εκπομπών CO₂, ωστόσο ο φόρος

²⁷ Ο χαρακτηρισμός με πράσινο ή κόκκινο χρώμα αφορά αποκλειστικά το εάν εφαρμόζεται ο κάθε μηχανισμός και όχι το εάν αυτός επιδρά θετικά ή αρνητικά στη διάχυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα του κάθε κράτους μέλους της ΕΕ.

δεν επιβαρύνει τους οικιακούς καταναλωτές, αλλά τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής (χωρίς να μετακυλύεται στον οικιακό τομέα). Επίσης, ενώ η Πορτογαλία διαθέτει αγορά πράσινων πιστοποιητικών, η αγορά δεν περιλαμβάνει τον οικιακό τομέα.

4.3. Χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος των υπό μελέτη κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Στην ενότητα αυτή, γίνεται ανάλυση των πιο πρόσφατων χρονικά χαρακτηριστικών και δεδομένων που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι (“inputs”) στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα. Πιο αναλυτικά, στην **Ενότητα 4.3**, γίνεται ανάλυση των παρακάτω δεδομένων και χαρακτηριστικών ανά υπό μελέτη κράτος μέλος της ΕΕ:

- Ιστορικά δεδομένα σχετικά με την ζήτηση των επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας
- Κεφαλαιουχικές δαπάνες για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας
- Κόστος επένδυσης σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία.
- Λιανική τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας
- Ενεργά σχήματα αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών (ενεργειακός συμψηφισμός, κ.λπ.)

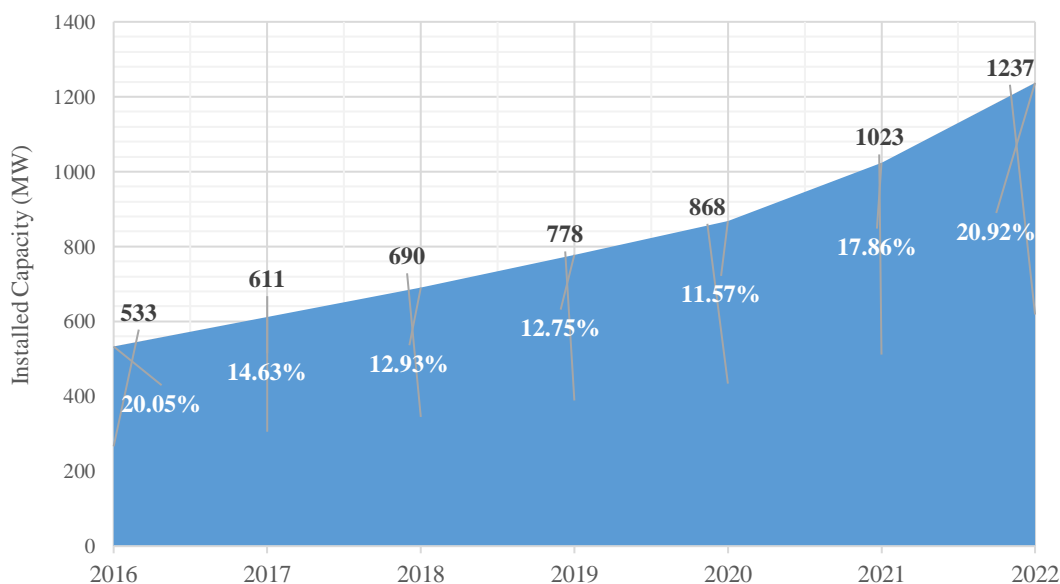
Τέλος, γίνεται επιγραμματική σύνοψη όλων των παραπάνω δεδομένων ανά υπό μελέτη κράτος μέλος της ΕΕ σε αντίστοιχους πίνακες στο τέλος κάθε ενότητας (**Πίνακας 11, Πίνακας 12, Πίνακας 13, Πίνακας 14, Πίνακας 15, Πίνακας 16**).

4.3.1. Γαλλία

Το πρώτο κράτος μέλος της ΕΕ για το οποίο γίνεται ανάλυση των χαρακτηριστικών και δεδομένων του ενεργειακού του συστήματος, είναι η Γαλλία. Μέχρι τα μέσα του 2019, η εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα αντιπροσώπευε το **12%** της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στη χώρα (*IEA, 2019*). Πράγματι, σύμφωνα με το **Διάγραμμα 19**, το οποίο δημιουργήθηκε βάσει δεδομένων του “Statista”, τα δεδομένα επιβεβαιώνονται και η εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας του οικιακού τομέα για το 2022 είναι **1.237 MW**²⁸. Η μεγαλύτερη ετήσια αύξηση σε εγκατεστημένη ισχύ παρατηρείται από τα μέσα του 2021 στα μέσα του 2022, κατά την οποία προστέθηκαν επιπλέον **214 MW** εγκατεστημένης ισχύος, το οποίο μεταφράζεται σε αύξηση ίση με **20,92%**. Σχετικά με το πλήθος των εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, το 2021 καταμετρήθηκαν **505.767** εγκαταστάσεις από 0 έως 9 kW (*IEA, 2021c*).

²⁸ Σε αθροιστικούς όρους.

**Αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στον οικιακό τομέα της Γαλλίας
και ποσοστό αύξησης από έτος σε έτος (2016-2022)**



Διάγραμμα 19. Αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Γαλλίας για την περίοδο 2016-2022.

Όσον αφορά το κόστος επένδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στη χώρα, το κόστος κυμαίνεται από **1,7 έως 3,5 €/W**, ανάλογα με το είδος των φωτοβολταϊκών προς εγκατάσταση. Πιο αναλυτικά, ο **Πίνακας 9** αποτυπώνει το κόστος εγκατάστασης ανά κατηγορία φωτοβολταϊκών στέγης (IEA, 2021c):

Πίνακας 9. Κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στέγης στον οικιακό τομέα της Γαλλίας (σε €/W).

Κατηγορία Φωτοβολταϊκών Στέγης ²⁹	Τιμή (€/W)
BAPV < 3kW	2,3-2,5
BAPV από 5 έως 10 kW	1,7-2,5
BIPV από 5 έως 10 kW	2,0-3,5

Πηγή: IEA, 2021.

Σχετικά με το κόστος των μπαταριών στην χώρα, κάνοντας έρευνα αγοράς από διάφορους πωλητές μπαταριών, υπολογίζεται ότι στη Γαλλία το μέσο κόστος (λιανικής) μπαταριών λιθίου είναι περίπου **579 €/kWh**. Λαμβάνοντας υπόψιν τον **Πίνακα 10**, εξάγονται τα κόστη μπαταριών ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του κτηρίου, κάνοντας την παραδοχή ότι η βέλτιστη χωρητικότητα αποθήκευσης ανά kW εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών είναι **1,68 kWh** (Koko, 2022). Στην πραγματικότητα, η βέλτιστη χωρητικότητα αποθήκευσης διαφέρει από τόπο σε τόπο, λόγω του ηλιακού δυναμικού, των ωρών μεγιστοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας και της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 10. Κόστος μπαταρίας ανά εγκατάσταση Φ/Β στη Γαλλία.

Εγκατεστημένη Ισχύς Φ/Β (kW)	Μέγεθος Μπαταρίας (kWh)	Κόστος Μπαταρίας (€)
1 kW	1,68 kWh	973 €
2 kW	3,36 kWh	1.944 €

²⁹ Οι κατηγορίες φωτοβολταϊκών στέγης (BAPV και BIPV) περιγράφονται στο Γλωσσάριο της εργασίας.

3 kW	5,04 kWh	2.918 €
4 kW	6,72 kWh	3.891 €
5 kW	8,40 kWh	4.864 €
6 kW	10,08 kWh	5.836 €
7 kW	11,76 kWh	6.809 €
8 kW	13,44 kWh	7.782 €
9 kW	15,12 kWh	8.754 €
10 kW	16,80 kWh	9.727 €

Πηγή: Ultimatron France, 2022.

Το επόμενο μέγεθος που εισάγεται ως είσοδος στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”, είναι η τιμή λιανικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Στο **Διάγραμμα 20** αποτυπώνεται η εξέλιξη της λιανικής τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στη Γαλλία, με την τιμή για το 2022 να ανέρχεται σε **0,2086 €/kWh** μετά φόρων (βάσει δεδομένων του “Statista”).



Διάγραμμα 20. Εξέλιξη λιανικής τιμής πώλησης για τα νοικοκυριά στη Γαλλία την περίοδο 2016-2022 (σε €/kWh). Πηγή: Statista, 2022.

Εν κατακλείδι, όπως αναφέρθηκε και στην **Υποενότητα 4.2.1**, τα σχήματα μέσω των οποίων αποζημιώνονται οι αυτοπαραγωγοί στην Γαλλία, είναι οι επιδοτήσεις με σταθερή τιμή τύπου “feed-in tariff” και ο ενεργειακός συμψηφισμός. Αναλυτικά, τα ποσά με τα οποία αποζημιώνονται οι αυτοπαραγωγοί στην χώρα, αναφέρει ο **Πίνακας 6 (Υποενότητα 4.2.1)**.

Συνοψίζοντας, ο **Πίνακας 11** αναφέρει επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος της Γαλλίας:

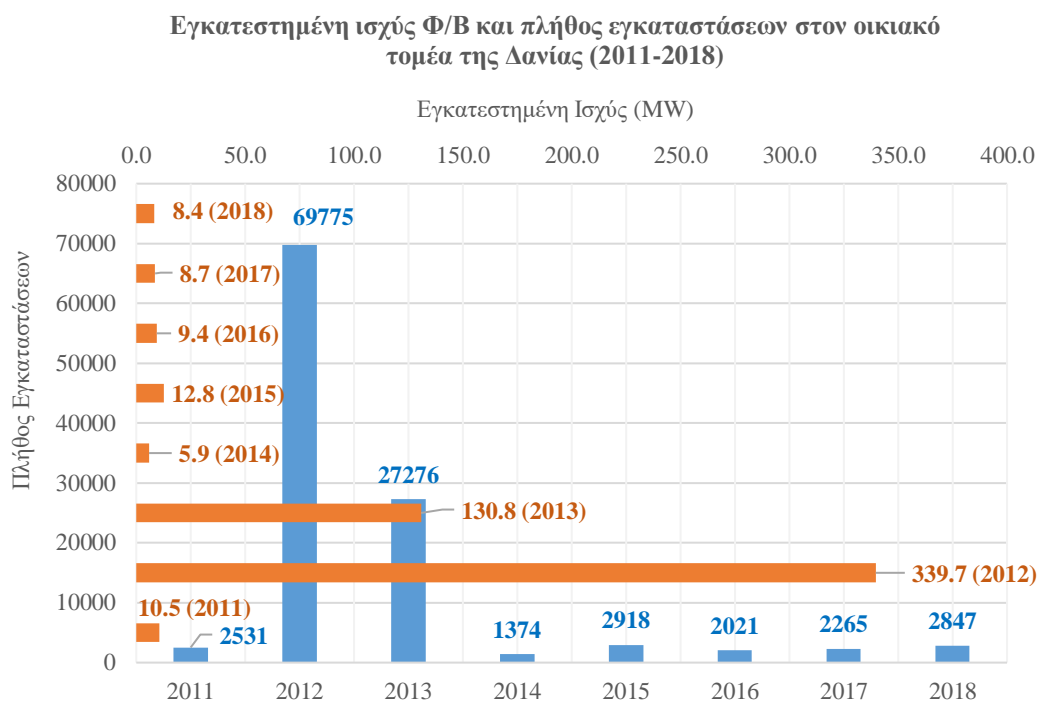
Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Γαλλίας.

Είσοδοι (Γαλλία)	Μέγεθος
Ζήτηση σε Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα	1.237 MW 505.767 εγκαταστάσεις
Κόστος Εγκατάστασης Φ/Β	1.700-3.500 €/kW

Κόστος Αποθήκευσης (Μπαταρία Λιθίου)	579 €/kWh
Λιανική Τιμή Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας	0,2086 €/kWh
	181,4 €/MWh (P ≤ 3 kW _p)
“Feed-in tariff”	154,2 €/MWh (3kW _p < P ≤ 9 kW _p)
	111,5 €/MWh (9 kW _p < P ≤ 10 kW _p)
“Net metering”	✓

4.3.2. Δανία

Η επόμενη χώρα, της οποίας αναλύονται τα δεδομένα και χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος που θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”, είναι η Δανία. Το 2018, υπήρχαν εγκατεστημένα **526 MW** συνολικής εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών στον οικιακό τομέα (1-10 kW_p) με **111.007** εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών στέγης (IEA, 2018a). Νεότερα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα. Αναλυτικότερα, στο **Διάγραμμα 21**, αποτυπώνεται το πλήθος των εγκαταστάσεων, καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα από το 2011 έως το 2018, με βάση τα δεδομένα των «National Survey Reports» του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας για την Δανία τις αντίστοιχες χρονιές.



Διάγραμμα 21. Εγκατεστημένη ισχύς και πλήθος εγκαταστάσεων Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Δανίας την περίοδο 2011-2028.

Όσον αφορά το μέσο κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στη Δανία, σύμφωνα με την “Solar Reviews” το κόστος είναι **2,74-2,93 €/W**. Αυτό συνεπάγεται ένα μέσο κόστος από **2.740 €/kW** έως **2.930 €/kW**.

Για την εύρεση της λιανικής τιμής των μπαταριών στη χώρα, έγινε έρευνα αγοράς σε διάφορους λιανέμπορους για μπαταρίες 12 V και 100 Ah (δηλαδή 1,2 kWh). Από την έρευνα αγοράς προέκυψε ότι το μέσο κόστος για την απόκτηση μπαταριών στη Δανία, είναι **406**

€/kWh (χαμηλότερη τιμή από ότι στη Γαλλία, πιθανόν λόγω της μειωμένης ζήτησης των μπαταριών στη Δανία).

Σχετικά με τη λιανική τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, με βάση το “countryeconomy”³⁰, τα νοικοκυριά της Δανίας καλούνται να πληρώσουν την ακριβότερη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη με την λιανική τιμή πώλησης να ανέρχεται στα **0,4559 €/kWh** μετά φόρων.

Τα εν ενεργεία σχήματα ενεργειακής πολιτικής στη χώρα (**Υποενότητα 4.2.2**), τα οποία υποστηρίζουν τη διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, είναι τα εξής:

- Φόρος Άνθρακα³¹ ίσος με **24 €/tnCO₂**.
- “Feed-in premium” (προκύπτει βάσει προσφορών).
- Ενεργειακός συμψηφισμός “Net metering”.
- Αγορά Πράσινων Πιστοποιητικών (“Guarantees of Origin”).

Εν κατακλείδι, τα χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος της Δανίας, είναι τα εξής (**Πίνακας 12**):

Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Δανίας.

Είσοδοι (Δανία)	Μέγεθος
Ζήτηση σε Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα	526 MW 111.007 εγκαταστάσεις
Κόστος Εγκατάστασης Φ/Β	2.740-2.930 €/kW
Κόστος Αποθήκευσης (Μπαταρία Λιθίου)	406 €/kWh
Λιανική Τιμή Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας	0,4559 €/kWh
Φόρος Άνθρακα	24 €/tnCO₂
“Feed-in premium”	✓
“Net metering”	✓
Αγορά Πράσινων Πιστοποιητικών	✓

4.3.3. Ελλάδα

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα δεδομένα και χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος της Ελλάδας, τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στη βαθμονόμηση του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” (**Κεφάλαιο 5**), καθώς επίσης και στην εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης (**Κεφάλαιο 6**) σχετικά με την διάχυση των φωτοβολταϊκών ισχύος μικρότερης ή ίσης με 10 kW_p στον οικιακό τομέα της χώρας (κατά βάση φωτοβολταϊκά στέγης).

Ένα από τα βασικά μεγέθη που αποτελούν είσοδο (“input”) στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”, είναι η εξέλιξη της ζήτησης για φωτοβολταϊκά αυτής της κατηγορίας (≤ 10 kW_p). Βάσει δεδομένων του 2022, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά στέγης (≤ 10 kW_p) ανέρχεται στα **352 MW** (DAPEEP, 2022; HELAPCO, 2019). Ενώ η ιστορική εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος στην χώρα για την περίοδο 2010-2021, περιγράφεται από το **Διάγραμμα 22**, ακριβώς παρακάτω:

³⁰ <https://countryeconomy.com/energy-and-environment/electricity-price-household/denmark>.

³¹ Εφαρμόζεται και στον οικιακό τομέα.



Διάγραμμα 22. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας για την περίοδο 2010-2021.

Το πλήθος των αιτήσεων για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στέγης έως το 2021 δεν είναι διαθέσιμο, ωστόσο, στα πλαίσια της βαθμονόμησης που θα ακολουθήσει στο **Κεφάλαιο 5** της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα αναφερθούν εκτενέστερα τα τεχνοοικονομικά στοιχεία (και ο αριθμός των αιτήσεων) για την Ελλάδα την περίοδο 2010-2013, όπου ήταν ενεργό το σχήμα αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών με επιδότηση τύπου “feed-in tariff” (Stavrakas & Famos, 2022). Άλλωστε, όπως παρατηρείται και στο **Διάγραμμα 22**, η μεγαλύτερη διάχυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών στέγης σημειώθηκε εκείνη την περίοδο, αφού τα **348 MW** από τα **352 MW** που είναι εγκατεστημένα σήμερα, εγκαταστάθηκαν εκείνη την περίοδο (2010-2013).

Το επόμενο τεχνοοικονομικό μέγεθος που θα πρέπει να εξεταστεί, είναι το κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων στον οικιακό τομέα (μικρότερων ή ίσων των 10 kW_p). Σύμφωνα με έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε σε συγκεκριμένους μεγάλους παίκτες της αγοράς φωτοβολταϊκών και είναι μέλη του Ελληνικού Συνδέσμου Εταιρειών Φωτοβολταϊκών (“Hellenic Association of Photovoltaic Companies - HELAPCO”), το κόστος εγκατάστασης για φωτοβολταϊκά στέγης μικρότερα ή ίσα από 10 kW_p σήμερα, κυμαίνεται μεταξύ **1.200-1.500 €/kW**.

Πραγματοποιώντας επίσης έρευνα αγοράς στην αγορά μπαταριών (για εγχώριους παραγωγούς) και στοχεύοντας στις μπαταρίες ιόντων λιθίου (κατ’ εξοχήν εφαρμογή σε οικιακές εγκαταστάσεις για αποθήκευση ενέργειας από φωτοβολταϊκά), η τιμή κυμαίνεται μεταξύ **600-800 €/kWh**. Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, θα χρησιμοποιηθεί μια μέση τιμή ίση με **700 €/kWh**.

Όσον αφορά την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που καλούνται να πληρώσουν τα νοικοκυριά μεσαίου μεγέθους της Ελλάδας, με βάση την “Eurostat”³², το 2022 η χώρα ήταν στην 12^η θέση της ΕΕ με τιμή ίση με **0,2101 €/kWh**. Ενδεικτικά, στο **Διάγραμμα 23** αποτυπώνεται η εξέλιξη της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά στην Ελλάδα, από το 2011 έως το 2022:

³² <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=en>.



Διάγραμμα 23. Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά στην Ελλάδα την περίοδο 2011-2022. Πηγή: Eurostat, 2023.

Σχετικά με τους μηχανισμούς υποστήριξης της διάχυσης της τεχνολογίας που μελετάται, η Ελλάδα, όπως προαναφέρθηκε και στην **Υποενότητα 4.2.3**, επιχειρεί να υποστηρίξει την διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας με τα εξής σχήματα ενεργειακής πολιτικής:

- “Feed-in tariff” ίσο με **87 €/MWh**.
- “Feed-in premium” ίσο με **1,2 * Μέση Οριακή Τιμή Συστήματος Προηγούμενου Έτους**.
- “Net metering”.
- Θεσμικό πλαίσιο υποστήριξης διάχυσης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία, το οποίο προβλέπει το **100%** του κόστους της μπαταρίας να επιδοτείται από το κράτος (με ισχύ από το 2023 και μετά).

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η Ελλάδα επανέφερε τη δυνατότητα σύναψης σύμβασης με σταθερή τιμή αποζημίωσης (“fixed price”) το 2022. Ένας αυτοπαραγωγός που θα είχε συνάψει σύμβαση με “premium” τιμή αποζημίωσης (“premium price”), βάσει της εξέλιξης της μέσης οριακής τιμής συστήματος³³ των τελευταίων ετών, θα αποζημιωνόταν το 2022 με τιμή ίση με **0,3369 €/kWh**. Αυτό αποδεικνύει ότι η αποζημίωση με επιδότηση τύπου “feed-in premium” είναι δυνατό να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα για υιοθέτηση της επένδυσης, εάν οι οριακές τιμές συστήματος της αγοράς κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, ωστόσο, εάν οι οριακές τιμές συστήματος της αγοράς κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, η αποζημίωση μέσω επιδότησης τύπου “feed-in premium” είναι δυνατό να αποτελέσει υποστηρικτικό παράγοντα για την υιοθέτηση της επένδυσης, έναντι της αποζημίωσης με επιδότηση τύπου “feed-in tariff” (Vrapi & Dagoumas, 2020).

Τέλος, κλείνοντας την υποενότητα, ο **Πίνακας 13** συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος της Ελλάδας:

³³ Η εξέλιξη της οριακής τιμής συστήματος εξήχθησε από δεδομένα του Ελληνικού Χρηματιστηρίου Ενέργειας.

Πίνακας 13. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Ελλάδας.

Είσοδοι (Ελλάδα)	Μέγεθος
Ζήτηση σε Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα	352 MW
Κόστος Εγκατάστασης Φ/Β	1.200-1.500 €/kW
Κόστος Αποθήκευσης (Μπαταρία Λιθίου)	700 €/kWh
Λιανική Τιμή Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας	0,2101 €/kWh
“Feed-in tariff”	87 €/MWh
“Feed-in premium”	1,2 * ΟΤΣ Προηγούμενου Έτους
“Net metering”	✓
Θεσμικό πλαίσιο υποστήριξης “BESS”	✓

4.3.4. Ισπανία

Το επόμενο κράτος μέλος της ΕΕ που θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά και τα δεδομένα του ενεργειακού του συστήματος, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”, είναι η Ισπανία. Το πρώτο μέγεθος που θα χρησιμοποιηθεί ως είσοδος είναι η ιστορική εξέλιξη της ζήτησης σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας (έως 10 kW_p) στον οικιακό τομέα. Σύμφωνα με πληροφορίες και δεδομένα των “National Survey Reports” του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (“IEA”), από το 2013 έως και το 2021, η ζήτηση σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της χώρας εξελίχθηκε ως εξής (Διάγραμμα 24):



Διάγραμμα 24. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ισπανίας για την περίοδο 2013-2021.

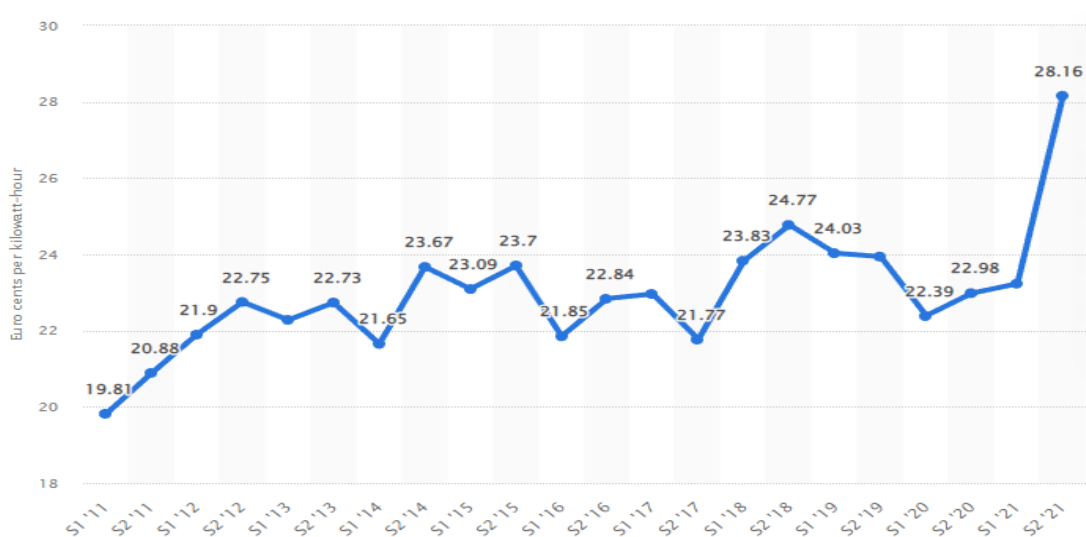
Όσον αφορά τη συνολική ζήτηση, ανέρχεται σε **716 MW** (λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα “National Survey Reports” του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας για την περίοδο 2013-2021. Το πλήθος των εγκαταστάσεων από 0 έως 10 kW_p στον οικιακό τομέα της χώρας δεν είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο και στη σχετική βιβλιογραφία.

Το επόμενο μέγεθος που αναλύεται, είναι το κόστος εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα. Το κόστος για τα φωτοβολταϊκά συστήματα

μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα (εφαρμοσμένα στο κτήριο - “BAPV”) κυμαίνεται μεταξύ **1.300-1.700 €/kW** (IEA, 2020).

Σχετικά με το κόστος των μπαταριών για εγκατάσταση στον οικιακό τομέα, κάνοντας έρευνα αγοράς στον κλάδο λιανικής πώλησης μπαταριών, η μέση τιμή ανά μονάδα ενέργειας είναι περίπου **254 €/kWh** (για αγορά μπαταρίας ιόντων λιθίου από εγχώριους παραγωγούς).

Σύμφωνα με το “Global Petrol Prices”, τα νοικοκυριά της χώρας καλούνται να πληρώσουν την 5^η ακριβότερη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη, με την τιμή λιανικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας να ανέρχεται στα **0,323 €/kWh**³⁴, ενώ στα τέλη του 2021 ήταν **0,2816 €/kWh** (Διάγραμμα 25).



Διάγραμμα 25. Λιανική τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά στην Ισπανία την περίοδο 2011-2021. Πηγή: Statista, 2022.

Τα ενεργά σχήματα υποστήριξης της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στην Ισπανία, όπως προαναφέρθηκαν και στην **Υποενότητα 4.2.4**, είναι τα παρακάτω:

- Φόρος Άνθρακα (**15 €/tnCO₂**) - ο οποίος μετακυλύεται και στον οικιακό τομέα.
- “Feed-in premium” (προκύπτει βάσει προσφορών όπως και στην περίπτωση της Δανίας).
- Θεσμικό πλαίσιο υποστήριξης διάχυσης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία (**Υποενότητα 4.2.4**).

Τέλος, ο **Πίνακας 14** συνοψίζει τα χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος της Ισπανίας:

Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Ισπανίας.

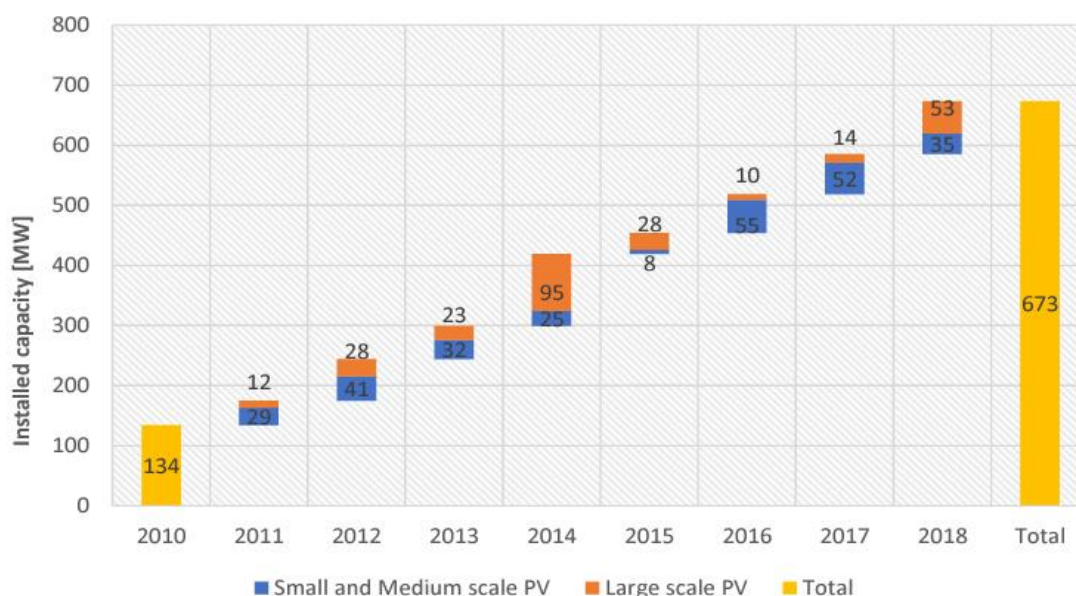
Είσοδοι (Ισπανία)	Μέγεθος
Ζήτηση σε Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα	716 MW
Κόστος Εγκατάστασης Φ/Β	1.300-1.700 €/kW
Κόστος Αποθήκευσης (Μπαταρία Λιθίου)	254 €/kWh
Λιανική Τιμή Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας	0,323 €/kWh
Φόρος Άνθρακα	15 €/tnCO₂

³⁴ https://www.globalpetrolprices.com/Spain/electricity_prices/#h1223.

“Feed-in premium”	✓
Θεσμικό πλαίσιο υποστήριξης “BESS”	✓

4.3.5. Πορτογαλία

Το επόμενο κράτος μέλος της ΕΕ για το οποίο γίνεται ανάλυση των δεδομένων του ενεργειακού του συστήματος, τα οποία θα εισαχθούν ως είσοδοι (“inputs”) στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”, είναι η Πορτογαλία. Το πρώτο μέγεθος που εισάγεται ως είσοδος στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”, είναι ιστορικά δεδομένα σχετικά με τη ζήτηση σε επενδύσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα. Στο **Διάγραμμα 26** (IEA, 2018b) αποτυπώνεται η συνολική ζήτηση σε φωτοβολταϊκά στη χώρα από το 2010 έως το 2018, η οποία επιμερίζεται σε «μικρής και μεσαίας κλίμακας» και «μεγάλης κλίμακας».

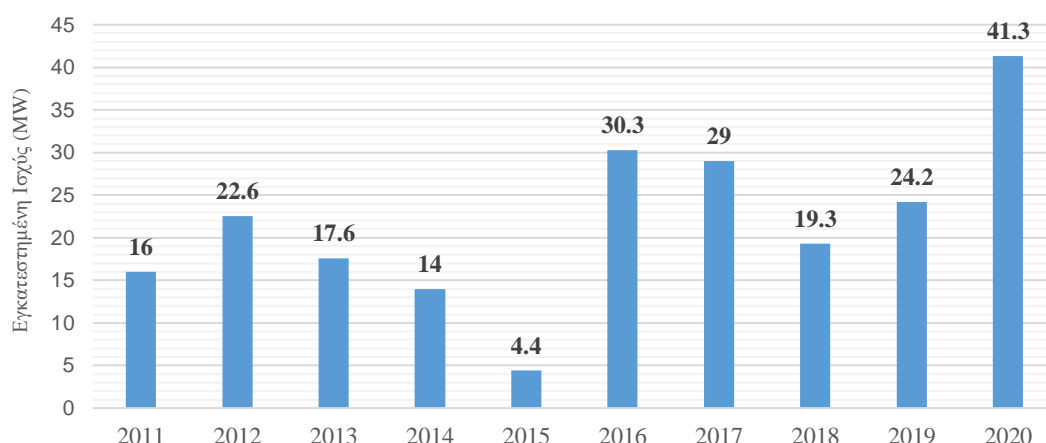


Διάγραμμα 26. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στην Πορτογαλία την περίοδο 2010-2018. Πηγή: IEA (“National Survey Report-Portugal”), 2018.

Είναι αναγκαίο από τα «Φ/Β συστήματα μικρής και μεσαίας κλίμακας» (“small and medium scale PV”) να απομονωθεί η εγκατεστημένη ισχύς που αφορά εγκαταστάσεις έως 10 kW_p στον οικιακό τομέα (“residential solar PV”). Σύμφωνα με το report «Portugal Solar Energy Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact and Forecast (2022-2027)»³⁵, περίπου το **55%** της τελικής κατανάλωσης ενέργειας από φωτοβολταϊκά, προέρχονται από τον οικιακό τομέα. Επομένως, γίνεται η παραδοχή ότι αυτό το 55% ισχύει για τα παραπάνω δεδομένα και εξάγεται το **Διάγραμμα 27**. Ως είσοδος για τη ζήτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα από το **Διάγραμμα 27**.

³⁵ <https://www.researchandmarkets.com/reports/5120313/portugal-solar-energy-market-growth-trends>.

Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στον οικιακό τομέα της Πορτογαλίας (2011-2020)

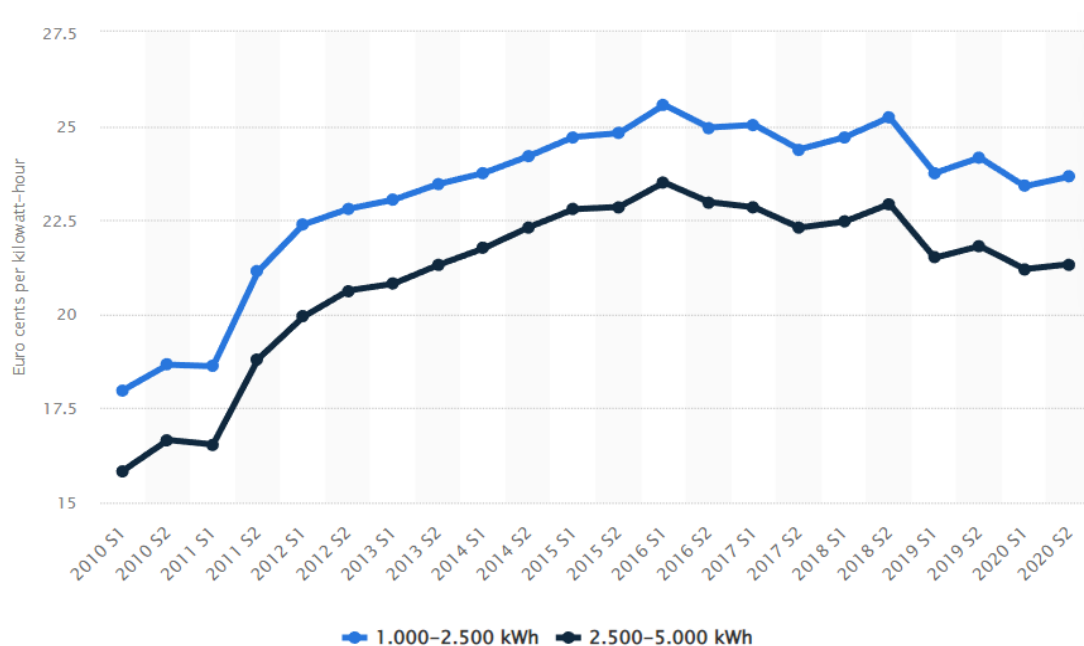


Διάγραμμα 27. Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Πορτογαλίας την περίοδο 2011-2020.

Το επόμενο μέγεθος που μελετάται, είναι η τιμή πώλησης των φωτοβολταϊκών πάνελ στη χώρα. Το κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα ενέργειας για εγκαταστάσεις έως και 10 kW (“BAPV” εγκαταστάσεις) βρίσκεται στα **1,4 €/W** ή **1.400 €/kW** (IEA, 2018b).

Όσον αφορά το κόστος των μπαταριών στη Πορτογαλία, όπως προαναφέρθηκε στην **Υποενότητα 4.2.5**, μέχρι και το 2020, η μέση τιμή των μπαταριών στην χώρα ανερχόταν στα **492 €/kWh** (Foles et al., 2020), ενώ σε πολλές περιπτώσεις το κόστος ανά μονάδα ενέργειας ξεπερνούσε αυτή την τιμή.

Σχετικά με την τιμή λιανικής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά, σύμφωνα με το “Global Petrol Prices”, η μέση τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που καλούνται να πληρώσουν τα νοικοκυριά σήμερα, ανέρχεται στα **0,246 €/kWh**. Ενδεικτικά, η εξέλιξη της τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά της Πορτογαλίας, αποτυπώνεται στο **Διάγραμμα 28**.



Διάγραμμα 28. Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά της Πορτογαλίας την περίοδο 2010-2020. Πηγή: Statista, 2022.

Τέλος, το βασικό σχήμα ενεργειακής πολιτικής, με βάση το οποίο αποζημιώνονται οι αυτοπαραγωγοί στην Πορτογαλία (**Υποενότητα 4.2.5**), είναι η επιδότηση τύπου “feed-in tariff”. Με βάση την *Jimeno (2019)*, το μέσο “feed-in tariff” για την ηλιακή ενέργεια είναι **95 €/MWh**. Παράλληλα, επιβάλλεται φόρος άνθρακα, ο οποίος μετακυλύεται και στον οικιακό τομέα, ίσος με **23,92 €/tnCO₂** (**Υποενότητα 4.2.5**).

Εν κατακλείδι, τα χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος της Πορτογαλίας, συνοψίζει ο **Πίνακας 15**:

Πίνακας 15. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Πορτογαλίας.

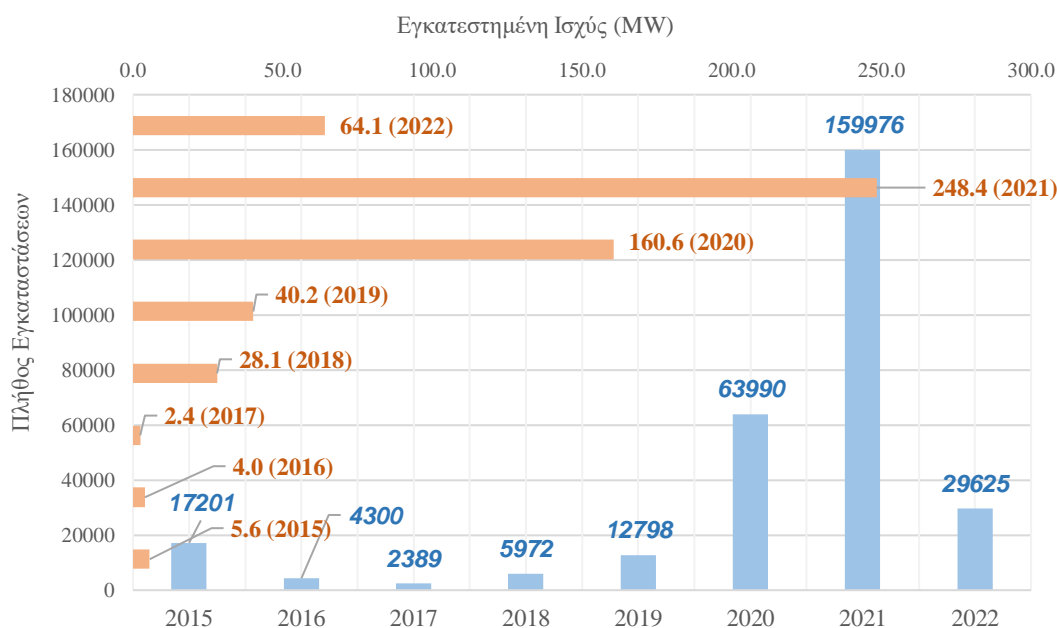
Είσοδοι (Πορτογαλία)	Μέγεθος
Ζήτηση σε Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα	218 MW
Κόστος Εγκατάστασης Φ/Β	1.400 €/kW
Κόστος Αποθήκευσης (Μπαταρία Λιθίου)	492 €/kWh
Λιανική Τιμή Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας	0,246 €/kWh
Φόρος Άνθρακα	23,92 €/tnCO₂
“Feed-in tariff”	95 €/MWh (0 < P ≤ 10 kW_p)

4.3.6. Πολωνία

Η τελευταία χώρα της οποίας θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού της συστήματος, είναι η Πολωνία. Η Πολωνία παρουσιάζει ιδιαιτερότητες ως προς το ενεργειακό της σύστημα και την εναρμόνιση με τους στόχους που καθορίστηκαν στα πλαίσια του “Fit for 55” (**Ενότητα 2.5**), καθώς το ενεργειακό μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής της διέπεται σε ποσοστό **71%** από άνθρακα (*IEA, 2022a*). Επίσης, η Πολωνία έχει θέσει ως στόχο την ένταξη της πυρηνικής ενέργειας στο μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής και πιο συγκεκριμένα έως το 2040 το **16%** της ηλεκτροπαραγωγής να παράγεται από πυρηνικά (*IEA, 2022a*). Γίνεται συνεπώς αντιληπτό ότι σχετικά με την διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, η Πολωνία είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο, σημειώνοντας την μεγαλύτερη διάχυση τα 2 τελευταία έτη (**Πίνακας 1**) και πιο συγκεκριμένα το 2020, όπου η Πολωνία ήταν 1^η στην ΕΕ σε ποσοστό αύξησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με αύξηση **157%** (*Iglinski et al., 2022*).

Το πρώτο μέγεθος που θα αναλυθεί, είναι η ζήτηση που έχουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας (έως 10 kW_p) στη χώρα. Στο **Διάγραμμα 29** αποτυπώνεται η εγκατεστημένη ισχύς και το πλήθος των νοικοκυριών με φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, βάσει δεδομένων του (*Institute for Renewable Energy, 2022*).

Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β και πλήθος εγκαταστάσεων στον οικιακό τομέα της Πολωνίας (2015-2022)



Διάγραμμα 29. Εγκατεστημένη ισχύς και πλήθος εγκαταστάσεων Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Πολωνίας την περίοδο 2015-2022.

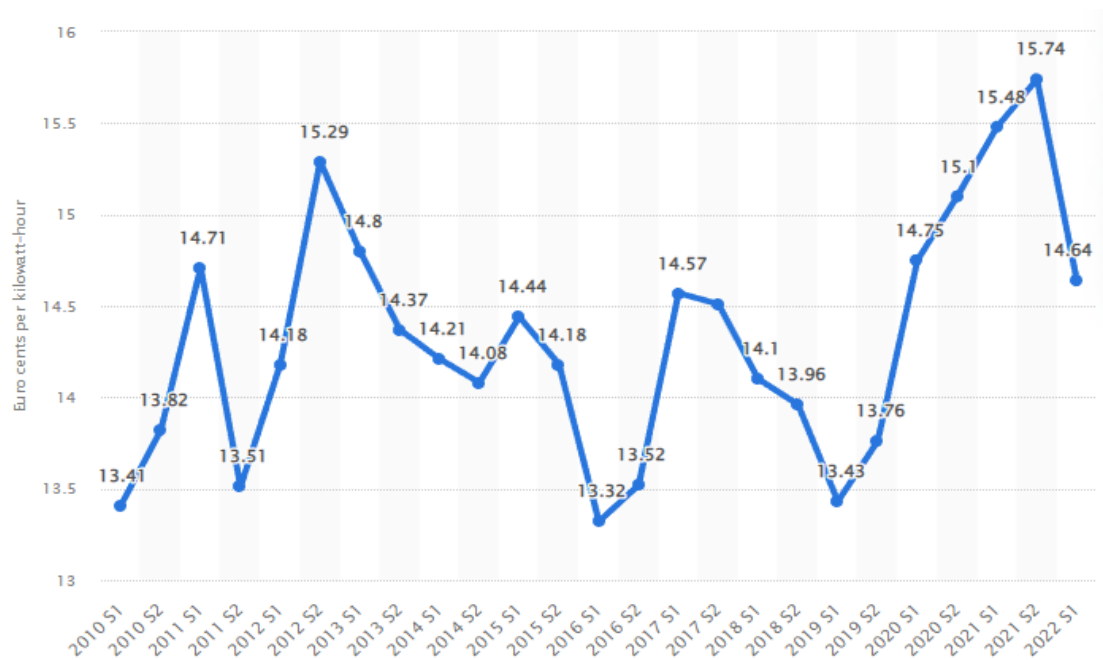
Επόμενο μέγεθος προς ανάλυση και εξέταση, είναι η ιστορική εξέλιξη της ζήτησης σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας από το 2015 έως το 2022, όπως αποτυπώνεται στο **Διάγραμμα 29**. Το συνολικό πλήθος των νοικοκυριών με φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας και η αντίστοιχη συνολική εγκατεστημένη ισχύς, ανέρχονται σε **296.251 εγκαταστάσεις** και **553,4 MW** αντίστοιχα (*Institute for Renewable Energy, 2022*). Σημειώνεται ότι οι παραπάνω πληροφορίες εξάγονται λαμβάνοντας υπόψιν ότι το 80% των «μικροεγκαταστάσεων» (έως 50 kW) αφορούν τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις και το 10% αυτών αφορούν τα νοικοκυριά με εγκατεστημένη ισχύ έως 10 kW_p (*Institute for Renewable Energy, 2022*).

Το επόμενο μέγεθος που εξετάζεται, είναι το κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα. Σύμφωνα με την “Solar Reviews”³⁶, το κόστος εγκατάστασης κυμαίνεται μεταξύ **2.730-3.130 €/kW**, ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ.

Όσον αφορά το κόστος αποθήκευσης ενέργειας και πιο συγκεκριμένα των μπαταριών λιθίου, πραγματοποιώντας έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο, η τιμή των μπαταριών λιθίου στην Πολωνία για το 2022 κυμαίνεται περίπου στα **635 €/kWh**.

Σχετικά με την τιμή λιανικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με την “Statista”, το δεύτερο εξάμηνο του 2022 ήταν **0,1464 €/kWh**. Στο **Διάγραμμα 30** αποτυπώνεται η εξέλιξη της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας που καλούνταν να πληρώσουν τα νοικοκυριά της χώρας από το 2010 έως το 2022. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χαμηλή τιμή στην ηλεκτρική ενέργεια οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στο ότι η ηλεκτροπαραγωγή βασίζεται στον λιγνίτη, ο οποίος παράγεται σχεδόν εξ ολοκλήρου εγχωρίως.

³⁶ <https://www.solarreviews.com/solar-panel-cost/maine/poland>.



Διάγραμμα 30. Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά της Πολωνίας την περίοδο 2010-2022. Πηγή: Statista, 2022.

Τέλος, η Πολωνία δεν έχει εντάξει κάποιον υποστηρικτικό μηχανισμό, ο οποίος να ενισχύει την διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα (Ignaciuk, 2019).

Κλείνοντας την **Υποενότητα 4.3.6**, γίνεται επιγραμματική αναφορά (**Πίνακας 16**), σχετικά με τα χαρακτηριστικά και δεδομένα του ενεργειακού συστήματος της Πολωνίας.

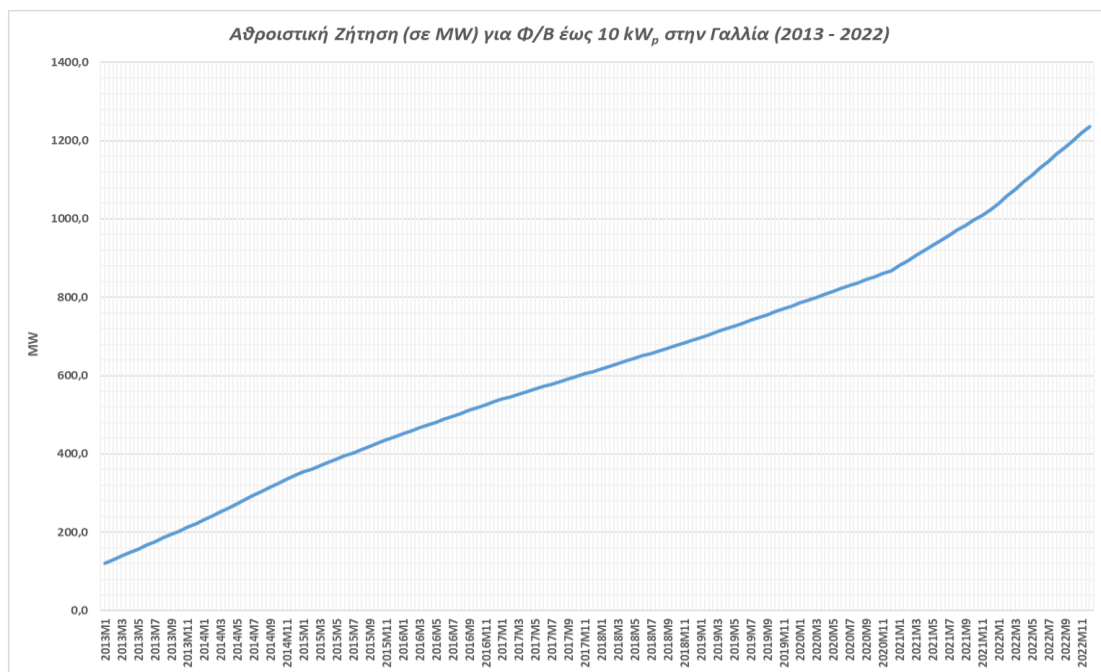
Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά & δεδομένα ενεργειακού συστήματος Πολωνίας.

Είσοδοι (Πολωνία)	Μέγεθος
Ζήτηση σε Φ/Β μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα	553,4 MW 296.251 εγκαταστάσεις
Κόστος Εγκατάστασης Φ/Β	2.730-3.130 €/kW
Κόστος Αποθήκευσης (Μπαταρία Λιθίου)	635 €/kWh
Λιανική Τιμή Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας	0,1464 €/kWh
Net Billing	✓

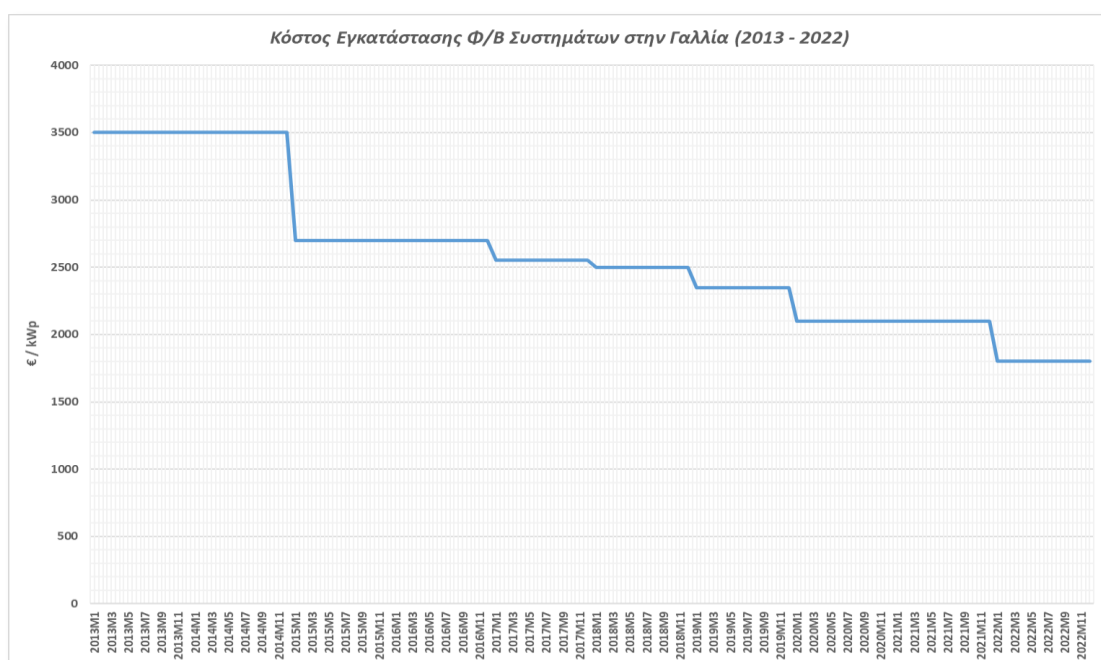
5. Βαθμονόμηση και ανάλυση ευαισθησίας του υπολογιστικού εργαλείου “ΑΤΟΜ” στα υπό μελέτη κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης

5.1. Γαλλία

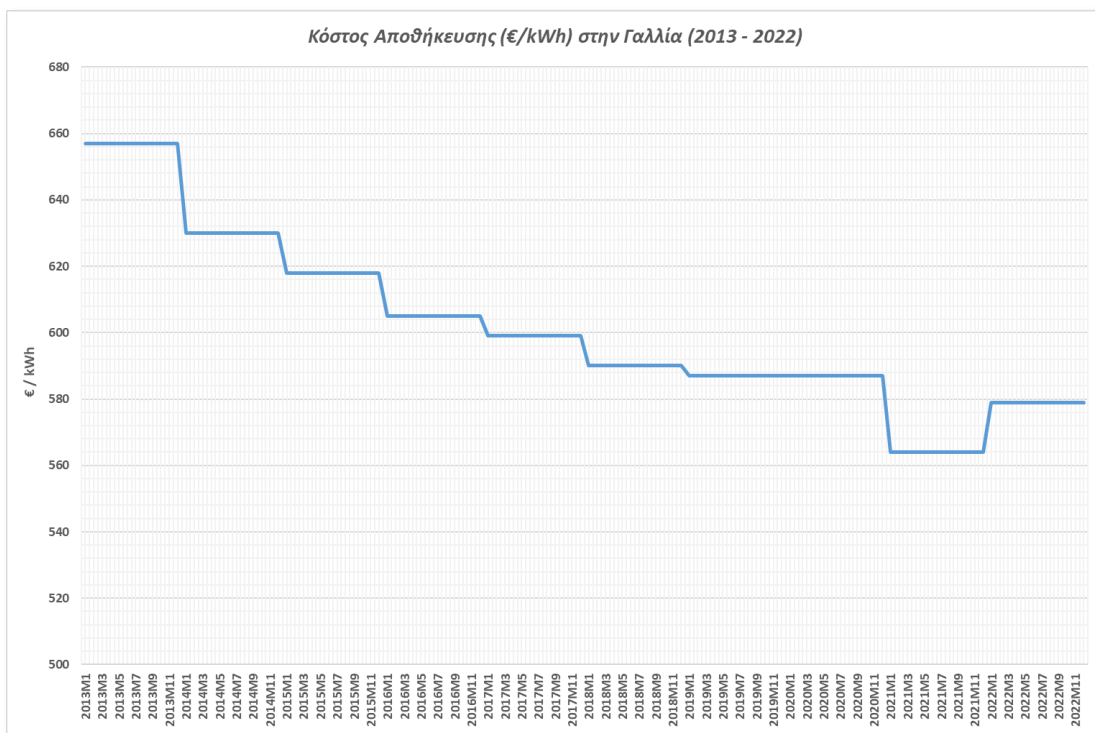
Τα τεχνοοικονομικά δεδομένα της Γαλλίας ως υπό μελέτη κράτος μέλος της ΕΕ, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό εργαλείο “ΑΤΟΜ” για την βαθμονόμησή του, αποτυπώνονται στα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 31, Διάγραμμα 32, Διάγραμμα 33, Διάγραμμα 34).



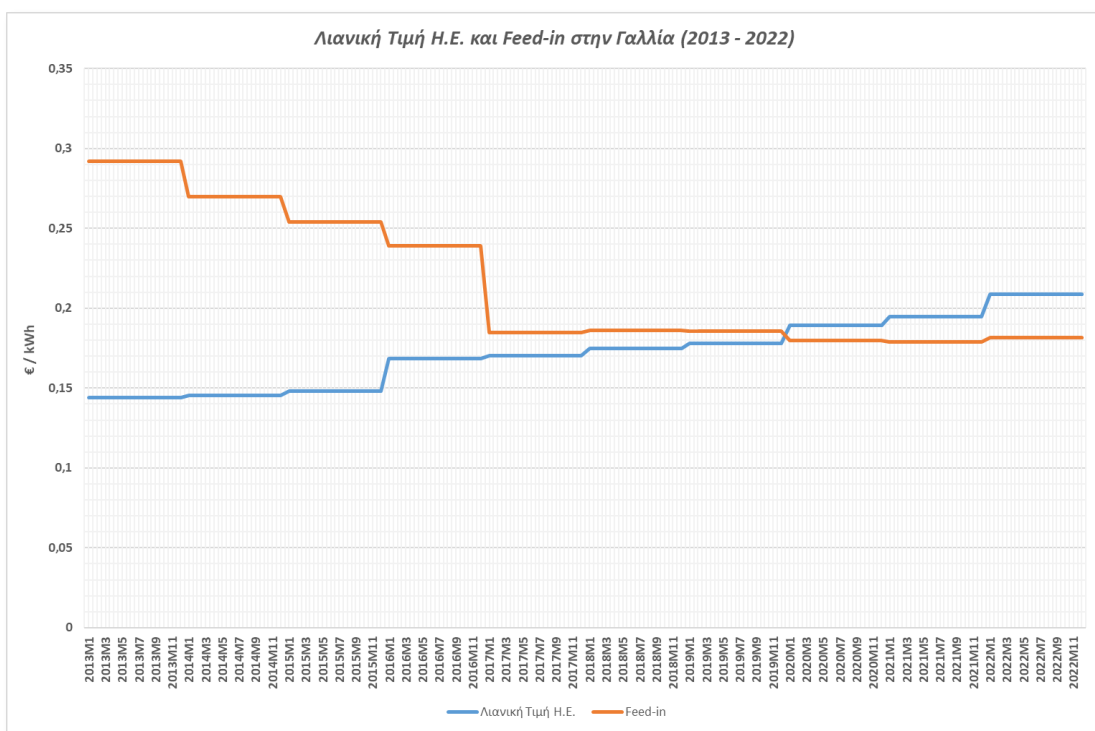
Διάγραμμα 31. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στη Γαλλία την περίοδο 2013-2022.



Διάγραμμα 32. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στη Γαλλία την περίοδο 2013-2022.



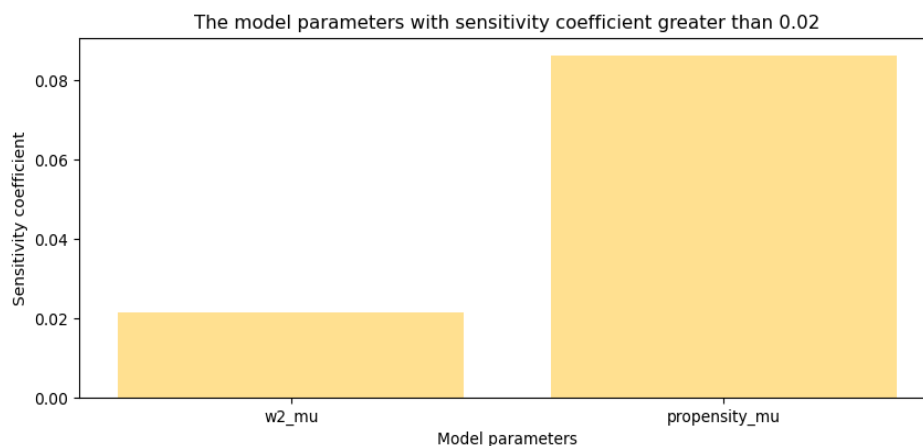
Διάγραμμα 33. Κόστος αποθήκευσης (μαπαταρίες “li-ion”) στη Γαλλία την περίοδο 2013-2022.



Διάγραμμα 34. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στη Γαλλία την περίοδο 2013-2022.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, η περίοδος που πραγματοποιείται η βαθμονόμηση για την περίπτωση της Γαλλίας, είναι από την 01/01/2017 έως την 31/12/2022, όπου εγκαταστάθηκαν **697 MW** φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα (**Διάγραμμα 31**) και ήταν σε ισχύ η επιδότηση με μορφή “feed-in”, όπως αποτυπώνεται στο **Διάγραμμα 34**.

Η ανάλυση ευαισθησίας με στόχο τον προσδιορισμό των παραμέτρων με τιμές πρωτοβάθμιου συντελεστή ευαισθησίας μεγαλύτερο του **0,02** (παράμετροι που ευθύνονται για την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου) υπό διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” αποτυπώνεται στο **Διάγραμμα 35**.



Διάγραμμα 35. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή > 0,02 για τη Γαλλία³⁷.

Τα στατιστικά μεγέθη της τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” (βλ. Γλωσσάριο) αποτυπώνονται στην **Εικόνα 3**.

```

Stats
Coverage: 0.282603
Density: 1.000000
Mass: 0.277050
Res Dim: 8.000000
Mean: 1.000000
Limits
      min      max      qp values
6 -1.638870 -0.971389 1.175245e-13
5  0.160121  1.731723 3.554991e-08
4  0.866904  1.651736 3.332840e-06
9 -1.022736  1.731349 3.597059e-05
8 -0.232568  0.409821 5.987630e-02
7 -0.791765  1.733042 1.247057e-01
3 -1.563874  1.733398 4.333688e-01
0  0.175738  0.844739 7.541686e-01
    
```

Εικόνα 3. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για τη Γαλλία.

Η ανάλυση ευαισθησίας καταδεικνύει τις παραμέτρους που ευθύνονται για την αβεβαιότητα του μοντέλου ως εξής:

- Μέση τιμή βάρους αναμενόμενου μεγέθους εγκατεστημένης βάσης (“Installed_Base_mu”).
- Μέση τιμή βάρους της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή κατωφλίου κάθε οντότητας για την πιθανότητα υλοποίησης της επένδυσης (“Propensity_mu”).

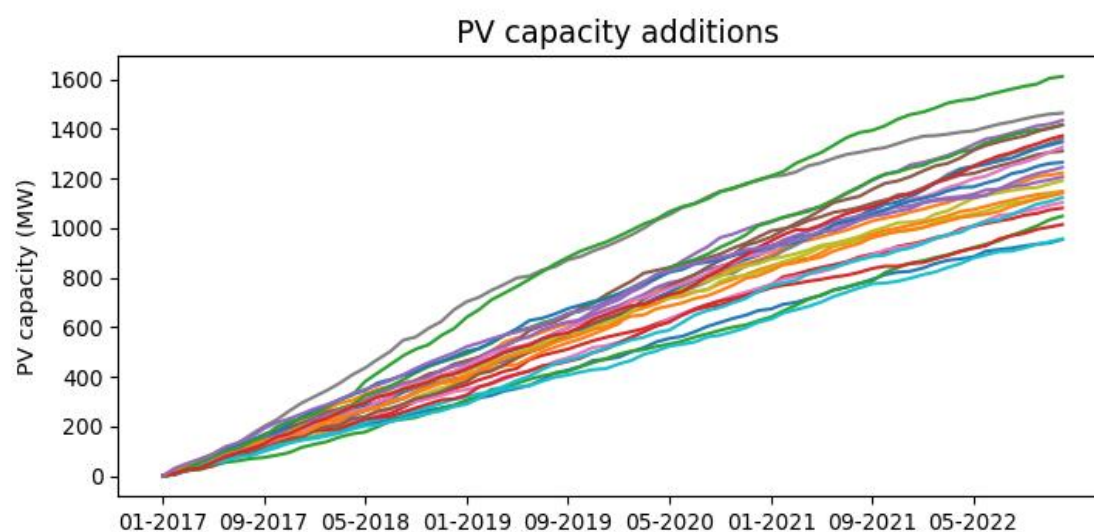
³⁷ Η παράμετρος w2_mu υποδεικνύει την παράμετρο “Installed_Base_mu”, η οποία αποτελεί παράμετρο περιγραφής της αντίστασης που παρουσιάζουν οι «πράκτορες» ως προς την επένδυση (**Πίνακας 5**).

Τα τελικά εύρη των τιμών των παραμέτρων για την μελέτη της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για την Γαλλία, αποτυπώνει ο **Πίνακας 17**.

Πίνακας 17. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για τη Γαλλία μετά τη βαθμονόμηση.

Παράμετροι	Min	Max	Κατηγορία Παραμέτρων
Initial belief_mu (shape parameter)	130	151	Αρχικές Πεποιθήσεις
Initial belief_std (shape parameter)	10	30	
Precision_mu (scale parameter)	30	50	Κοινωνική Εκμάθηση
Precision_std (scale parameter)	1,2	5	
Payback_mu (shape parameter)	7,5	9,8	Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης
Payback_std (shape parameter)	4	6,8	
Installed_Base_mu (shape parameter)	6,2	14,9	
Installed_Base_std (scale parameter)	6,1	20	
Propensity_mu (shape parameter)	33	38,5	Πιθανότητα Επένδυσης
Propensity_std (scale parameter)	10,1	20,1	
Inertia	0,1	0,3	Αδράνεια ως προς την επένδυση

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων με βάση τα τελικά εύρη τιμών που δίνει ο **Πίνακας 17**, αποτυπώνονται στο **Διάγραμμα 36**.

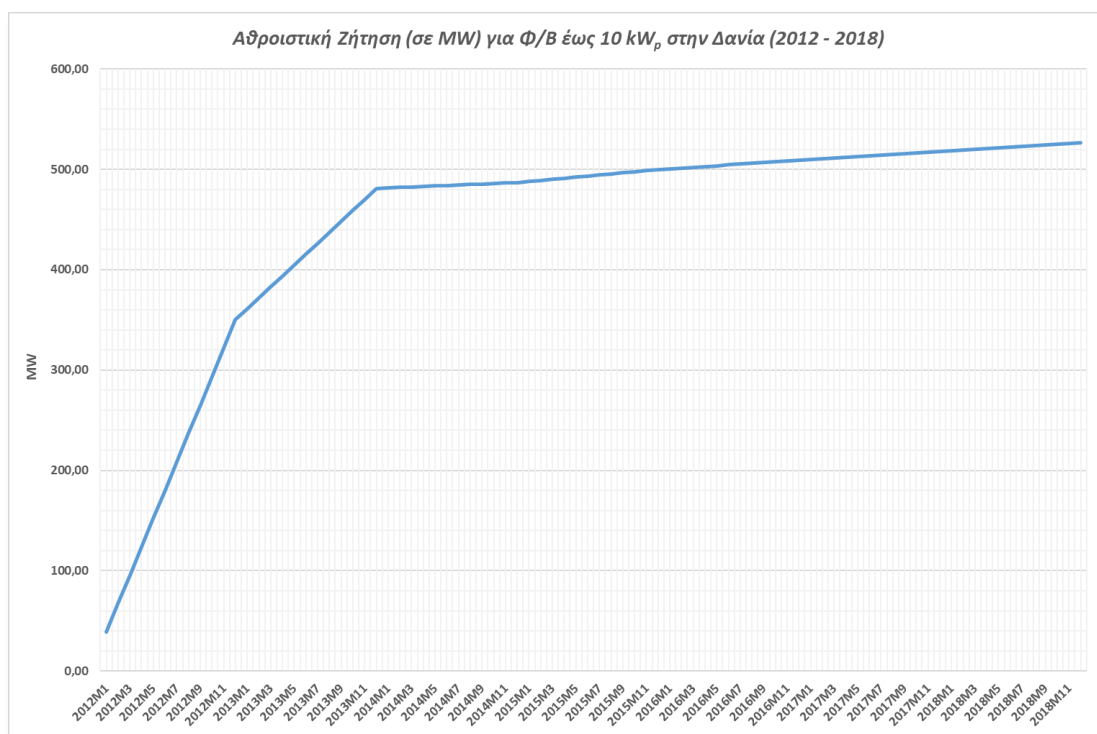


Διάγραμμα 36. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για τη Γαλλία με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων.

Όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 36**, μεγάλο ποσοστό των σεναρίων προσομοιάζει ικανοποιητικά την πραγματικότητα, αν ληφθεί υπόψιν ότι στην πραγματικότητα, η εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στο τέλος του 2022, ήταν **1.237 MW (Υποενότητα 4.3.1)**. Αυτό σημαίνει ότι η προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης (“forward-looking simulation”) της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα για τη Γαλλία, μπορεί να γίνει με βάση τα δεδομένα που αναφέρει ο **Πίνακας 17**.

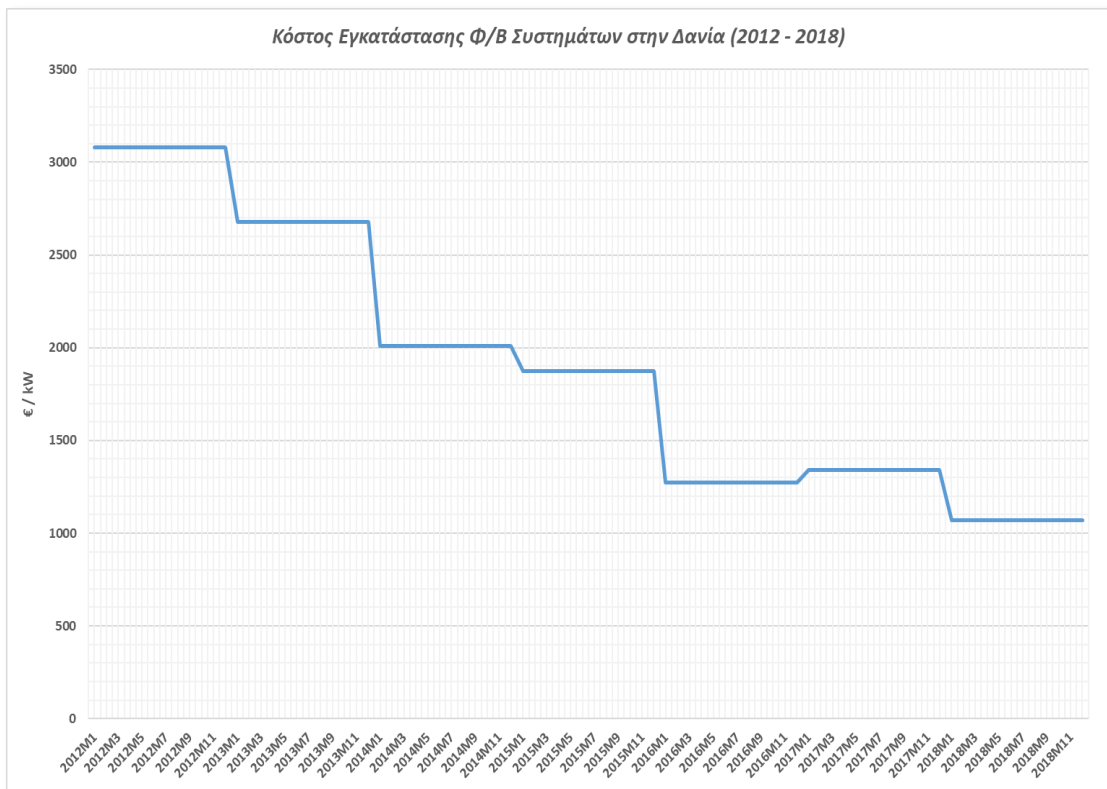
5.2. Δανία

Όπως και στην περίπτωση της Γαλλίας, έτσι και στην περίπτωση της Δανίας, τα τεχνοοικονομικά δεδομένα που εισήχθησαν ως είσοδοι (“inputs”) στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” αποτυπώνονται στα παρακάτω διαγράμματα (**Διάγραμμα 37**, **Διάγραμμα 38**, **Διάγραμμα 39**, **Διάγραμμα 40**).

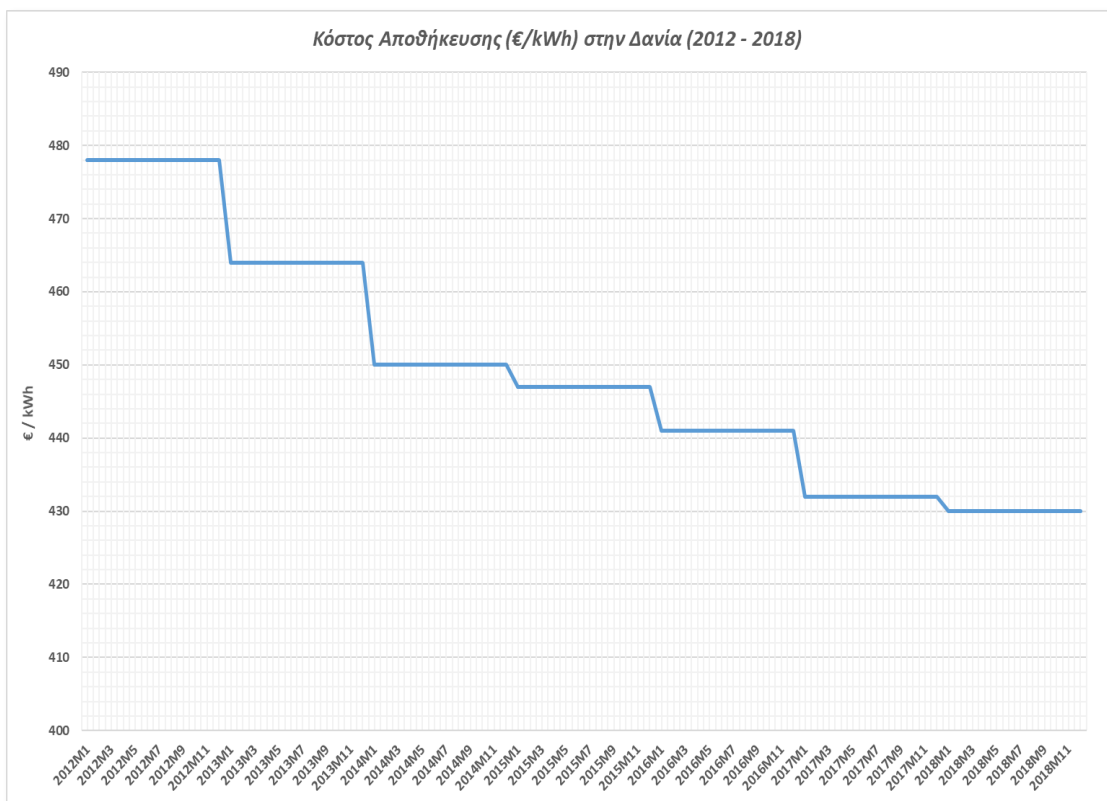


Διάγραμμα 37. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στη Δανία την περίοδο 2012-2018.

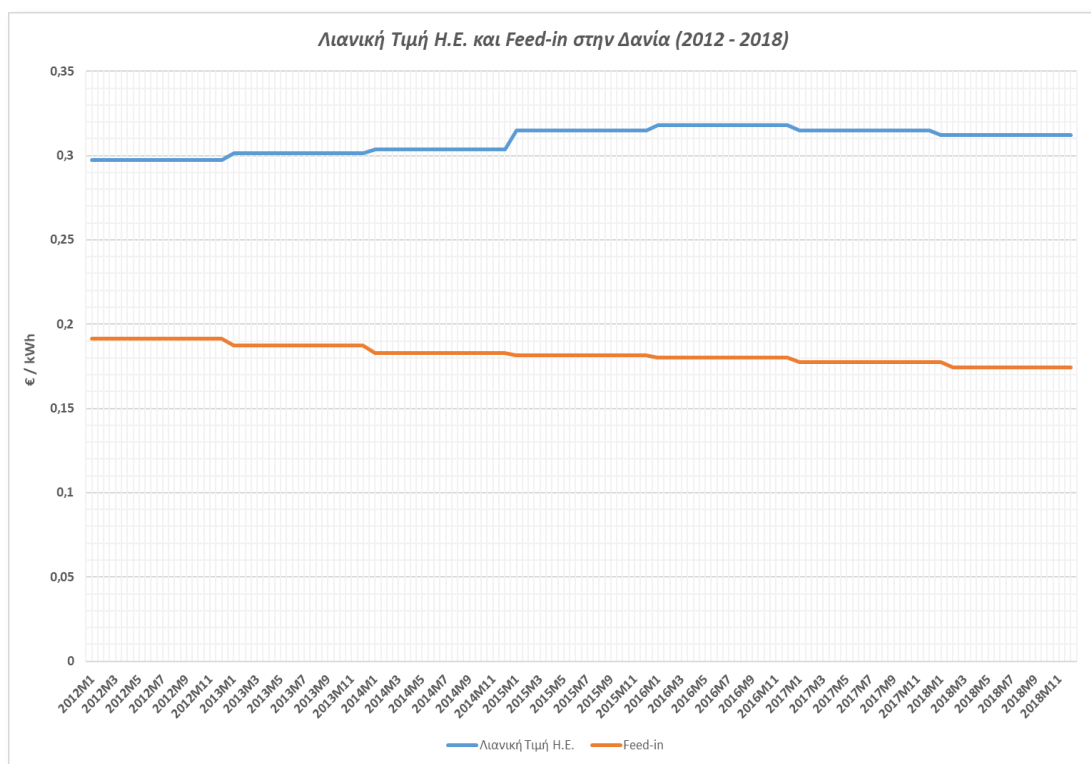
Όπως φαίνεται κι από το παραπάνω διάγραμμα (**Διάγραμμα 37**), η μεγαλύτερη ετήσια αύξηση εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Δανίας, επιτεύχθηκε την περίοδο 2012-2013 (**Υποενότητα 4.3.2**).



Διάγραμμα 38. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στη Δανία την περίοδο 2012-2018.



Διάγραμμα 39. Κόστος αποθήκευσης (ματαρίες "Li-ion") στη Δανία την περίοδο 2012-2018.

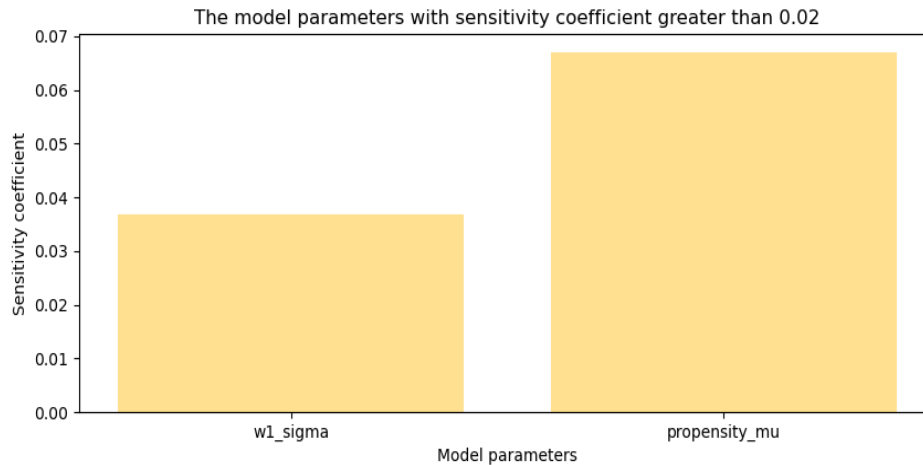


Διάγραμμα 40. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στη Δανία την περίοδο 2012-2018.

Όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το ύψος της ενίσχυσης “feed-in” είναι αρκετά χαμηλότερο από την λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα, γεγονός που σημαίνει ότι η μεγάλη αύξηση εγκαταστάσεων την περίοδο 2012-2013, οφείλεται και σε άλλα μέτρα ενίσχυσης της διάχυσης φωτοβολταϊκών που ελήφθησαν από την εκάστοτε κυβέρνηση εκείνη την περίοδο (όπως για παράδειγμα η επιβολή καθεστώτων ενεργειακής απόδοσης στον οικιακό τομέα).

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για την περίπτωση της Δανίας, η περίοδος που εφαρμόζεται είναι από την 01/01/2011 (όπου για λόγους ευκολίας θεωρείται ότι η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα είναι μηδενική - στην πραγματικότητα είναι πολύ μικρή) μέχρι 31/12/2015. Κατά την περίοδο αυτή εγκαταστάθηκαν **499,76 MW** φωτοβολταϊκής ισχύος στον οικιακό τομέα της χώρας (**Διάγραμμα 37**) και ήταν σε ισχύ σχήμα αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών με επιδότηση τύπου “feed-in”, όπως αποτυπώνεται στο **Διάγραμμα 40**.

Στο **Διάγραμμα 41** αποτυπώνεται η ανάλυση ευαισθησίας με βασικό σκοπό να προσδιοριστούν εκείνες οι παράμετροι που προκαλούν την μεγαλύτερη αβεβαιότητα στο μοντέλο (τιμή πρωτοβάθμιου συντελεστή ευαισθησίας μεγαλύτερο από **0,02**).



Διάγραμμα 41. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή > 0,02 για τη Δανία³⁸.

Τα στατιστικά μεγέθη της τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” αποτυπώνονται στην **Εικόνα 4**.

```

Stats
Coverage: 0.102438
Density: 0.895813
Mass: 0.051350
Res Dim: 7.000000
Mean: 0.895813
Limits
      min      max      qp values
0 -1.689099 -1.322496 3.210758e-57
8 -0.844299 -0.470917 2.770412e-43
6 -0.537559  0.160317 4.911159e-33
4 -1.116661 -0.213345 1.597536e-19
5 -0.851647  1.733260 5.695445e-06
9 -1.603280  1.039376 1.455399e-01
7 -1.559855  1.604279 2.183019e-01

```

Εικόνα 4. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για τη Δανία.

Η ανάλυση ευαισθησίας καταδεικνύει τις παραμέτρους που ευθύνονται για την αβεβαιότητα του μοντέλου ως εξής:

- Τυπική απόκλιση της αναμενόμενης περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης (“Payback_std”).
- Μέση τιμή βάρους της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή κατοφλίου κάθε οντότητας για την πιθανότητα υλοποίησης της επένδυσης (“Propensity_mu”).

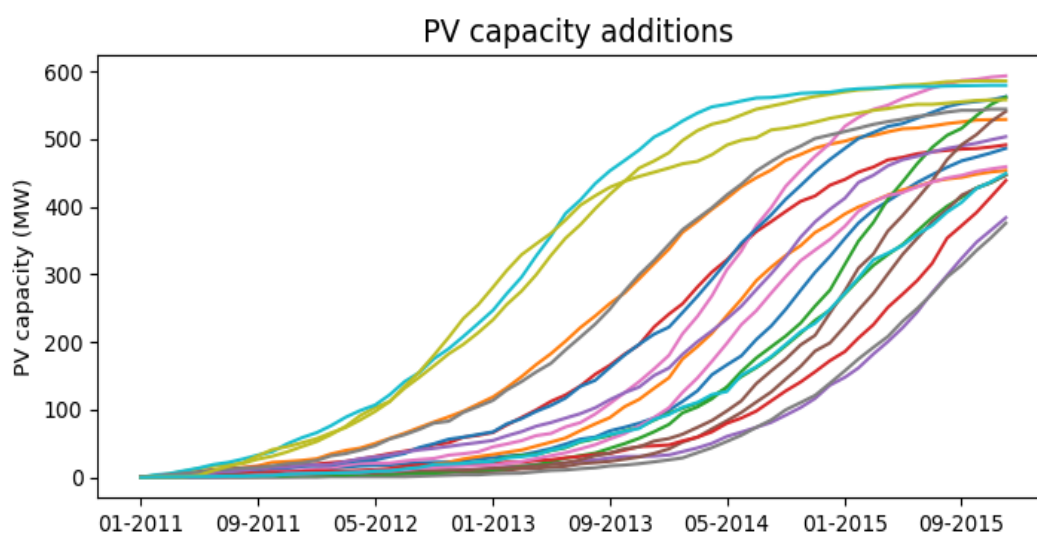
Τα τελικά εύρη των τιμών των παραμέτρων για την μελέτη της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για την Δανία, αποτυπώνει ο **Πίνακας 18**.

³⁸ Η παράμετρος “w1_sigma” υποδεικνύει την παράμετρο “Payback_std”, η οποία αποτελεί παράμετρο περιγραφής της αντίστασης που παρουσιάζουν οι «πράκτορες» ως προς την επένδυση (**Πίνακας 5**).

Πίνακας 18. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για τη Δανία μετά την βαθμονόμηση.

Παράμετροι	Min	Max	Κατηγορία Παραμέτρων
Initial belief_mu (shape parameter)	56	68	Αρχικές Πειποιθήσεις
Initial belief_std (shape parameter)	15	25	
Precision_mu (scale parameter)	39	45	Κοινωνική Εκμάθηση
Precision_std (scale parameter)	3	8	
Payback_mu (shape parameter)	1,9	3,1	Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης
Payback_std (shape parameter)	0,2	0,9	
Installed_Base_mu (shape parameter)	20,7	22,6	
Installed_Base_std (scale parameter)	5	12	
Propensity_mu (shape parameter)	29	30,5	Πιθανότητα Επένδυσης
Propensity_std (scale parameter)	6	12	
Inertia	0,1	0,3	Αδράνεια ως προς την επένδυση

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την περίπτωση της Δανίας, με βάση τα τελικά εύρη τιμών που αναφέρει ο **Πίνακας 18**, αποτυπώνονται στο **Διάγραμμα 42**.



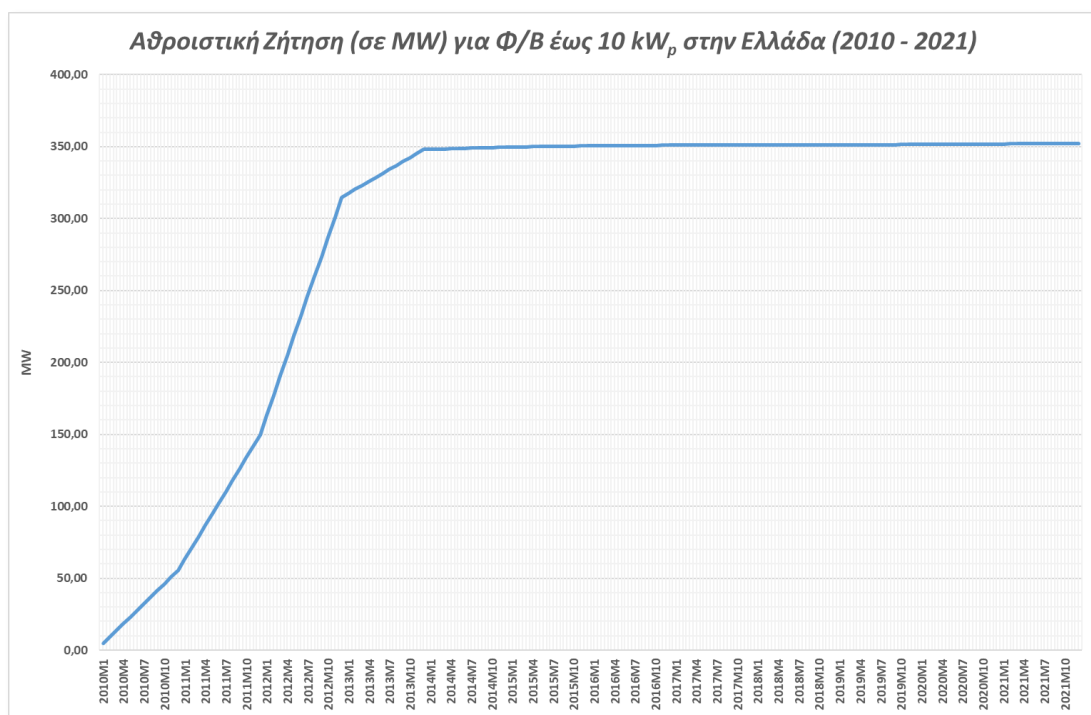
Διάγραμμα 42. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για τη Δανία με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων.

Σε αντίθεση με την περίπτωση της Γαλλίας, όπου η διασπορά των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης των 25 σεναρίων είναι μικρότερη, στην περίπτωση της Δανίας παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά μεταξύ των σεναρίων. Όσον αφορά το κατά πόσο τα αποτελέσματα

αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα, στο **Διάγραμμα 42** διακρίνεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των σεναρίων κυμαίνεται μεταξύ **410-580 MW**, γεγονός που αποδίδει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα, δεδομένου ότι στην πραγματικότητα, όπως προαναφέρθηκε, την περίοδο 2011-2015 προστέθηκαν περίπου **500 MW** εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας. Συνεπώς, η προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης (“forward-looking simulation”) της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα για τη Δανία, είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί με βάση τα δεδομένα που αναφέρει ο **Πίνακας 18**.

5.3. Ελλάδα

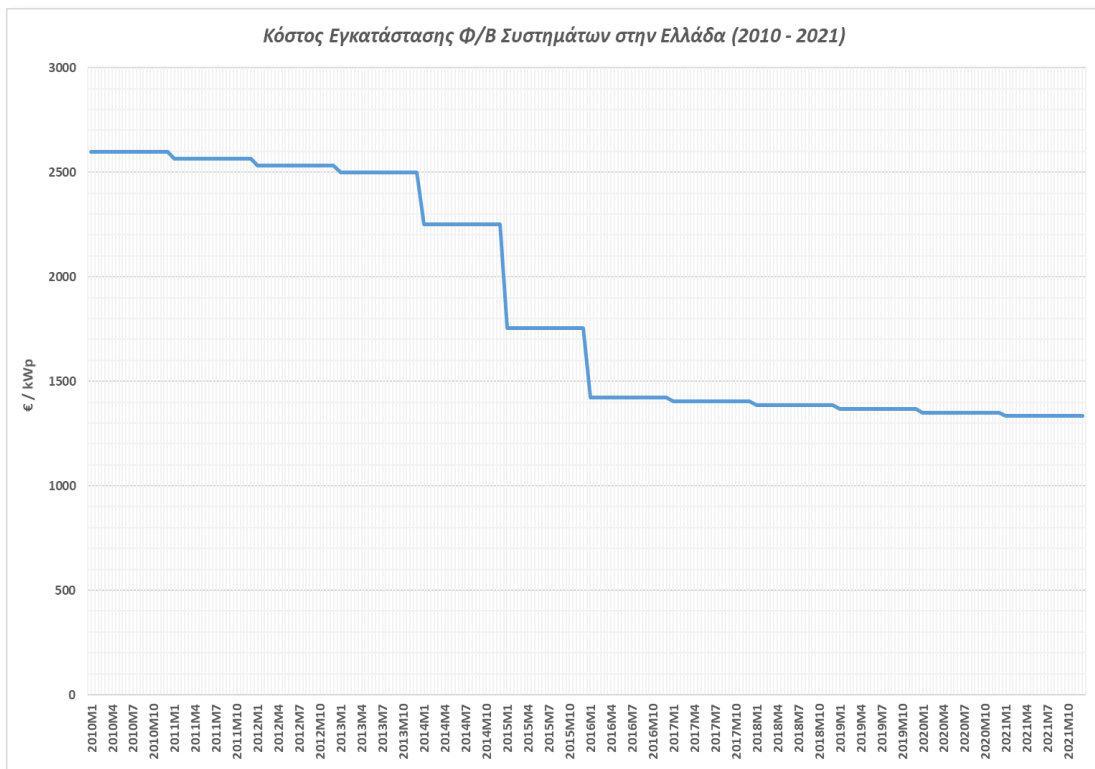
Στην **Ενότητα 5.3** παρουσιάζονται τα τεχνοοικονομικά δεδομένα, τα οποία εισήχθησαν ως είσοδο (“inputs”) στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” για την βαθμονόμησή του. Στα πλαίσια της περιγραφής των δεδομένων, γίνεται διαγραμματική απεικόνιση με χρονικό ορίζοντα το 2021. Ωστόσο, για την βαθμονόμηση του μοντέλου, εισάγονται στο μοντέλο τα δεδομένα της περιόδου 2010-2013, όπου σημειώθηκε η μεγαλύτερη διάχυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών στέγης στον οικιακό τομέα της χώρας (*Stavrakas & Flamos, 2022*). Τα τεχνοοικονομικά δεδομένα της χώρας αποτυπώνονται στα παρακάτω διαγράμματα (**Διάγραμμα 43, Διάγραμμα 44, Διάγραμμα 45, Διάγραμμα 46**).



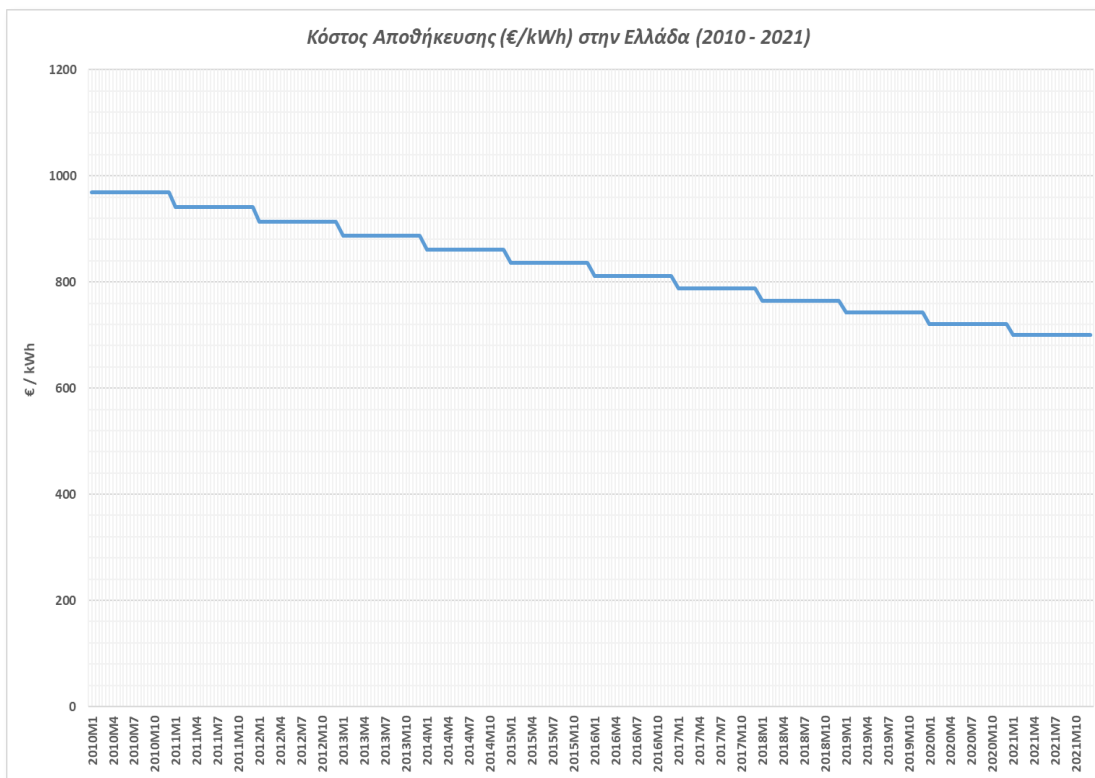
Διάγραμμα 43. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στην Ελλάδα την περίοδο 2010-2021. Πηγή: ΔΑΠΕΕΠ, 2023.

Όπως αποτυπώθηκε στο **Διάγραμμα 43**, η μεγαλύτερη διάχυση φωτοβολταϊκών μικρότερων ή ίσων των 10 kW_p επετεύχθη την περίοδο 2010-2013, ήταν ίση με **348 MW** και το πλήθος των αιτήσεων ανερχόταν σε **38.076** (*Anagnostopoulos et al., 2017; DAPEEP, 2022*). Επισημαίνεται ότι το 2022 η εγκατεστημένη ισχύς ήταν **352,3 MW** (**Υποενότητα 4.3.3**).

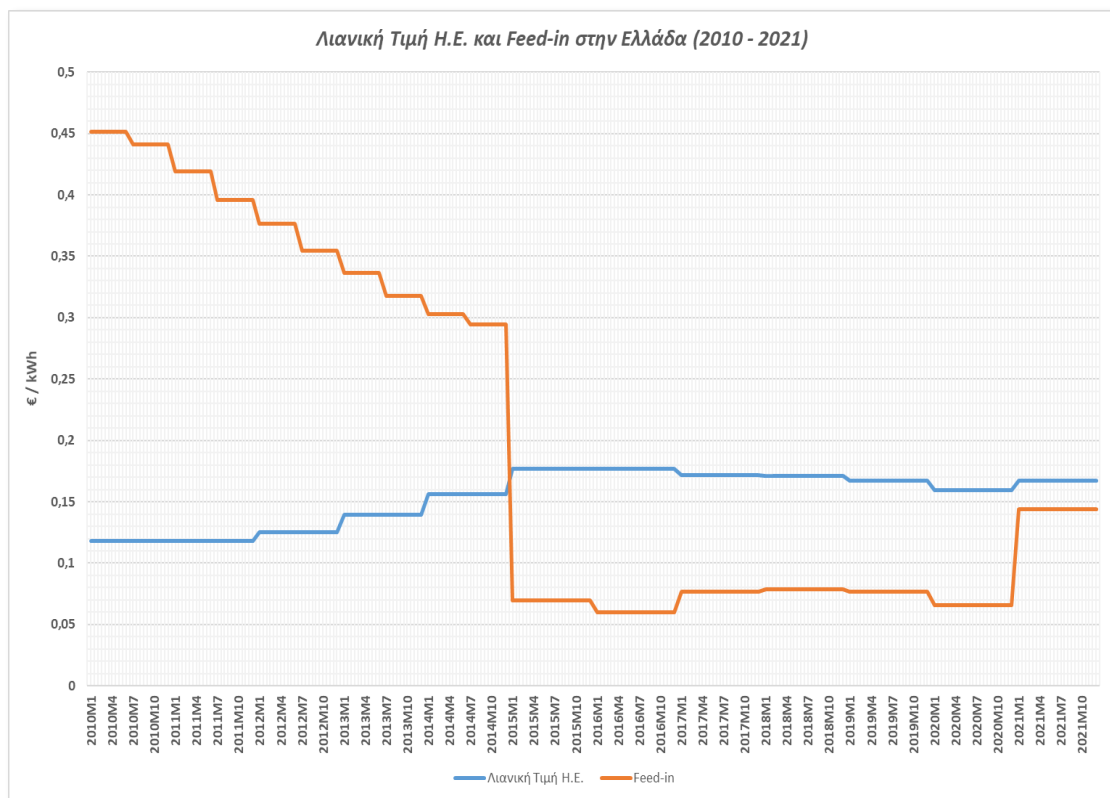
Το κόστος εγκατάστασης (**Διάγραμμα 44**), το κόστος αποθήκευσης (**Διάγραμμα 45**) και η σύγκριση μεταξύ λιανικής τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας και επιδότησης “feed-in” (**Διάγραμμα 46**), περιγράφεται ακριβώς παρακάτω.



Διάγραμμα 44. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα την περίοδο 2010-2021.



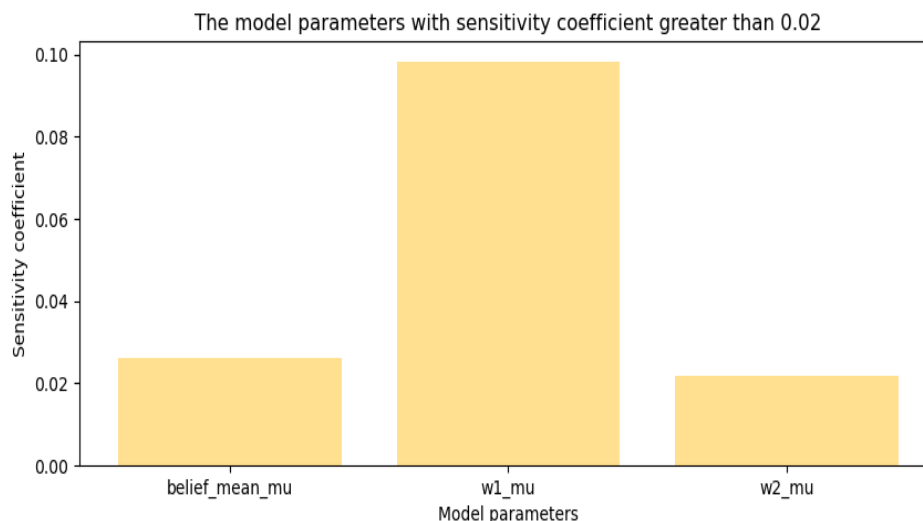
Διάγραμμα 45. Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίες “li-ion”) στην Ελλάδα την περίοδο 2010-2021.



Διάγραμμα 46. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στην Ελλάδα την περίοδο 2010-2021.

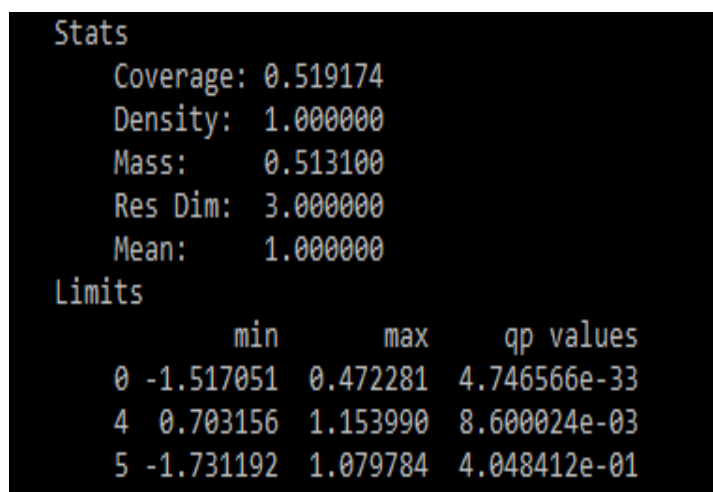
Από το **Διάγραμμα 46** γίνεται σαφές ότι έως το 2014 το “feed-in tariff” που ήταν σε ισχύ ήταν πολύ υψηλό, με αποτέλεσμα να μην είναι βιώσιμο για την χώρα. Από το 2015 και μετά παρατηρείται πτώση στο “feed-in”, λόγω της αντικατάστασης της σταθερής τιμής αποζημίωσης με μια “premium” τιμή (**Υποενότητα 4.2.3**), η οποία βασίστηκε στην οριακή τιμή συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω, για την βαθμονόμηση του μοντέλου θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα που ήταν σε ισχύ έως το 2013, περίοδος την οποία ήταν σε ισχύ το πολύ υψηλό “feed-in tariff” (μεγαλύτερο από **300 €/MWh**).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας από την βαθμονόμηση του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” και πιο συγκεκριμένα οι παράμετροι με τιμή συντελεστή ευαισθησίας μεγαλύτερο από **0,02**, αποτυπώνονται στο **Διάγραμμα 47**.



Διάγραμμα 47. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή $> 0,02$ για την Ελλάδα³⁹⁴⁰. Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.

Τα στατιστικά μεγέθη της τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” αποτυπώνονται στην **Εικόνα 5**.



Εικόνα 5. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για την Ελλάδα. Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.

Η ανάλυση ευαισθησίας για την περίπτωση της Ελλάδας, καταδεικνύει ως υπεύθυνες για την αβεβαιότητα του μοντέλου, τις παρακάτω παραμέτρους:

- Μέση τιμή βάρους της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή των αναμενόμενων ετήσιων καθαρών ταμειακών ροών μ^{CF} (“Initial Belief_mu”).
- Μέση τιμή βάρους της αναμενόμενης περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης (“Payback_mu”).
- Μέση τιμή βάρους αναμενόμενου μεγέθους εγκατεστημένης βάσης (“Installed_Base_mu”).

³⁹ Η παράμετρος “w1_mu” υποδεικνύει την παράμετρο “Payback_mu”, η οποία αποτελεί παράμετρο περιγραφής της αντίστασης που παρουσιάζουν οι «πράκτορες» ως προς την επένδυση (**Πίνακας 5**).

⁴⁰ Η παράμετρος “w2_mu” υποδεικνύει την παράμετρο “Installed_Base_mu”, η οποία αποτελεί παράμετρο περιγραφής της αντίστασης που παρουσιάζουν οι «πράκτορες» ως προς την επένδυση (**Πίνακας 5**).

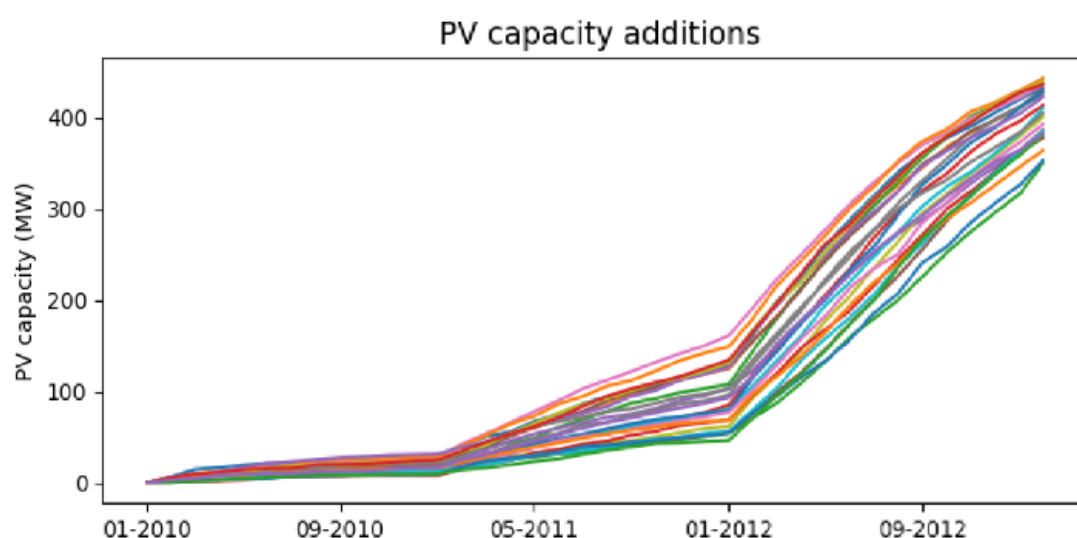
Ο Πίνακας 19, αποτυπώνει τα τελικά εύρη των τιμών των παραμέτρων για την μελέτη της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για την Ελλάδα:

Πίνακας 19. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για την Ελλάδα μετά την βαθμονόμηση.

Παράμετροι	Min	Max	Κατηγορία Παραμέτρων
Initial belief_mu (shape parameter)	50	130	Αρχικές Πεποιθήσεις
Initial belief_std (shape parameter)	1,8	19	
Precision_mu (scale parameter)	7	26	Κοινωνική Εκμάθηση
Precision_std (scale parameter)	0	5	
Payback_mu (shape parameter)	4,3	4,5	Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης
Payback_std (shape parameter)	1,1	1,5	
Installed_Base_mu (shape parameter)	10	13,5	
Installed_Base_std (scale parameter)	1	2	
Propensity_mu (shape parameter)	36,4	39,5	Πιθανότητα Επένδυσης
Propensity_std (scale parameter)	1,8	7,8	
Inertia	0,1	0,3	Αδράνεια ως προς την επένδυση

Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.

Στο Διάγραμμα 48, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση 25 διαφορετικών σεναρίων για την Ελλάδα, βάσει των τελικών ευρών τιμών που αναφέρει ο Πίνακας 19.

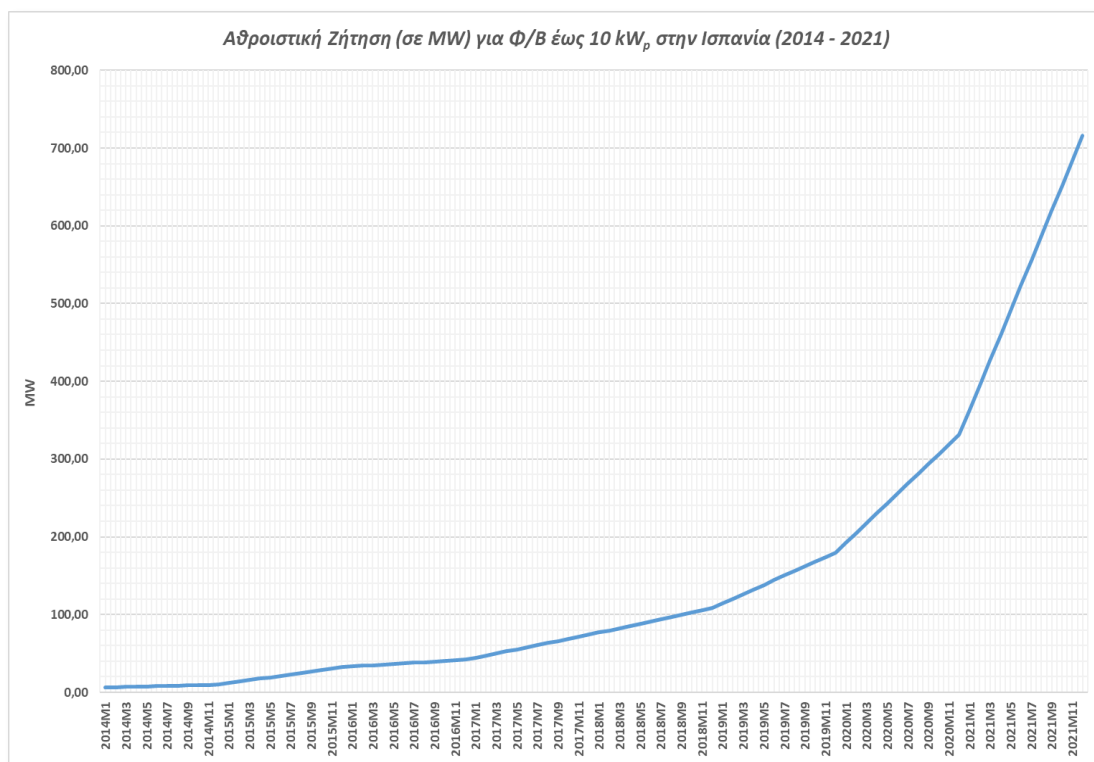


Διάγραμμα 48. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την Ελλάδα με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων. Πηγή: Stavrakas & Flamos, 2022.

Εν αντιθέσει με την περίπτωση της Δανίας (**Διάγραμμα 42**), όπου η παρατηρούμενη διασπορά μεταξύ των σεναρίων είναι μεγάλη, στην περίπτωση της Ελλάδας παρατηρείται μικρή διασπορά μεταξύ των 25 διαφορετικών σεναρίων, η οποία υποστηρίζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου για την προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα. Μάλιστα, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για την περίπτωση της Ελλάδας, προσομοιάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα, αφού όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 48**, τα σεναρία κυμαίνονται μεταξύ **310-410 MW**, ενώ είναι γνωστό ότι στην πραγματικότητα, εκείνη την περίοδο εγκαταστάθηκαν **348 MW** (όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο). Επομένως, η μελέτη μπορεί να στηριχθεί σε αυτά τα τεchnοοικονομικά δεδομένα, για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης (“forward-looking simulation”) της διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της χώρας.

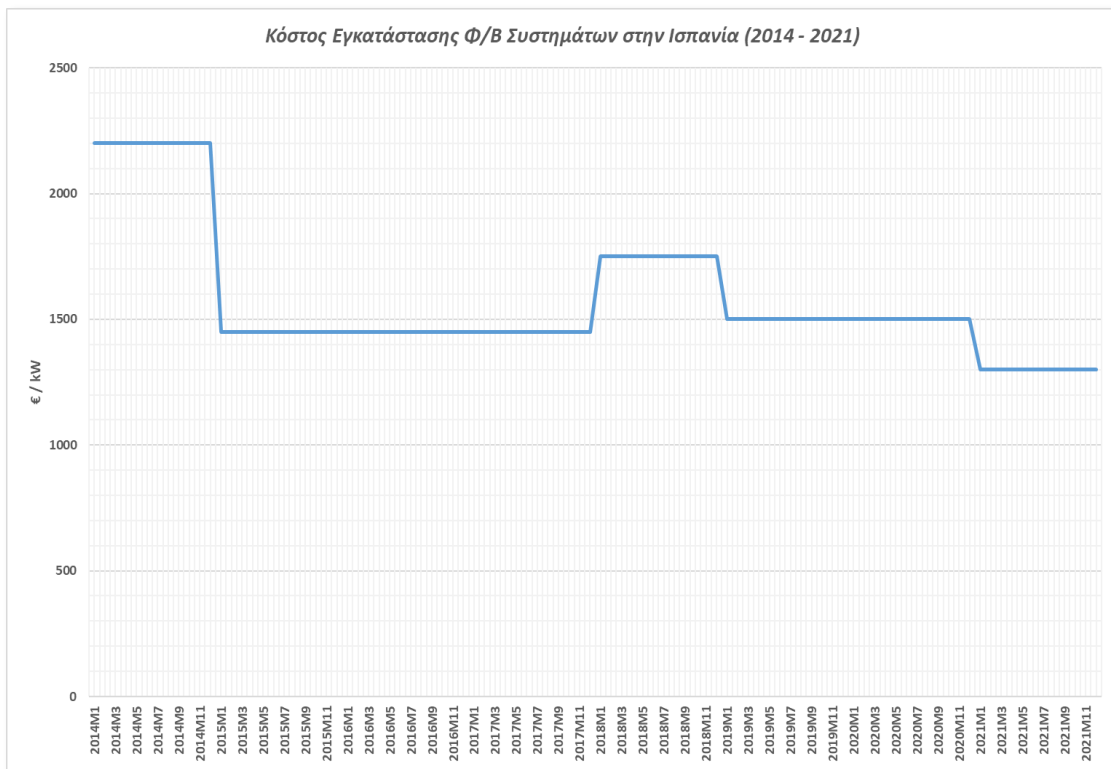
5.4. Ισπανία

Τα τεchnοοικονομικά δεδομένα που εισήχθησαν ως είσοδοι στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” με στόχο την βαθμονόμησή του για την περίπτωση της Ισπανίας, αποτυπώνονται στα παρακάτω διαγράμματα (**Διάγραμμα 49**, **Διάγραμμα 50**, **Διάγραμμα 51**, **Διάγραμμα 52**).

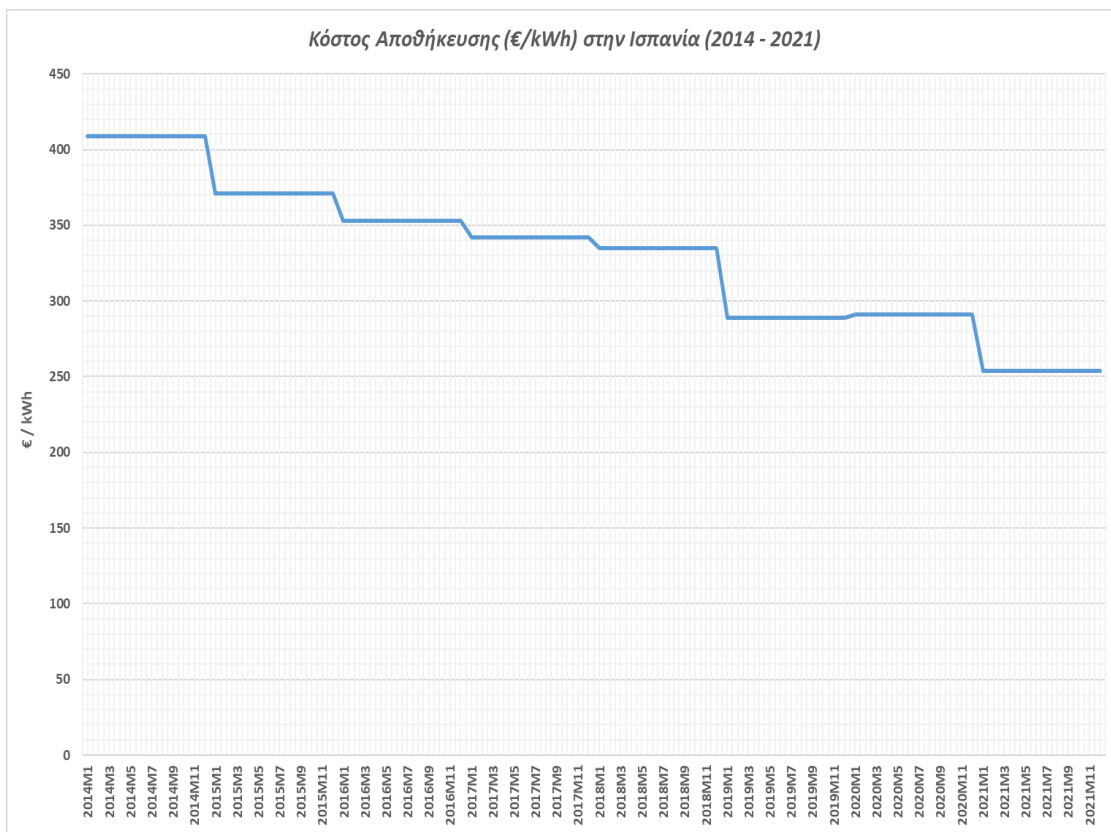


Διάγραμμα 49. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στην Ισπανία την περίοδο 2014-2021.

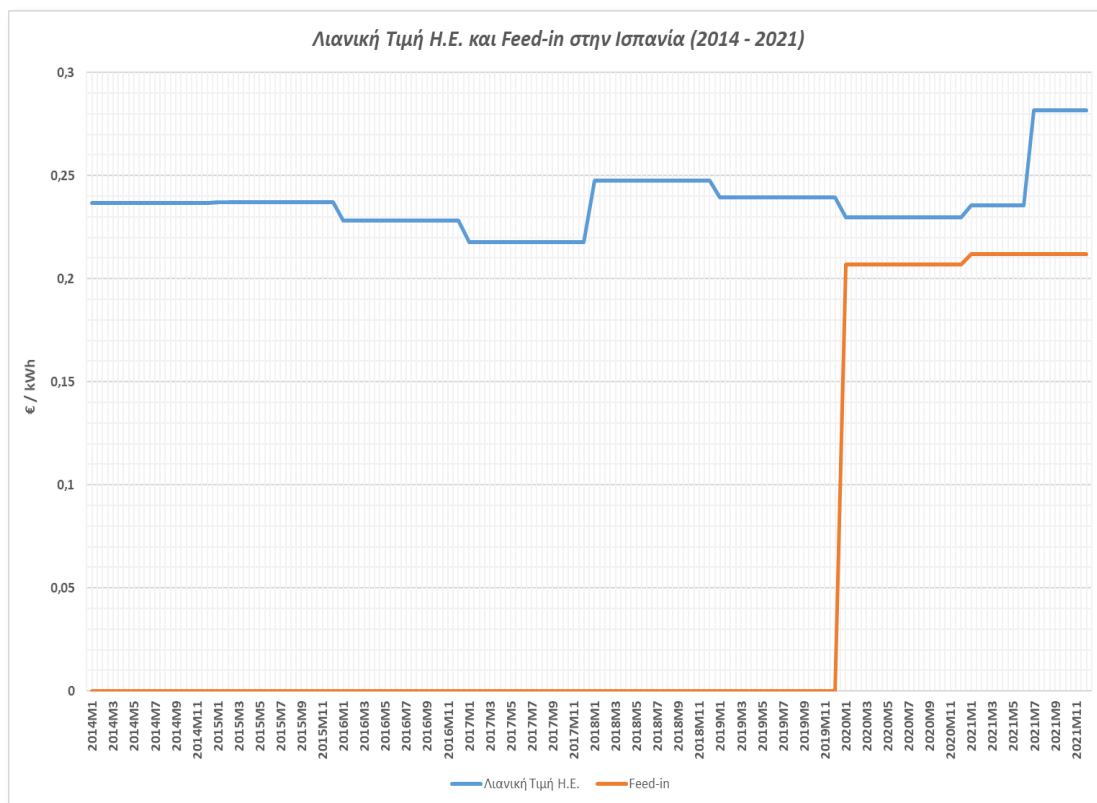
Σε αντίθεση με την περίπτωση της Δανίας, η μεγαλύτερη διάχυση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της χώρας, παρατηρείται την περίοδο 2020-2021, όπου η χώρα εφάρμοσε για πρώτη φορά σχήμα αποζημίωσης των ιδιοκαταναλωτών με επιδότηση τύπου “feed-in premium” (**Υποενότητα 4.2.4**).



Διάγραμμα 50. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στην Ισπανία την περίοδο 2014-2021.



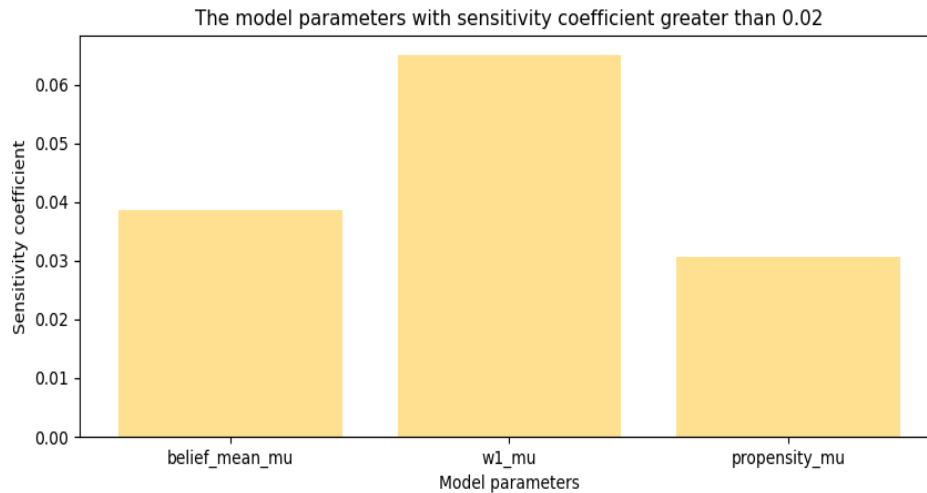
Διάγραμμα 51. Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίες “li-ion”) στην Ισπανία την περίοδο 2014-2021.



Διάγραμμα 52. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στην Ισπανία την περίοδο 2014-2021.

Από το **Διάγραμμα 52** γίνεται εμφανές ότι το ύψος της επιδότησης με την μορφή “feed-in” στην Ισπανία μέχρι και το τέλος του 2021 ήταν χαμηλότερο από την αντίστοιχη λιανική τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας (τιμή που καλούνταν να καταβάλουν τα νοικοκυριά της χώρας για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας).

Σχετικά με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας από την βαθμονόμηση του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”, οι παράμετροι με τιμή συντελεστή ευαισθησίας μεγαλύτερο από **0,02** αποτυπώνονται στο **Διάγραμμα 53**. Ενώ παράλληλα σημειώνεται ότι η προσομοιωμένη περίοδος για την εφαρμογή της βαθμονόμησης είναι από 01/01/2017 έως και 31/12/2021. Επισημαίνεται ότι κατά την προσομοιωμένη περίοδο, εγκαταστάθηκαν **671,49 MW** φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ισπανίας με το σχήμα επιδότησης τύπου “feed-in” να είναι ενεργό από το 2019, όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω.



Διάγραμμα 53. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή $> 0,02$ για την Ισπανία⁴¹.

Τα στατιστικά μεγέθη της τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” αποτυπώνονται στην **Εικόνα 6**.

```

Stats
Coverage: 0.571256
Density: 1.000000
Mass: 0.568600
Res Dim: 4.000000
Mean: 1.000000

Limits
      min      max      qp values
4 -0.570812 -0.018236 1.874423e-16
7 -1.403238  1.565408 2.475577e-03
0 -1.733280 -1.346301 1.496036e-01
8 -1.683150 -0.744640 3.867402e-01

```

Εικόνα 6. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για την Ισπανία.

Οι παράμετροι που καταδεικνύονται ως υπεύθυνες για την αβεβαιότητα του μοντέλου μέσα από την ανάλυση ευαισθησίας, είναι οι εξής:

- Μέση τιμή βάρους της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή των αναμενόμενων ετήσιων καθαρών ταμειακών ροών μ^{CF} (“Initial Belief_mu”).
- Μέση τιμή βάρους της αναμενόμενης περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης (“Payback_mu”).
- Μέση τιμή βάρους της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή κατωφλίου κάθε οντότητας για την πιθανότητα υλοποίησης της επένδυσης (“Propensity_mu”).

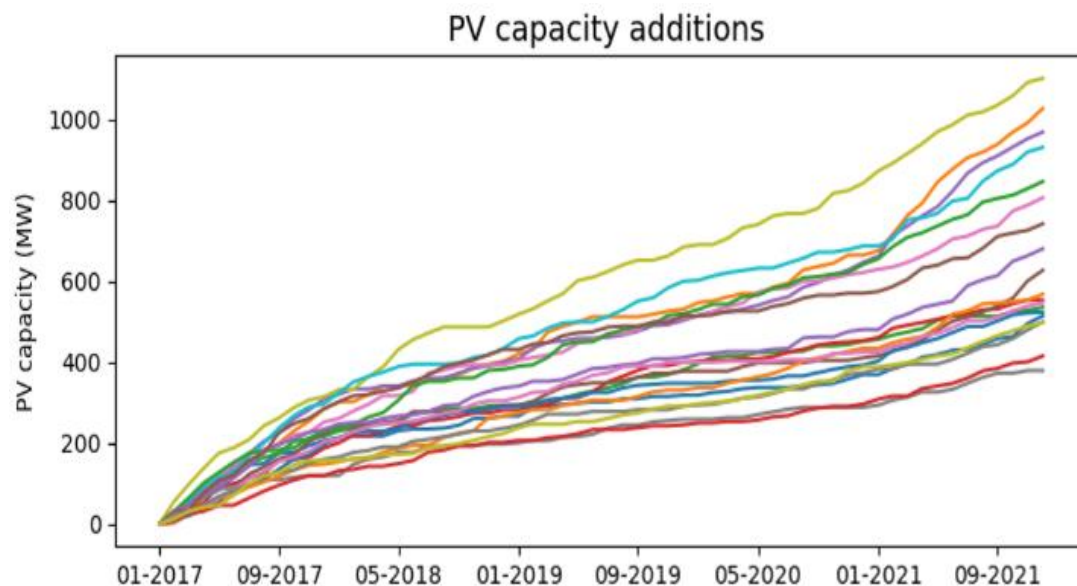
Τα τελικά εύρη των τιμών των παραμέτρων για την μελέτη της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για την Ισπανία, αναφέρει ο **Πίνακας 20**.

⁴¹ Η παράμετρος “w1_mu” υποδεικνύει την παράμετρο “Payback_mu”, η οποία αποτελεί παράμετρο περιγραφής της αντίστασης που παρουσιάζουν οι «πράκτορες» ως προς την επένδυση (**Πίνακας 5**).

Πίνακας 20. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για την Ισπανία μετά την βαθμονόμηση.

Παράμετροι	Min	Max	Κατηγορία Παραμέτρων
Initial belief_mu (shape parameter)	70	82	Αρχικές Πεποιθήσεις
Initial belief_std (shape parameter)	10	19	
Precision_mu (scale parameter)	30	50	Κοινωνική Εκμάθηση
Precision_std (scale parameter)	1	5	
Payback_mu (shape parameter)	3,4	5	Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης
Payback_std (shape parameter)	1	2,9	
Installed_Base_mu (shape parameter)	20,5	25	
Installed_Base_std (scale parameter)	2,8	19	
Propensity_mu (shape parameter)	20,4	28,6	Πιθανότητα Επένδυσης
Propensity_std (scale parameter)	5,1	13	
Inertia	0,1	0,3	Αδράνεια ως προς την επένδυση

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την Ισπανία, με βάση τα τελικά εύρη τιμών που δίνει ο Πίνακας 20, επισημαίνονται στο Διάγραμμα 54.



Διάγραμμα 54. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την Ισπανία με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων.

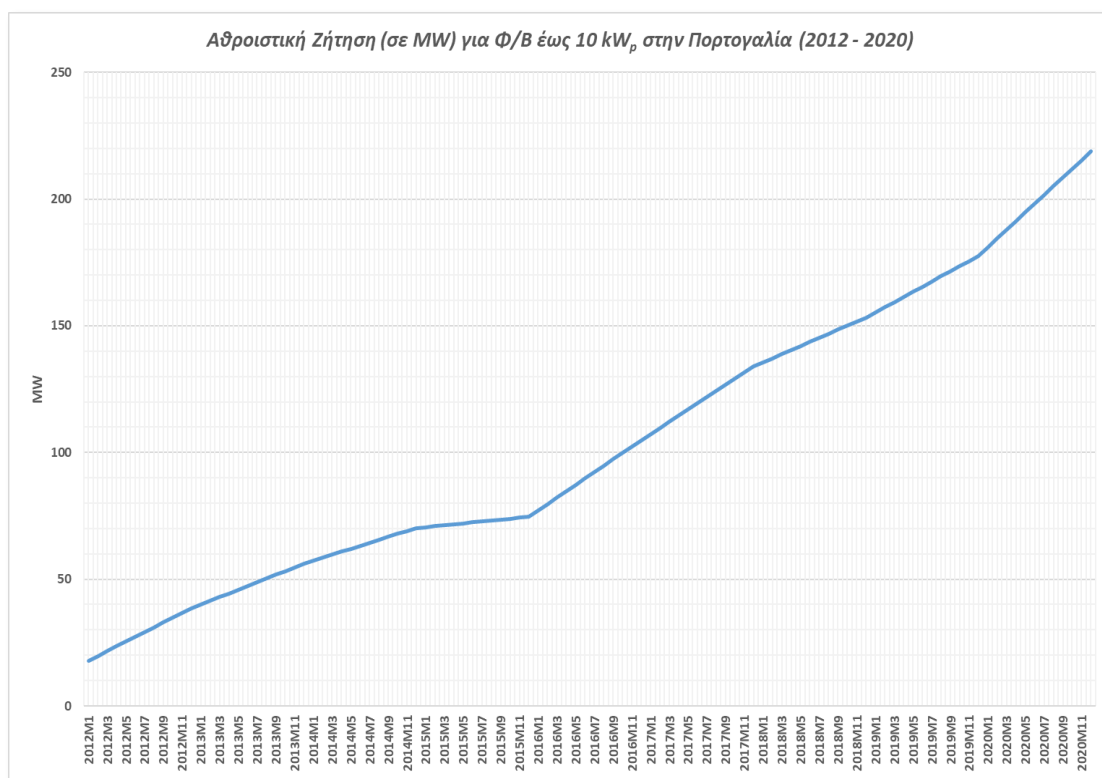
Όπως και στην περίπτωση της Δανίας (Διάγραμμα 42), έτσι και στην περίπτωση της Ισπανίας ως υπό μελέτη κράτος μέλος της ΕΕ, παρατηρείται μεγάλη διασπορά μεταξύ των σεναρίων (ακόμη μεγαλύτερη σε σύγκριση με την Δανία). Σχετικά με τον βαθμό στον οποίο η

προσομοίωση αντιπροσωπεύει αποτελεσματικά την πραγματικότητα, από το **Διάγραμμα 54** γίνεται σαφές ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των σεναρίων κυμαίνεται μεταξύ **400-800 MW**, το οποίο καταδεικνύει την μεγάλη διασπορά που υπάρχει μεταξύ των σεναρίων. Ωστόσο, το γεγονός ότι στην πραγματικότητα εκείνη την περίοδο προστέθηκαν περίπου **671,5 MW** (βλ. προηγούμενη παράγραφο), επιτρέπει να συνεχιστεί η διαδικασία της προσομοίωσης σεναρίων διαφορετικών σχημάτων πολιτικής για την εξαγωγή προβλέψεων (“forward-looking simulation”) με βάση τα εύρη τιμών των παραμέτρων που αναφέρει ο **Πίνακας 20**.

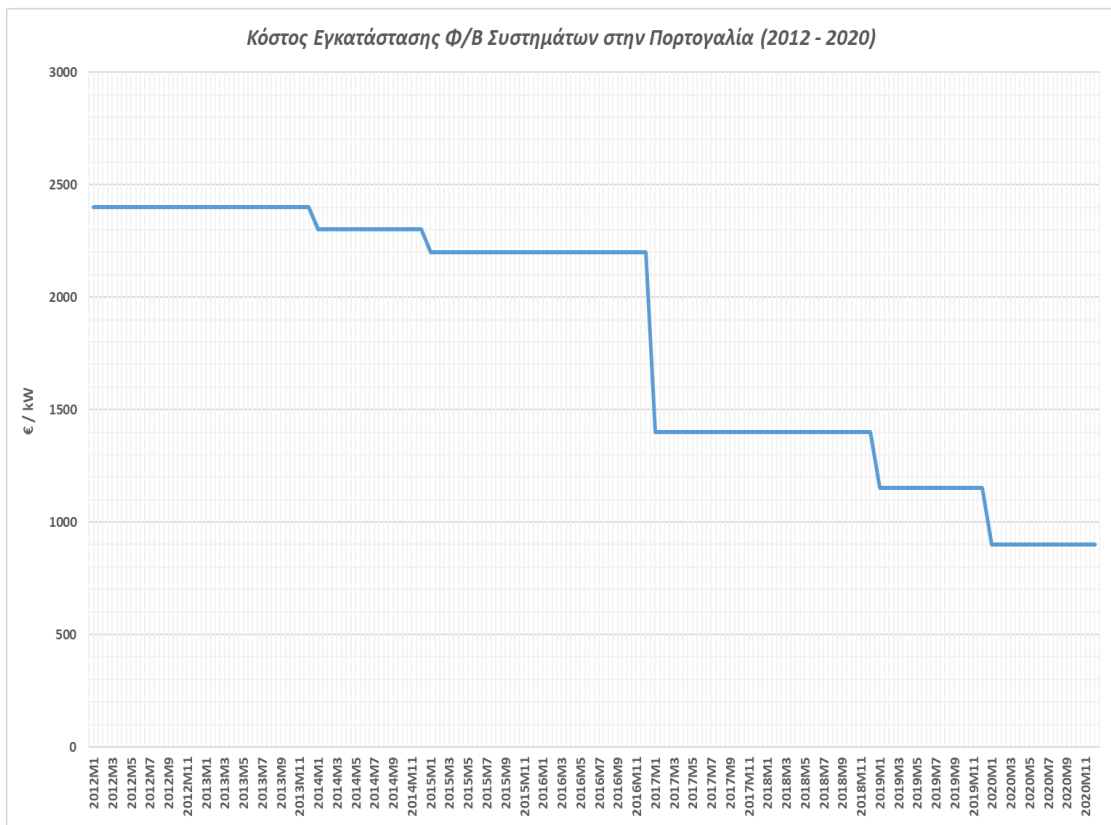
Σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις μεγάλης διασποράς μεταξύ των σεναρίων της βαθμονόμησης του μοντέλου, οι προσομοιώσεις για το μέλλον θα πρέπει να πραγματοποιούνται με την απαραίτητη επιφύλαξη.

5.5. Πορτογαλία

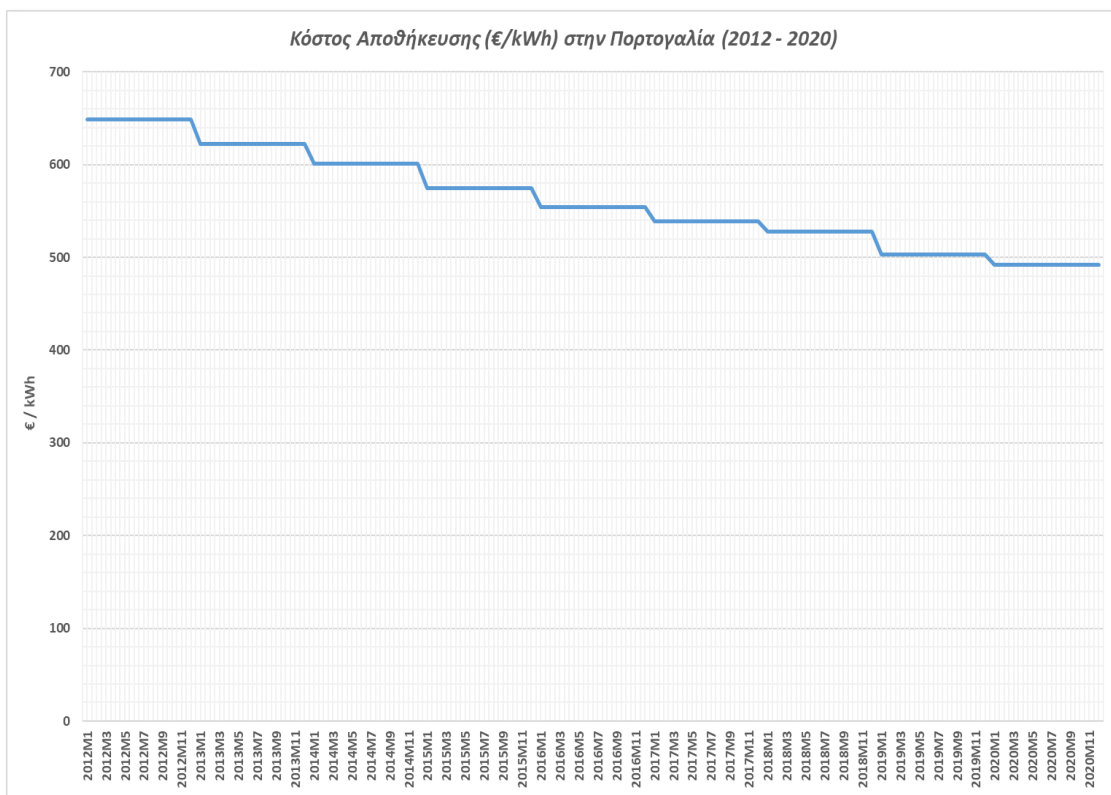
Όπως και στις περιπτώσεις της Γαλλίας, της Δανίας, της Ελλάδας και της Ισπανίας, έτσι και στην περίπτωση της Πορτογαλίας, γίνεται διαγραμματική αναφορά στα τεχνοοικονομικά δεδομένα της χώρας και πιο συγκεκριμένα στην ιστορική εξέλιξη της αθροιστικής ζήτησης σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στην χώρα (**Διάγραμμα 55**), στο κόστος εγκατάστασης (**Διάγραμμα 56**) και στο κόστος αποθήκευσης (**Διάγραμμα 57**). Επίσης, γίνεται διαγραμματική αναφορά και στην εξέλιξη της λιανικής τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας και στο ύψος του “feed-in tariff” (**Διάγραμμα 58**).



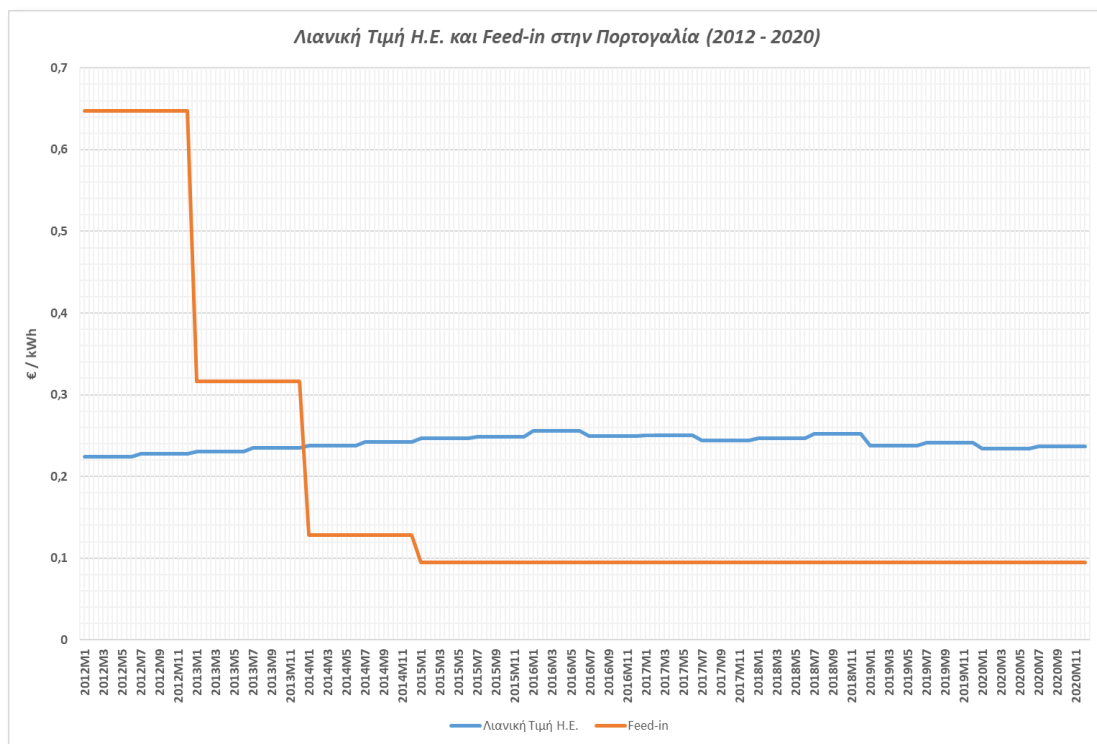
Διάγραμμα 55. Αθροιστική ζήτηση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στην Πορτογαλία την περίοδο 2012-2020.



Διάγραμμα 56. Κόστος εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων στην Πορτογαλία την περίοδο 2012-2020.



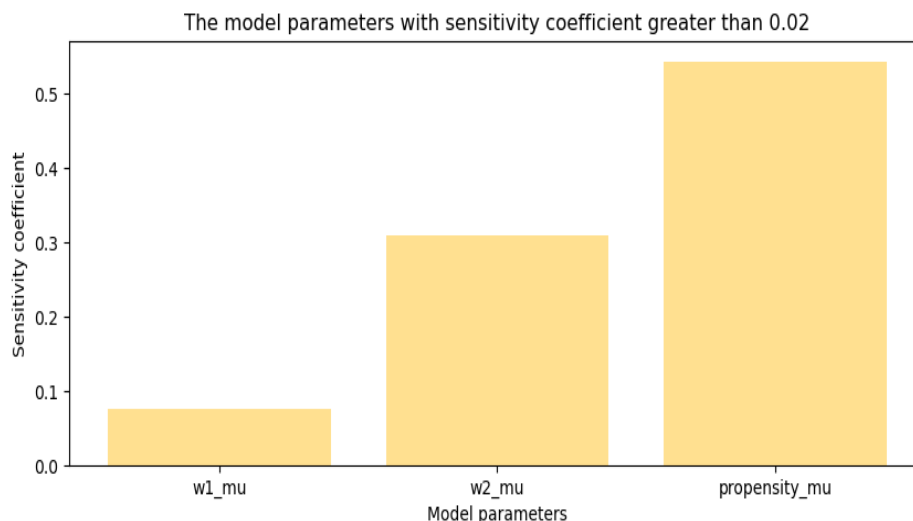
Διάγραμμα 57. Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίες “li-ion”) στην Πορτογαλία την περίοδο 2012-2020.



Διάγραμμα 58. Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και “feed-in” στην Πορτογαλία την περίοδο 2012-2020.

Από το **Διάγραμμα 58** επισημαίνεται το πολύ υψηλό ύψος της σταθερής τιμής αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών που ήταν εν ενεργεία στην χώρα την περίοδο 2012-2013 (μεγαλύτερο από **0,30 €/kWh**), ενώ μετά το 2013 παρατηρείται πτώση του ύψους της ταρίφας, το οποίο από το 2015 έως το 2020 ήταν σταθερό στα **0,095 €/kWh** (**Υποενότητα 4.3.5**). Όσον αφορά το ύψος της τιμής που καλούνταν να καταβάλλουν τα νοικοκυριά για την ηλεκτρική ενέργεια, δεν είχε μεγάλες μεταπτώσεις την περίοδο 2012-2020, με την τιμή να παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση το πρώτο μισό του 2016 (**0,2556 €/kWh**).

Όσον αφορά την βαθμονόμηση του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”, η περίοδος που εφαρμόζεται η προσομοίωση των 25 διαφορετικών σεναρίων είναι από 01/01/2017 έως και 31/12/2020. Από την βαθμονόμηση καταδεικνύονται οι παράμετροι με συντελεστή ευαισθησίας μεγαλύτερο από **0,02** (**Διάγραμμα 59**), οι οποίες είναι υπεύθυνοι για την αβεβαιότητα του μοντέλου. Τέλος, σημειώνεται ότι κατά την παραπάνω προσομοιωμένη περίοδο, εγκαταστάθηκαν **111,46 MW** φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (μικρότερα ή ίσα από 10 kW_p) στον οικιακό τομέα της Πορτογαλίας και με βάση αυτή την εγκατεστημένη ισχύ θα γίνει η αξιολόγηση της αξιοπιστίας του μοντέλου στα πλαίσια της βαθμονόμησης αυτού.



Διάγραμμα 59. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που δείχνουν τις παραμέτρους με τιμή $> 0,02$ για την Πορτογαλία ⁴²⁴³.

Τα στατιστικά μεγέθη της τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” αποτυπώνονται στην **Εικόνα 7**.

```

Stats
Coverage: 0.235909
Density: 0.798427
Mass: 0.050850
Res Dim: 5.000000
Mean: 0.798427

Limits
      min      max      qp values
8  0.741184  1.734351  6.068374e-173
6 -0.510814  0.683550  1.374969e-67
4 -1.732661  0.457399  1.013467e-29
5 -0.759374  1.381570  4.366053e-07
0 -1.599969 -0.303282  3.864183e-02

```

Εικόνα 7. Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου “PRIM” για την Πορτογαλία.

Οι παράμετροι που καταδεικνύονται ως υπεύθυνες για την αβεβαιότητα του μοντέλου μέσα από την ανάλυση ευαισθησίας, είναι οι εξής:

- Μέση τιμή βάρους της αναμενόμενης περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης (“Payback_mu”).
- Μέση τιμή βάρους αναμενόμενου μεγέθους εγκατεστημένης βάσης (“Installed_Base_mu”).
- Μέση τιμή βάρους της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή κατωφλίου κάθε οντότητας για την πιθανότητα υλοποίησης της επένδυσης (“Propensity_mu”).

⁴² Η παράμετρος “w1_mu” υποδεικνύει την παράμετρο “Payback_mu”, η οποία αποτελεί παράμετρο περιγραφής της αντίστασης που παρουσιάζουν οι «πράκτορες» ως προς την επένδυση (**Πίνακας 5**).

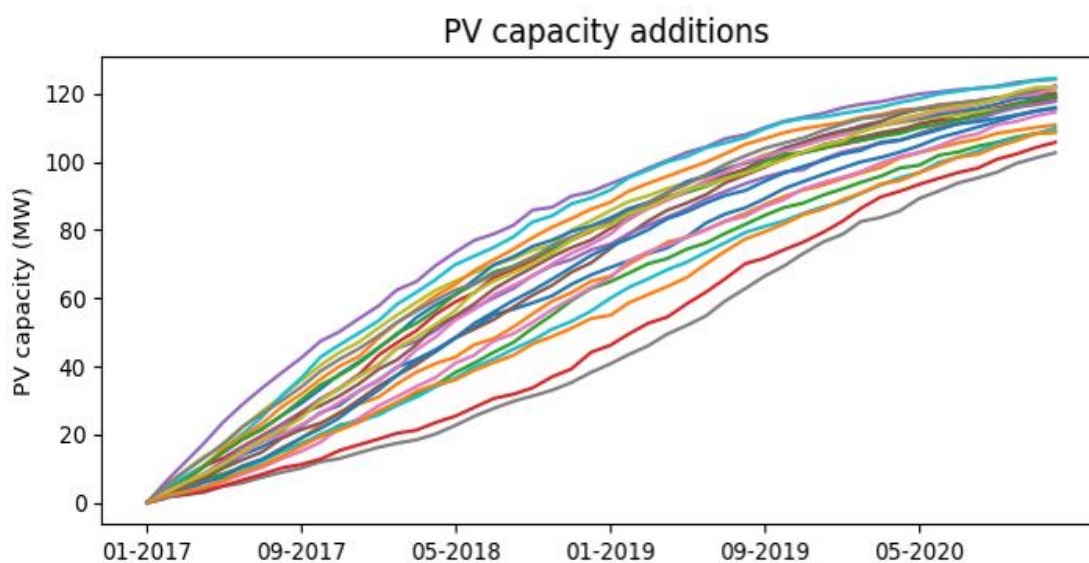
⁴³ Η παράμετρος “w2_mu” υποδεικνύει την παράμετρο “Installed_Base_mu”, η οποία αποτελεί παράμετρο περιγραφής της αντίστασης που παρουσιάζουν οι «πράκτορες» ως προς την επένδυση (**Πίνακας 5**).

Τα τελικά εύρη των τιμών των παραμέτρων για την μελέτη της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για την Πορτογαλία, επισημαίνει ο **Πίνακας 21**.

Πίνακας 21. Τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων για την Πορτογαλία μετά την βαθμονόμηση.

Παράμετροι	Min	Max	Κατηγορία Παραμέτρων
Initial belief_mu (shape parameter)	80	95	Αρχικές Πεποιθήσεις
Initial belief_std (shape parameter)	10	28	
Precision_mu (scale parameter)	31	50	Κοινωνική Εκμάθηση
Precision_std (scale parameter)	1	5	
Payback_mu (shape parameter)	2	6,4	Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης
Payback_std (shape parameter)	0,5	3	
Installed_Base_mu (shape parameter)	20,8	36,4	
Installed_Base_std (scale parameter)	1	20	
Propensity_mu (shape parameter)	41,4	50	Πιθανότητα Επένδυσης
Propensity_std (scale parameter)	5	15	
Inertia	0,1	0,3	Αδράνεια ως προς την επένδυση

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την Πορτογαλία, με βάση τα τελικά εύρη τιμών που δίνει ο **Πίνακας 21**, στα πλαίσια της βαθμονόμησης, επισημαίνονται στο **Διάγραμμα 60**.



Διάγραμμα 60. Αποτελέσματα προσομοίωσης 25 διαφορετικών σεναρίων για την Πορτογαλία με βάση τα τελικά εύρη τιμών των παραμέτρων.

Σε αντίθεση με την περίπτωση της Δανίας (**Διάγραμμα 42**) και της Ισπανίας (**Διάγραμμα 54**), όπου παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά μεταξύ των 25 προσομοιωμένων σεναρίων της βαθμονόμησης, στην περίπτωση της Πορτογαλίας παρατηρείται μεγάλη σταθερότητα με όλα τα σενάρια να συγκλίνουν μεταξύ **90-120 MW**. Δεδομένου ότι στη πραγματικότητα η εγκατεστημένη ισχύς την εν λόγω χρονική περίοδο ήταν **111,46 MW** (βλ. προηγούμενη παράγραφο), είναι εφικτό να συνεχιστεί η προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης (“forward-looking simulation”) της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα με βάση τα εύρη τιμών των παραμέτρων που προέκυψαν από την βαθμονόμηση (**Πίνακας 21**).

Κλείνοντας το **Κεφάλαιο 5**, καταδεικνύεται ότι και στις πέντε (5) περιπτώσεις των κρατών μελών της ΕΕ (δηλ. Γαλλία, Δανία, Ελλάδα, Ισπανία και Πορτογαλία), η βαθμονόμηση απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα (στην περίπτωση της Δανίας και της Ισπανίας με μεγαλύτερη διασπορά), γεγονός που καθιστά εφικτή την προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης (“forward-looking simulation”) της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα των υπό μελέτη κρατών μελών της ΕΕ. Η προσομοίωση πραγματοποιείται υπό τρία (3) διαφορετικά σενάρια (εφαρμογή αποζημίωσης αυτοπαραγωγών με επιδότηση τύπου “feed-in tariff”, εφαρμογή σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”) και εφαρμογή σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού με αποθήκευση ενέργειας (“net metering” με “BESS”)) μόνο για την Ελλάδα, στο **Κεφάλαιο 6** της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, βάσει των προηγούμενων κεφαλαίων, έχει αναπτυχθεί το υποστηρικτικό πλαίσιο μοντελοποίησης για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, και για τα τέσσερα άλλα κράτη μέλη της ΕΕ (δηλ. Γαλλία, Δανία, Ισπανία και Πορτογαλία).

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η βαθμονόμηση και εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων “ATOM”, για την περίπτωση της Πολωνίας, δεν πραγματοποιήθηκε, λόγω μη διαθεσιμότητας επαρκών δεδομένων.

6. Εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” στον οικιακό τομέα της Ελλάδας

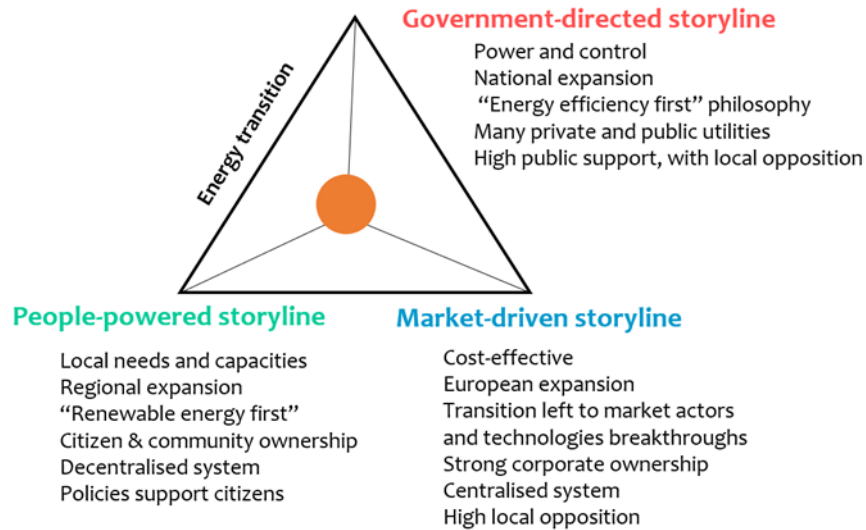
Στα πλαίσια του **Κεφαλαίου 6**, πραγματοποιείται η προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής, καθώς επίσης και η ανάλυση αυτών των σεναρίων (“scenario analysis”), με στόχο την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης (“forward-looking simulation”) της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, για τη μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας. Η προσομοίωση πραγματοποιείται στα πλαίσια τριών (3) σεναρίων (*Stavrakas & Flamos, 2022*):

1. Η χώρα εφαρμόζει σχήμα αποζημίωσης με επιδότηση τύπου “**feed-in tariff - FiT**” για την υποστήριξη της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (**Ενότητα 6.1**).
2. Η χώρα εφαρμόζει σχήμα ενεργειακού συμψηφισμού (“**net metering - NEM**”) για την υποστήριξη της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (**Ενότητα 6.2**).
3. Η χώρα εφαρμόζει σχήμα ενεργειακού συμψηφισμού με αποθήκευση ενέργειας (“**net metering**” με “**BESS**” - “**NEM_BESS**”) για την υποστήριξη της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας (**Ενότητα 6.3**).

Παράλληλα, η ανάλυση των τριών παραπάνω σεναρίων, πραγματοποιείται για τρία (3) διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια μετάβασης (“socioeconomic storylines/transition pathways”) (*Süsser et al., 2021*):

- “**People Powered (PP)**”: Η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται στους ανθρώπους, οι οποίοι γίνονται ατομικοί ή συλλογικοί (π.χ., ενεργειακές κοινότητες) ιδιοκτήτες φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Οι άνθρωποι επωφελούνται από την μετάβαση, η οποία συμβαίνει κατά βάση σε περιφερειακό επίπεδο. Το ενεργειακό σύστημα της χώρας χαρακτηρίζεται κυρίως από αποκεντρωμένα (“decentralised”) και μικρής κλίμακας δίκτυα ηλεκτρισμού.
- “**Government Directed (GD)**”: Η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται σε κυβερνητικές δράσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται κατά βάση σε εθνικό επίπεδο. Η κοινωνική αποδοχή για φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας είναι μεγάλη, αλλά εν μέρει και η «αντίσταση» σε τοπικό επίπεδο για έργα μεγάλης κλίμακας. Σε αυτό το μονοπάτι, η κοινωνία εμπλέκεται σε μικρό βαθμό στην ενεργειακή μετάβαση.
- “**Market Driven (MD)**”: Η ενεργειακή μετάβαση οδηγείται από παράγοντες που σχετίζονται με την αγορά και νέες τεχνολογίες και βασίζεται στην έννοια «αποτελεσματικότητας κόστους» (“cost - effectiveness”). Η μετάβαση επιτυγχάνεται σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Όπως και στο μονοπάτι μετάβασης του “GD”, έτσι και σε αυτό, η κοινωνία εμπλέκεται σε μικρό βαθμό στην ενεργειακή μετάβαση. Το ενεργειακό σύστημα χαρακτηρίζεται από κεντρική (“centralised”) παραγωγή και μεταφορά.

Εν κατακλείδι, μια σύνοψη των κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών ενεργειακής μετάβασης (“socioeconomic storylines/transition pathways”) μαζί με τα χαρακτηριστικά τους, απεικονίζεται στην **Εικόνα 8**, ακριβώς παρακάτω.

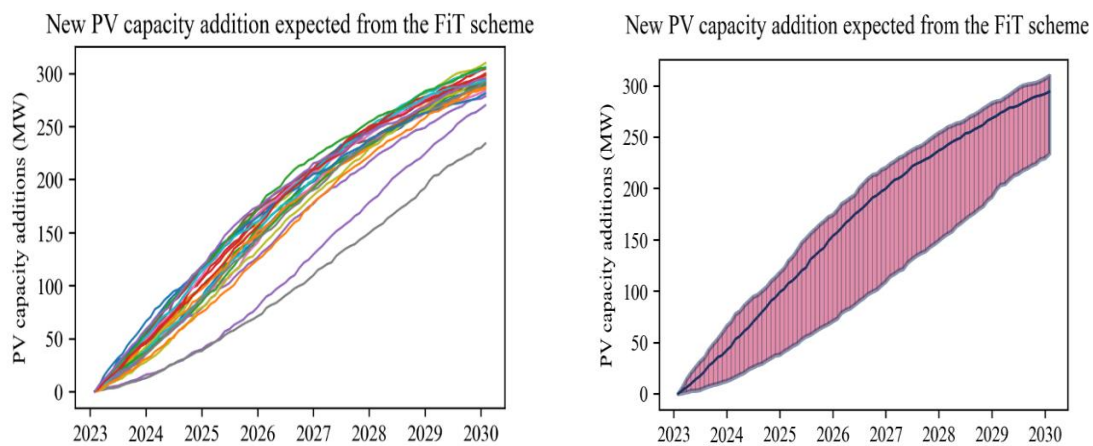


Εικόνα 8. Σύνολο μονοπατιών ενεργειακής μετάβασης και χαρακτηριστικών τους στα πλαίσια αυτής. Πηγή: Süsser et al., 2021.

6.1. Αποζημίωση με επιδότηση τύπου “feed-in tariff”

Το πρώτο σχήμα για το οποίο εξάγονται σενάρια διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας, είναι η εφαρμογή σταθερής τιμής αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών για την ενέργεια που εγχέουν στο δίκτυο. Το αρχικό ύψος του “feed-in tariff” είναι **87 €/MWh** και τα σενάρια έχουν χρονικό ορίζοντα το 2030.

Στο **Διάγραμμα 61** αποτυπώνεται η προσομοίωση της εξέλιξης στην εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της χώρας, υπό την εφαρμογή του εν λόγω σχήματος.



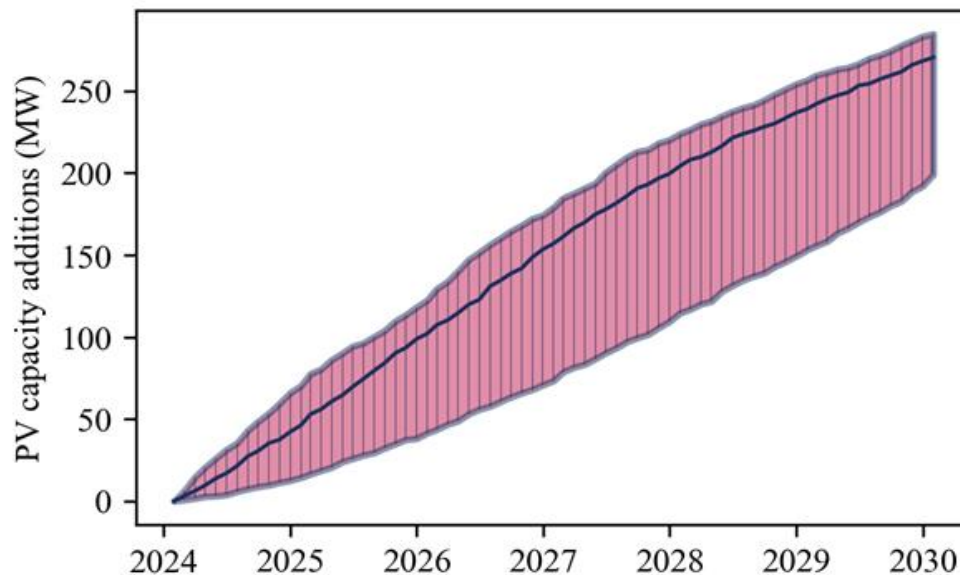
Διάγραμμα 61. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “FiT”.

Όπως φαίνεται κι από τα παραπάνω διαγράμματα, η επιπρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς που αναμένεται να υπάρξει υπό το σχήμα αποζημίωσης με επιδότηση τύπου “feed-in tariff” κυμαίνεται με μεγαλύτερη πιθανότητα μεταξύ **270-310 MW**. Επιμέρους ανάλυση των τριών μονοπατιών ενεργειακής μετάβασης που προαναφέρθηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου, ακολουθεί στα παρακάτω διαγράμματα.

Στο **Διάγραμμα 62** φαίνεται η επίδραση που θα είχε το σενάριο της εφαρμογής σχήματος επιδότησης τύπου “feed-in tariff” υπό το μονοπάτι “People Powered (PP)”, όπου οι παράμετροι

που σχετίζονται με τους «πράκτορες» του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” (όπως οι αρχικές πεποιθήσεις και η κοινωνική εκμάθηση) δέχονται θετική επίδραση, στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στέγης του οικιακού τομέα της χώρας.

New PV capacity addition expected from the FiT_PP_1 scheme

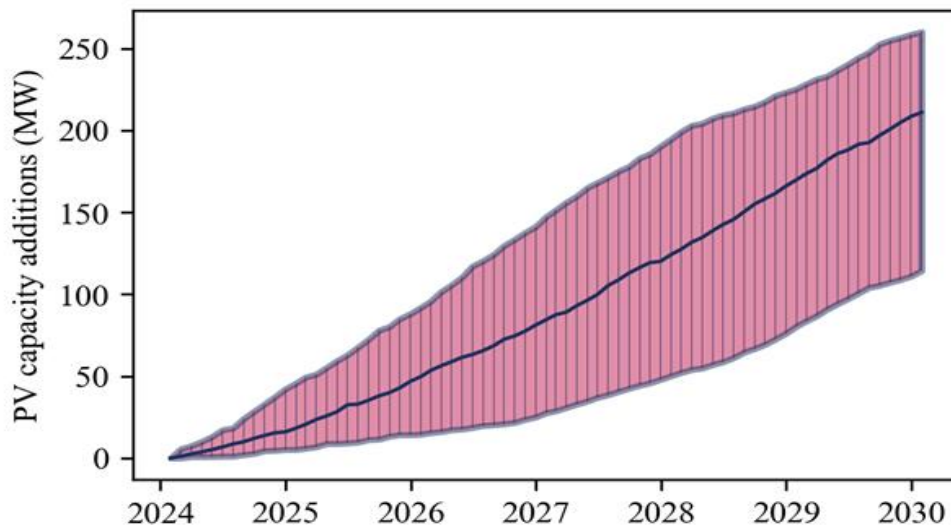


Διάγραμμα 62. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “FiT” και μονοπατιού μετάβασης “People Powered (PP)”.

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια προσθήκη περίπου της τάξεως των **265 MW** (και εύρος μεταξύ **190-280 MW**) έως το τέλος του 2030, η οποία, όπως θα αποτυπωθεί και στα επόμενα διαγράμματα της ενότητας (υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια μετάβασης), είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δύο μονοπάτια μετάβασης (“GD” και “MD”).

Ακολούθως, στο **Διάγραμμα 63**, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την πιθανή εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της χώρας, υπό την εφαρμογή του σχήματος επιδότησης τύπου “feed-in tariff”, σε συνδυασμό με μια ενεργειακή μετάβαση, η οποία θα βασίζεται σε θεσμικά πλαίσια που θα θεσπίζονται από την εκάστοτε κυβέρνηση (“Government Directed - GD”). Όπως προαναφέρθηκε, σε αυτό το μονοπάτι, η εφαρμογή γίνεται κυρίως σε εθνικό επίπεδο.

New PV capacity addition expected from the FiT_GD_1 scheme

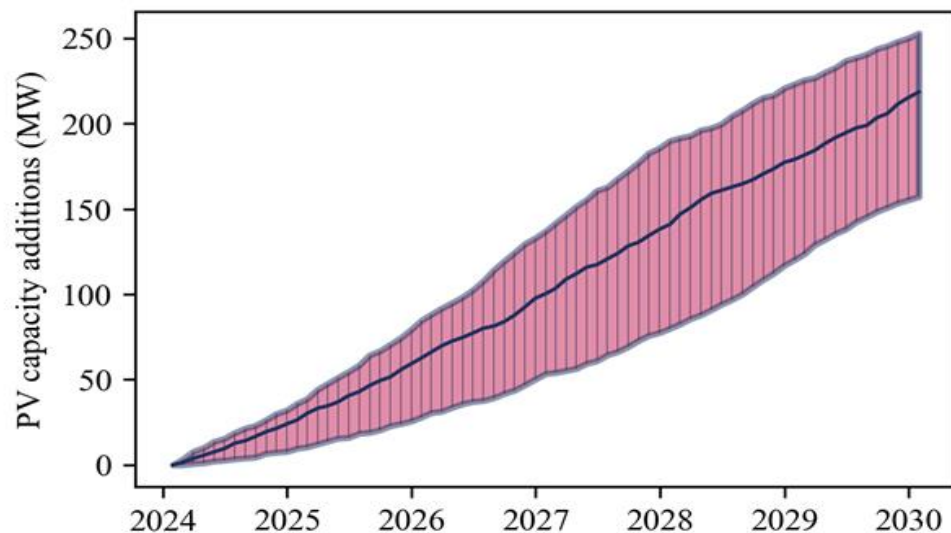


Διάγραμμα 63. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “FiT” και μονοπατιού μετάβασης “Government Directed (GD)”.

Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου αναδεικνύουν την δυναμικότητά του, η οποία ανέρχεται σε περίπου **200 MW** με εύρος **100-250 MW**. Σε αυτό το σενάριο, αξίζει να επισημανθεί ότι η διασπορά της εγκατεστημένης ισχύος, σημειώνει υψηλά επίπεδα, αφού το εύρος αυτού του σεναρίου είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του σεναρίου “FiT_PP”.

Το τελευταίο σενάριο που θα αναλυθεί, είναι η εφαρμογή σχήματος επιδότησης τύπου “feed-in tariff” υπό το μονοπάτι μετάβασης, όπου η διάχυση των φωτοβολταϊκών στέγης να βασίζεται σε κανόνες της αγοράς, όπως είναι η μεταβολή του κόστους εγκατάστασης και αποθήκευσης (“Market Driven - MD”).

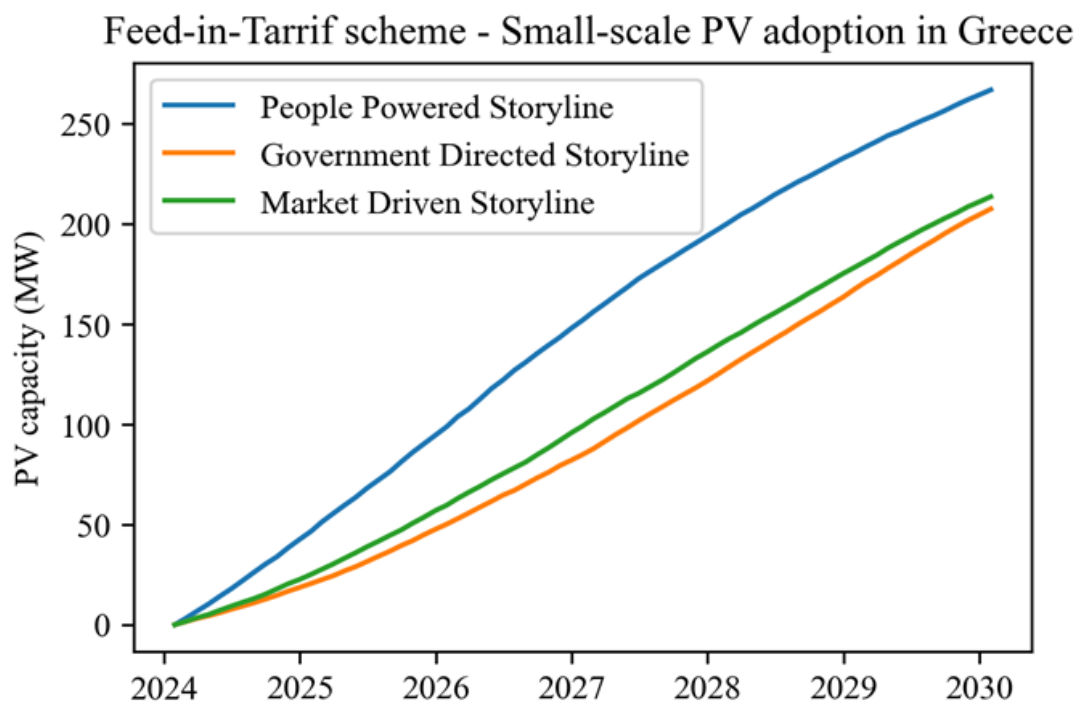
New PV capacity addition expected from the FiT_MD_1 scheme



Διάγραμμα 64. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “FiT” και μονοπατιού μετάβασης “Market Driven (MD)”.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου της εφαρμογής “feed-in tariff” υπό το μονοπάτι μετάβασης “Market Driven” (οι αποφάσεις των «πρακτόρων» βασίζονται κατά βάση σε κανόνες της αγοράς που ισχύουν σε πανευρωπαϊκό επίπεδο), δείχνουν ότι μια πιθανή εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος που θα προστεθεί για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, αντιστοιχεί σε **210 MW**, με το εύρος να κυμαίνεται μεταξύ **155-255 MW** (Διάγραμμα 64).

Κλείνοντας την ενότητα, γίνεται διαγραμματική απεικόνιση όλων των παραπάνω κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών ενεργειακής μετάβασης (“PP”, “GD” και “MD”) υπό το σχήμα αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών με επιδότηση τύπου “feed-in tariff” (Διάγραμμα 65).



Διάγραμμα 65. Πρόβλεψη πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “FiT” (για όλα τα μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης).

Όπως αποτυπώνεται και στο τελικό διάγραμμα, η μεγαλύτερη διάχυση της τεχνολογίας επιτυγχάνεται στο μονοπάτι που η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται στον ανθρώπινο παράγοντα, ο οποίος χαρακτηρίζεται από ισχυρά κοινωνικά χαρακτηριστικά (όπως η κοινωνική εκμάθηση). Περαιτέρω σχολιασμός αυτού του φαινομένου πραγματοποιείται στο **Κεφάλαιο 7** της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

6.2. Αποζημίωση μέσω σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού

Το δεύτερο σχήμα υπό εξέταση, είναι η αποζημίωση μέσω ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering” - “NEM”). Το αναμενόμενο όφελος από την εφαρμογή του ενεργειακού συμψηφισμού στο τέλος κάθε περιόδου εκκαθάρισης, υπολογίζεται με βάση την παρακάτω μαθηματική σχέση (Stavrakas et al., 2019):

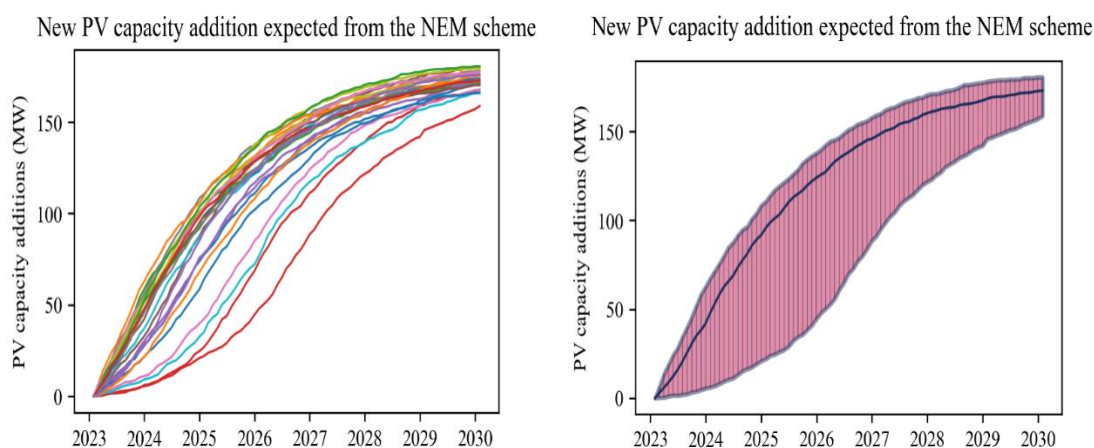
$$P_{resid}^{total} = C_{grid} * \min(E_{PV}, E_{resid}) + C_{PV} * E_{residPV}$$

,όπου: C_{grid} : η καθαρή χρέωση (χωρίς φόρους) για την καταναλωθείσα ενέργεια, C_{PV} : η τιμή αποζημίωσης για την ηλεκτρική ενέργεια που απορροφήθηκε από την εγκατάσταση, E_{PV} : η συνολική ποσότητα ενέργειας που παράχθηκε από την εγκατάσταση, E_{resid} : η συνολική ζήτηση

ηλεκτρικής ενέργειας του νοικοκυριού, E_{residPV} : Η συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε από την εγκατάσταση.

Επισημαίνεται ότι ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης μεταβάλλεται αναλογικά με την μεταβολή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την εγκατάσταση, ενώ ο δεύτερος όρος της σχέσης μεταβάλλεται αναλογικά με την μεταβολή της ιδιοκατανάλωσης (“self-consumption”).

Παρακάτω αποτυπώνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης (σενάριο “NEM”) για την πιθανή εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της χώρας (**Διάγραμμα 66**) με χρονικό ορίζοντα το 2030.

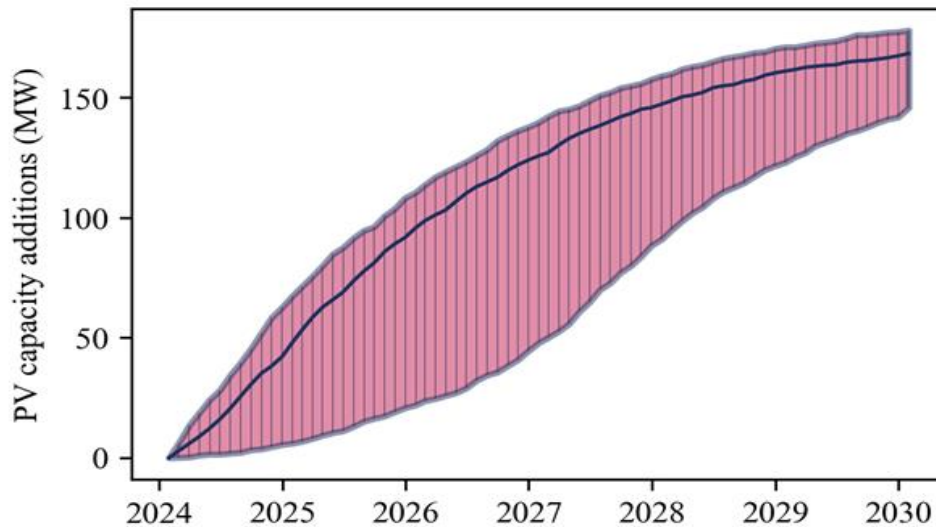


Διάγραμμα 66. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “NEM”.

Από το **Διάγραμμα 66**, αποτυπώνεται η επιπλέον εγκατεστημένη ισχύς που θα ήταν δυνατό να προστεθεί υπό την εφαρμογή ενός σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering” - “NEM”), η οποία κυμαίνεται μεταξύ **155-185 MW**. Παρακάτω εφαρμόζεται ανάλυση του υπό μελέτη σχήματος (“NEM”) για τα τρία διαφορετικά μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης που μελετώνται (“PP”, “GD” και “MD”).

Στο **Διάγραμμα 67** περιγράφεται το σενάριο της εφαρμογής σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”), στην περίπτωση που οι άνθρωποι έχουν τον βασικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση της χώρας (“People Powered - PP”). Σε αυτή την περίπτωση, κοινωνικοί παράγοντες έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην διάχυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών στον οικιακό τομέα.

New PV capacity addition expected from the NEM_PP_2 scheme

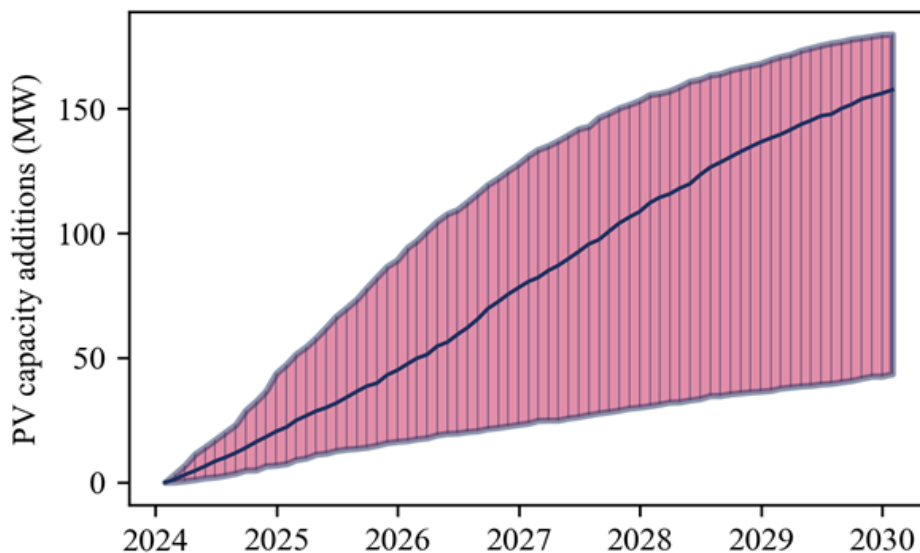


Διάγραμμα 67. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM” και μονοπατιού μετάβασης “People Powered (PP)”.

Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου αναδεικνύουν την δυναμικότητα που θα είχε το εν λόγω σχήμα, με την επιπρόσθετη εγκατεστημένη ισχύ να έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να αντιστοιχεί σε περίπου **175 MW**, με ένα εύρος της τάξεως των **140-185 MW**.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η ίδια ανάλυση (**Διάγραμμα 68**) για το σενάριο της εφαρμογής ενός σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού, υπό το μονοπάτι που η ενεργειακή μετάβαση της Ελλάδας βασίζεται σε κυβερνητικές οδηγίες και καθοδηγήσεις της κυβέρνησης (“Government Directed - GD”) σε εθνικό επίπεδο.

New PV capacity addition expected from the NEM_GD_2 scheme

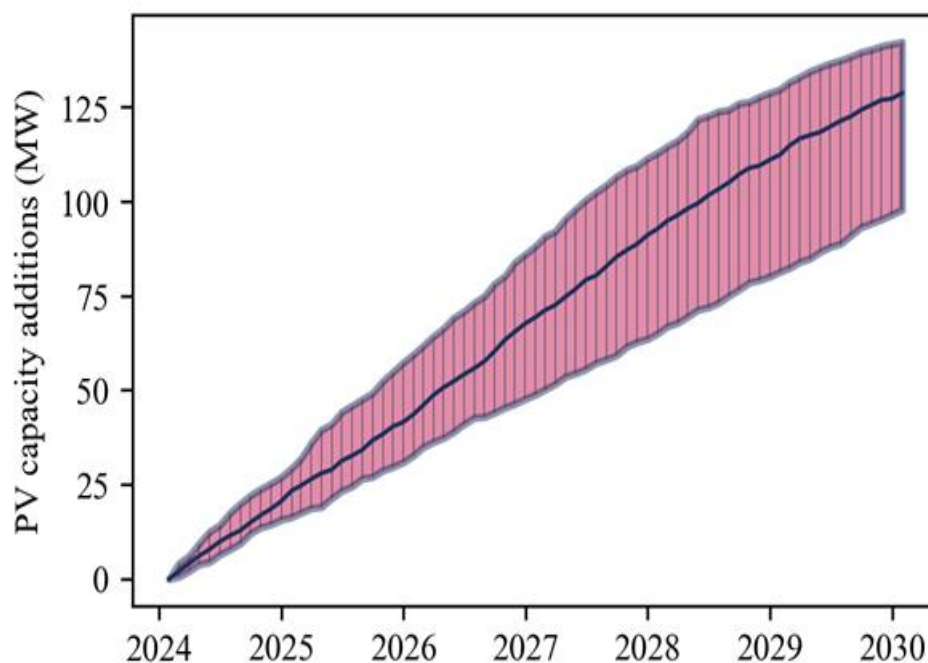


Διάγραμμα 68. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM” και μονοπατιού μετάβασης “Government Directed (GD)”.

Τα αποτελέσματα του εν λόγω σεναρίου χαρακτηρίζονται, όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 68**, από πολύ μεγάλη διασπορά, όπου οι «πράκτορες» που αποφεύγουν το ρίσκο (“risk-averse investors”) επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό το εύρος της πιθανής εγκατεστημένη ισχύος. Επιγραμματικά, η μεγαλύτερη πιθανότητα αντιστοιχεί σε περίπου **155 MW**, με το εύρος των πιθανών αποτελεσμάτων να κυμαίνεται μεταξύ **45-185 MW**. Επισημαίνεται ότι η πολύ μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα του σεναρίου, υποδηλώνει την μεγάλη αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει το εν λόγω σενάριο.

Κλείνοντας όλους τους συνδυασμούς της εφαρμογής του σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”) με όλα τα υπό μελέτη κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης, στο **Διάγραμμα 69** αποτυπώνεται η επίδραση που θα μπορούσε να έχει ένα σχήμα ενεργειακού συμψηφισμού που βασίζεται σε κανόνες της αγοράς (“Market Driven - MD”) στην διάχυση των φωτοβολταϊκών στέγης στον οικιακό τομέα της χώρας.

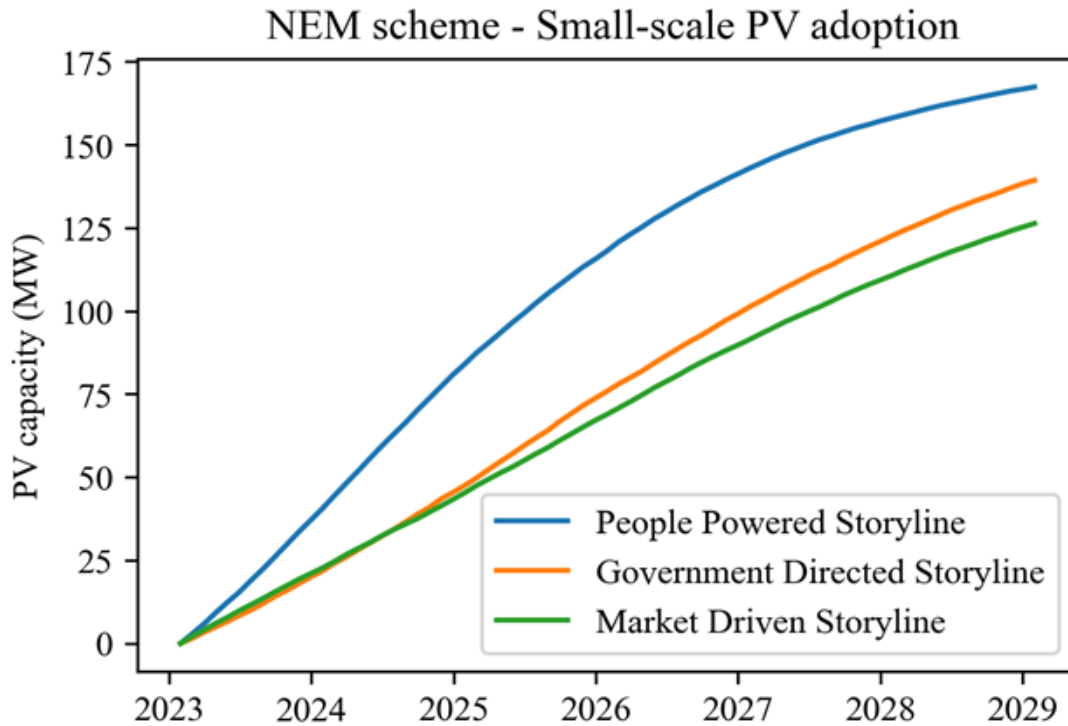
New PV capacity addition expected from the NEM_MD_2 scheme



Διάγραμμα 69. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM” και μονοπατιού μετάβασης “Market Driven (MD)”.

Όπως φαίνεται κι από το παραπάνω διάγραμμα, η εγκατεστημένη ισχύς που θα μπορούσε να επιτευχθεί υπό αυτό το μονοπάτι (“MD”), είναι εμφανώς μικρότερη σε σύγκριση με τα άλλα δύο μονοπάτια μετάβασης (“PP” και “GD”), με την πιθανότερη ποσότητα εγκατεστημένης ισχύος (σύγκλιση σεναρίων) να αντιστοιχεί σε **130 MW**, ενώ το εύρος να είναι **100-140 MW**.

Κλείνοντας την ενότητα, γίνεται διαγραμματική απεικόνιση όλων των παραπάνω κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών ενεργειακής μετάβασης (“PP”, “GD” και “MD”) υπό το σχήμα του ενεργειακού συμψηφισμού (**Διάγραμμα 70**).



Διάγραμμα 70. Πρόβλεψη πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “NEM” (για όλα τα μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης).

Όπως και στην περίπτωση του σεναρίου της αποζημίωσης με επιδότηση τύπου “feed-in tariff”, έτσι και στην περίπτωση του ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”), το μονοπάτι όπου η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται στον ανθρώπινο και κοινωνικό παράγοντα είναι αυτό που έχει το πιο θετικό αποτέλεσμα. Συγκριτικά με το σχήμα επιδότησης τύπου “feed-in tariff”, παρατηρείται μικρότερη διάχυση για το σενάριο της εφαρμογής σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού. Στο **Κεφάλαιο 7** πραγματοποιείται εκτενέστερος σχολιασμός στα δεδομένα που πιθανώς να ευθύνονται για αυτό το φαινόμενο.

6.3. Αποζημίωση μέσω σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού με αποθήκευση

Το τρίτο και τελευταίο σχήμα υπό εξέταση, είναι ο ενεργειακός συμψηφισμός (“net metering”) σε συνδυασμό με μπαταρία (“NEM_BESS”). Σε αντίθεση με την περίπτωση του σχήματος “net metering” χωρίς αποθήκευση (“NEM”), το αναμενόμενο όφελος από την εφαρμογή του “net metering” με αποθήκευση (μπαταρία) στο τέλος κάθε περιόδου εκκαθάρισης, υπολογίζεται με βάση την επόμενη μαθηματική σχέση (Stavrakas et al., 2019):

$$P_{resid}^{total} = C_{grid} * (E_{resid} - C_{grid}) + C_{pv} * E_{residPV}$$

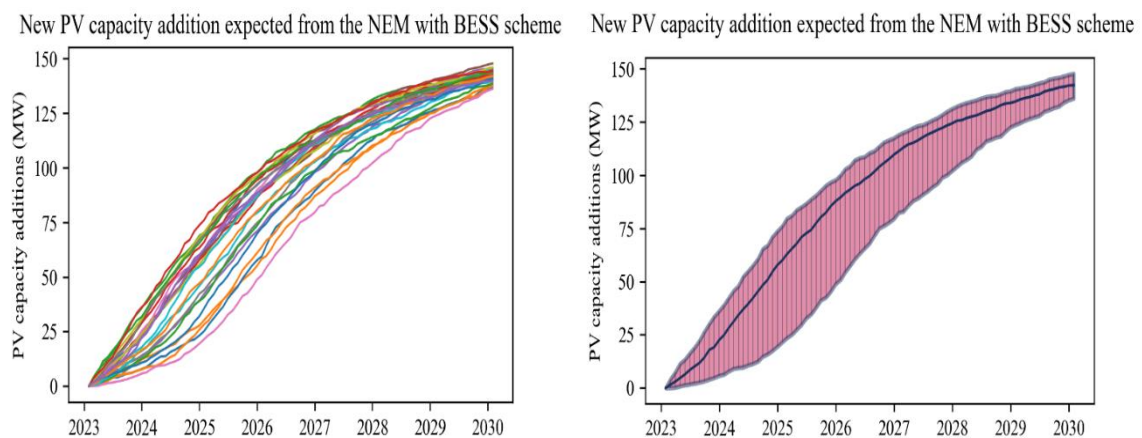
,όπου: C_{grid} : Καθαρή χρέωση (χωρίς φόρους) για την καταναλωθείσα ενέργεια, C_{pv} : η τιμή αποζημίωσης για την ηλεκτρική ενέργεια που απορροφήθηκε από την εγκατάσταση, E_{resid} : η συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του νοικοκυριού, $E_{residPV}$: η συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε από την εγκατάσταση.

Όπως και στην περίπτωση του προηγούμενου σεναρίου (“NEM”), ο πρώτος όρος της σχέσης αυξάνεται με την οποιαδήποτε αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την εγκατάσταση, ενώ ο δεύτερος όρος της σχέσης αυξάνεται επίσης με την αύξηση της ιδιοκατανάλωσης (“self-consumption”).

Τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM” για την εξαγωγή του σεναρίου αυτού, είναι τα εξής:

- Απόδοση μπαταρίας: **0,92**;
- Απόδοση “inverter”: **0,96**;
- Αρχικό κόστος εγκατάστασης Φ/B: **1.333 €/kW_p**;
- Ετήσιος συντελεστής μεταβολής τιμής Φ/B: **-1,28%**;
- Κόστος αποθήκευσης (μπαταρίας): **700 €/kWh**;
- Ετήσιος συντελεστής μεταβολής κόστους αποθήκευσης: **-3%**;
- Ποσοστό επιδότησης μπαταρίας: **100%**;
- Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας: **0,1595 €/kWh**;
- Ετήσιος συντελεστής μεταβολής λιανικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας: **1,31%**.

Στο **Διάγραμμα 71** αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου όπου εφαρμόζεται σχήμα ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”) σε συνδυασμό με αποθήκευση (μπαταρία).

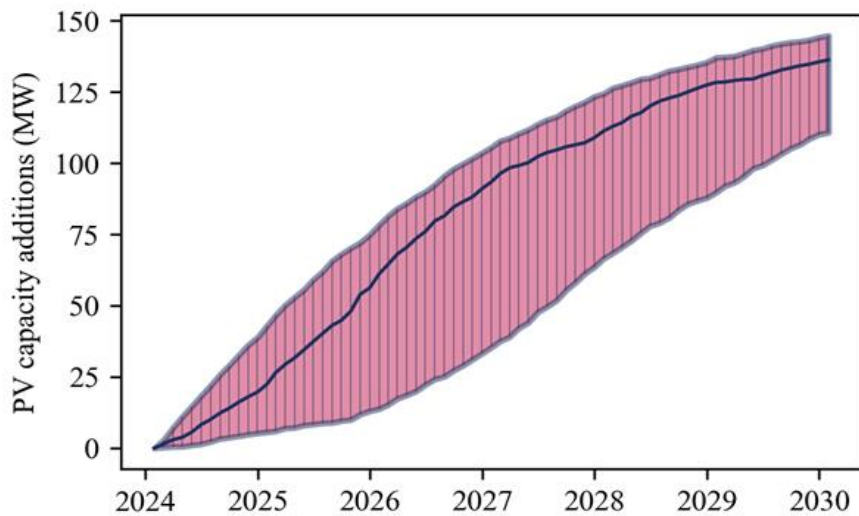


Διάγραμμα 71. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/B συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “NEM_BEES”.

Στο **Διάγραμμα 71**, γίνεται εμφανής η δυναμικότητα του σεναρίου του ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”) με αποθήκευση (μπαταρία που επιδοτείται κατά 100%). Σύμφωνα με την πρόβλεψη του μοντέλου, είναι δυνατό να επιτευχθεί αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σε φωτοβολταϊκά στέγης με εύρος μεταξύ **135-145 MW**. Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει η ανάλυση του συγκεκριμένου σεναρίου υπό τρία διαφορετικά μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης που εξετάζονται (“PP”, “GD” και “MD”).

Το πρώτο υπό εξέταση κοινωνικοοικονομικό μονοπάτι ενεργειακής μετάβασης, είναι αυτό όπου οι άνθρωποι και οι κοινωνικοί παράγοντες παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην εξέλιξη της ενεργειακής μετάβασης της χώρας (“People Powered - PP”). Στο **Διάγραμμα 72** αποτυπώνεται η προσομοίωση του σεναρίου που εφαρμόζεται σχήμα ενεργειακού συμψηφισμού υπό το μονοπάτι που μόλις προαναφέρθηκε (“PP”).

New PV capacity addition expected from the NEM_BESS_PP_3 scheme

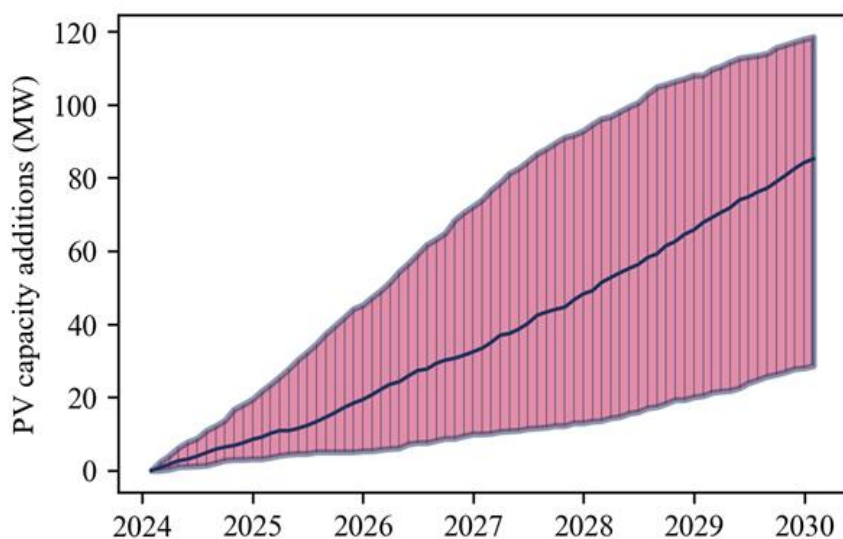


Διάγραμμα 72. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM_BESS” και μονοπατιού μετάβασης “People Powered (PP)”.

Τα αποτελέσματα του εν λόγω σεναρίου δείχνουν ότι υπό την εφαρμογή σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού με αποθήκευση για την περίπτωση που η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται στον ανθρώπινο παράγοντα, θα μπορούσε να επιτευχθεί επιπλέον εγκατεστημένη ισχύς στα φωτοβολταϊκά στέγης του οικιακού τομέα, περίπου ίση με **137,5 MW** και εύρος **110-145 MW**.

Το επόμενο σενάριο που αναλύεται είναι η εφαρμογή σχήματος “net metering” με αποθήκευση, υπό το μονοπάτι όπου η ενεργειακή μετάβαση της χώρας είναι καθοδηγούμενη από κυβερνητικές δράσεις (“Government Directed - GD”) σε εθνικό επίπεδο. Η πορεία της εγκατεστημένης ισχύος σε αυτή την περίπτωση, περιγράφεται από το **Διάγραμμα 73**.

New PV capacity addition expected from the NEM_BESS_GD_2 scheme

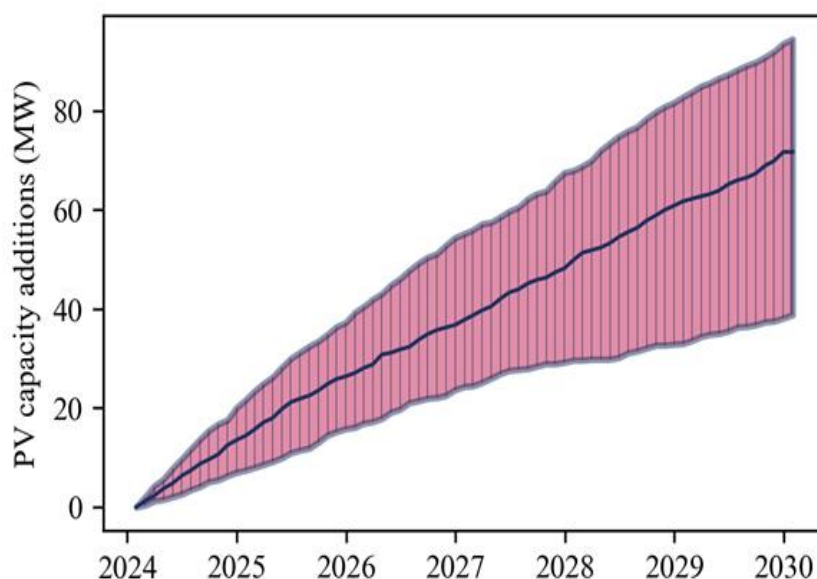


Διάγραμμα 73. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM_BESS” και μονοπατιού μετάβασης “Government Directed (GD)”.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου εφαρμογής σχήματος “net metering” με αποθήκευση, όπου η μπαταρία επιδοτείται κατά 100% με κρατικούς πόρους, αναδεικνύουν μεγάλη διασπορά στο εύρος της πιθανής εξέλιξης, το οποίο συνεπάγεται αβεβαιότητα σχετικά με την πιθανή εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος (με χρονικό ορίζοντα το 2030). Με αριθμητικούς όρους, μια πιθανή εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος είναι τα **85 MW**, ενώ το αντίστοιχο εύρος είναι **30-119 MW**.

Συνεχίζοντας την ανάλυση, το επόμενο (και τελευταίο) σενάριο που αναλύεται, είναι η εφαρμογή σχήματος “net metering” με αποθήκευση, κατά το οποίο η ενεργειακή μετάβαση της χώρας βασίζεται σε χαρακτηριστικά της αγοράς (“Market Driven - MD”) σε ευρωπαϊκό επίπεδο, τα οποία καθορίζουν την συμπεριφορά των «πρακτόρων» του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” (**Διάγραμμα 74**).

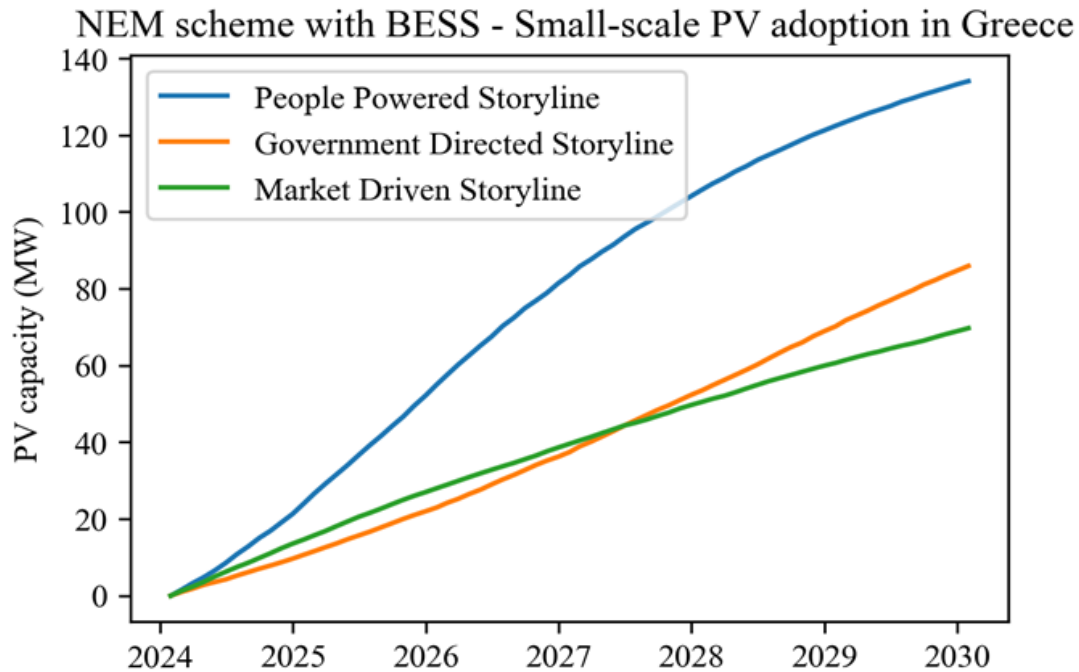
New PV capacity addition expected from the NEM_BESS_MD_3 scheme



Διάγραμμα 74. Εξαγωγή προβλέψεων (2023-2030) πιθανής εξέλιξης εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό την εφαρμογή σχήματος “NEM_BESS” και μονοπατιού μετάβασης “Market Driven (MD)”.

Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου αναδεικνύουν μικρότερη δυναμικότητα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μονοπάτια, πιθανόν λόγω της επίδρασης που έχουν τα μοντελοποιημένα κοινωνικά μεγέθη (αρχικές πεποιθήσεις, κοινωνική εκμάθηση, κ.λπ.) στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”. Πιο συγκεκριμένα, η πιθανότερη εγκατεστημένη ισχύς (σύγκλιση σεναρίων) φωτοβολταϊκών στέγης για το εν λόγω σενάριο αντιστοιχεί σε **75 MW** με εύρος **39-95 MW**.

Τέλος, γίνεται μια συνολική απεικόνιση όλου του εν λόγω σεναρίου (“net metering” με αποθήκευση) για όλα τα κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης (“PP, GD, MD”) στο **Διάγραμμα 75**.



Διάγραμμα 75. Πρόβλεψη πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας υπό το σχήμα “NEM_BEES” (για όλα τα μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης).

Παρατηρείται ότι σε όλες τις προσομοιώσεις σεναρίων (“forward-looking simulations”), το μονοπάτι όπου η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται σε κοινωνικούς παράγοντες και στον άνθρωπο (“People Powered Storyline”) έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην διάχυση της τεχνολογίας που μελετάται (φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα). Όπως προαναφέρθηκε, αυτό είναι δυνατό να συμβαίνει λόγω της επίδρασης που έχουν τα κοινωνικά μεγέθη στο μοντέλο, τα οποία ποσοτικοποιούνται κατά την μοντελοποίηση.

Εκτενής σχολιασμός των αποτελεσμάτων των σεναρίων, καθώς επίσης και εξαγωγή συμπερασμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση των σεναρίων του 6^{ου} κεφαλαίου, πραγματοποιείται στο **Κεφάλαιο 7** της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παράλληλα, στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται συγκεντρωτική και επιγραμματική αναφορά όλων των αποτελεσμάτων στον συγκεντρωτικό **Πίνακα 22**.

7. Συμπεράσματα

7.1. Σύνοψη και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υποστηρικτικού πλαισίου μοντελοποίησης μέσω της χρήσης του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”, με στόχο την προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών εργαλείων ενεργειακής πολιτικής για την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα συγκεκριμένων Κρατών Μελών (δηλ. Γαλλία, Δανία, Ελλάδα, Ισπανία, και Πορτογαλία).

Στα πλαίσια αυτού του σκοπού, γίνεται εκτενής αναφορά στο φαινόμενο της κλιματικής κρίσης, η οποία είναι αποτέλεσμα της ανθρωπογενούς δραστηριότητας στη μεταβιομηχανική εποχή, καθώς επίσης και στις δυσμενείς επιπτώσεις που προκαλούνται για την ανθρωπότητα στα πλαίσια αυτής. Εν συνεχεία, περιγράφεται η ανάγκη για μια δίκαιη ενεργειακή μετάβαση, στα πλαίσια της οποίας οι πολίτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα έχουν πρόσβαση σε «πράσινη» ενέργεια, με έμφαση στο σημαντικό ρόλο που αναμένεται να έχει ο οικιακός τομέας (*Papantonis et al., 2022; Tzani et al., 2022*), ο οποίος συνεισφέρει με **27%** στην τελική ενεργειακή ζήτηση των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σε επόμενο στάδιο, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο την αποσαφήνιση όλων των θεωρητικών εννοιών που διέπουν την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, όπως είναι το ηλιακό δυναμικό, και η μαθηματική ανάλυση των σχέσεων υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας. Έπειτα, πραγματοποιείται περιγραφή της υπάρχουσας κατάστασης στο σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς επίσης και της ανάγκης που υπάρχει για μετάβαση σε ένα αποκεντρωμένο (“decentralised”) ενεργειακό σύστημα, στα πλαίσια του οποίου οι (ιδιο)καταναλωτές θα έχουν καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των χωρών που διαμένουν.

Έπειτα πραγματοποιείται η περιγραφή του βασικού μεθοδολογικού πλαισίου μοντελοποίησης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα επιστημονική βιβλιογραφία για την περιγραφή της έννοιας της «μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων». Στα πλαίσια της ανάπτυξης του μεθοδολογικού πλαισίου, παρουσιάζεται εκτενώς το υπολογιστικό εργαλείο μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων “ATOM”, το οποίο αναπτύχθηκε από την ομάδα του Εργαστηρίου Τεχνοοικονομικής Ενεργειακών Συστημάτων (“Technoeconomics of Energy Systems laboratory - TEESlab”) του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Η καινοτομία του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” έγκειται στην ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων που διέπουν την λήψη αποφάσεων των «πρακτόρων» (δηλ. πολίτες/τελικοί καταναλωτές) σχετικά με την υλοποίηση (ή μη) μίας επένδυσης (στην παρούσα εφαρμογή η επένδυση που μελετάται είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, ωστόσο, η εφαρμογή του “ATOM” μπορεί να γίνει και για άλλες επενδύσεις στο μέλλον, όπως είναι η εγκατάσταση αντλιών θερμότητας ή η αγορά ηλεκτρικών οχημάτων).

Στα πλαίσια της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”, αναπτύχθηκε και το υποστηρικτικό πλαίσιο μοντελοποίησης, το οποίο αποτελεί και το κεντρικό σημείο παρουσίασης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, και το οποίο περιλαμβάνει την ανάλυση όλων των ενεργών εργαλείων ενεργειακής πολιτικής που εφαρμόζουν τα υπό μελέτη Κράτη Μέλη για την υποστήριξη της περαιτέρω διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα. Η ανάπτυξη του υποστηρικτικού πλαισίου μοντελοποίησης ολοκληρώνεται με την ανάλυση και τέλος, την επιγραμματική καταγραφή,

όλων των βασικών χαρακτηριστικών και δεδομένων του ενεργειακού συστήματος του κάθε υπό μελέτη Κράτους Μέλους.

Με αυτό ως δεδομένο, στη συνέχεια μελετήθηκε η ευρωστία του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” στη βαθμονόμηση των κυριότερων συμπεριφορικών (κοινωνικών) παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν τη λήψη αποφάσεων των «πρακτόρων» για ανάληψη (ή μη) του επενδυτικού ρίσκου που διέπει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι η βαθμονόμηση του “ATOM” για τη μελέτη περίπτωσης της Πολωνίας δεν εφαρμόστηκε, λόγω έλλειψης διαθέσιμων δεδομένων. Παράλληλα, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι, αν και η μοντελοποίηση βάσει πρακτόρων παρέχει ένα ευέλικτο πλαίσιο για τη μοντελοποίηση ετερογενών κοινωνικών συστημάτων, η ευελιξία αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη αβεβαιότητα λόγω της απαιτούμενης συμπερίληψης πολλών διαφορετικών κοινωνικών παραμέτρων, οι οποίες εισάγουν επιπρόσθετη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του εργαλείου. Αυτό καθιστά καίρια τη διαδικασία της βαθμονόμησης (και της ανάλυσης ευαισθησίας στα πλαίσια αυτής), καθώς η ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων που προαναφέρθηκαν είναι κομβικού χαρακτήρα, ειδικότερα όταν αυτές οι παράμετροι θεωρούνται δεδομένες από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής.

Με βάση τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διασπορά (αβεβαιότητα) στις μελέτες περίπτωσης της Δανίας και της Ισπανίας, εν αντιθέσει με τις μελέτες περίπτωσης της Γαλλίας, της Ελλάδας, και της Πορτογαλίας, οι οποίες παρουσίασαν μεγαλύτερη «αξιοπιστία». Ωστόσο, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης δεν ήταν απαγορευτικά για καμία από τις μελέτες περίπτωσης της παρούσας εργασίας, γεγονός που καθιστά εφικτή την περαιτέρω εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής, με στόχο την εξαγωγή προβλέψεων πιθανής εξέλιξης της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας σε μελλοντική έρευνα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για την προσομοίωση σεναρίων διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής (αποζημίωση των αυτοπαραγωγών με επιδότηση τύπου “feed-in tariff”, εφαρμογή σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού (“net metering”), και εφαρμογή σχήματος ενεργειακού συμψηφισμού με πλήρη (100%) κρατική επιδότηση για αποθήκευση ενέργειας με μπαταρία), για τη μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας, αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 22).

Πίνακας 22. Αποτελέσματα (προβλέψεις) της προσομοίωσης των υπό μελέτη σεναρίων (“FiT”, “NEM”, “NEM_BESS”) για τη μελέτη περίπτωσης της Ελλάδας με χρονικό ορίζοντα το 2030.

Σχήμα ενεργειακής πολιτικής	Μονοπάτι ενεργειακής μετάβασης	Σύγκλιση αποτελεσμάτων (πιθανότερη πρόβλεψη)	Εύρος (διασπορά) προβλέψεων
“Feed-in tariff” ⁴⁴	“People Powered”	265 MW	190-280 MW
“Feed-in tariff”	“Government Directed”	200 MW	100-250 MW
“Feed-in tariff”	“Market Driven”	210 MW	155-255 MW
Ε.Σ. ⁴⁵ “net metering”	“People Powered”	175 MW	140-185 MW
Ε.Σ. “net metering”	“Government Directed”	155 MW	45-185 MW

⁴⁴ Feed-in Tariff = 87 €/MWh.

⁴⁵ Ενεργειακός συμψηφισμός.

E.Σ. “net metering”	“Market Driven”	130 MW	100-140 MW
E.Σ.A. ⁴⁶ “net metering + BESS”	“People Powered”	137,5 MW	110-145 MW
E.Σ.A. “net metering + BESS”	“Government Directed”	85 MW	30-119 MW
E.Σ.A. “net metering + BESS”	“Market Driven”	75 MW	39-95 MW

Βάσει των αποτελεσμάτων, στην περίπτωση που η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται σε κυβερνητικές αποφάσεις (“Government Directed”), η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα άλλα δύο μονοπάτια μετάβασης (“People Powered” και “Market Driven”). Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο ότι σε σύγκριση με τα άλλα δύο μονοπάτια, όταν η μετάβαση βασίζεται σε κυβερνητικές δράσεις, παρουσιάζει μεγαλύτερη αβεβαιότητα, καθώς δεν είναι απαραίτητο ότι αυτές οι αποφάσεις θα δράσουν θετικά στη διάχυση της τεχνολογίας. Για παράδειγμα, μία κακή ενημερωτική δράση που προέρχεται από κυβερνητικές πρωτοβουλίες και στοχεύει στη μεταβολή της συμπεριφοράς των κατοίκων της χώρας, δεν θα έχει θετική επίδραση στο βαθμό υιοθέτησης της τεχνολογίας από τους πολίτες. Αντίθετα, μία καλά οργανωμένη ενημερωτική δράση, μπορεί να έχει θετική επίδραση στη διαδικασία λήψης απόφασης για υιοθέτηση της εκάστοτε τεχνολογίας από τους πολίτες.

Σε αντίθεση με την περίπτωση που η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται σε κυβερνητικές δράσεις (“Government Directed”) που λαμβάνουν χώρα σε εθνικό επίπεδο, μία ενεργειακή μετάβαση, η οποία θα βασίζεται σε πιο ενεργή συμμετοχή των πολιτών (“People Powered”) σε τοπικό επίπεδο (π.χ., δημιουργία και υποστήριξη ενεργειακών κοινοτήτων, ιδιοκατανάλωση, κ.λπ.) παρουσιάζει μεγαλύτερη αξιοπιστία, γεγονός που ίσως να οφείλεται στη «βαρύτητα» που έχουν οι κοινωνικές παράμετροι (π.χ., κοινωνική εκμάθηση, αρχικές πεποιθήσεις, κ.λπ.) στην υιοθέτηση τεχνολογιών, και κοινωνικών καινοτομιών, σε γενικότερο επίπεδο, όπως επιβεβαιώνουν και πρόσφατες μελέτες στην επιστημονική βιβλιογραφία (*Christoforidis et al., 2016; Michas et al., 2020; Spyridaki et al., 2020; Stavrakas et al., 2019; Tsantopoulos et al., 2014*).

Όσον αφορά την περίπτωση αποζημίωσης των ιδιοκαταναλωτών μέσω αποζημίωσης με επιδότηση τύπου “feed-in tariff”, οι κυβερνητικές αποφάσεις έχουν μικρότερο ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση της χώρας σε σύγκριση με τα άλλα δύο μονοπάτια ενεργειακής μετάβασης. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που κάποια χώρα (στην παρούσα μελέτη η Ελλάδα), αποφασίσει να θέσει σε ισχύ ένα σχήμα αποζημίωσης των αυτοπαραγωγών με επιδότηση τύπου “feed-in tariff”, θα πρέπει το ύψος της σταθερής τιμής να αντικατοπτρίζει ρεαλιστικά την κοινωνική άποψη για το ύψος της αποζημίωσης (σε ποιο ύψος πιστεύουν οι πολίτες ότι είναι συνετό να αποζημιωθούν), καθώς επίσης και να προέρχεται από ορθολογικά κριτήρια που σχετίζονται με την αγορά (ποια είναι η εξέλιξη της αγοράς για το κόστος εγκατάστασης ή/και αποθήκευσης, και πώς εξελίσσεται η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας).

Πέραν των κοινωνικών παραμέτρων που ποσοτικοποιούνται με μαθηματικές σχέσεις, μεγάλη σημασία έχει το μέγεθος της «αδράνειας ως προς την επένδυση» (“inertia to invest”). Πρακτικά, αυτό το μέγεθος είναι η βασική αιτία για την οποία καθυστερεί η διάχυση οποιασδήποτε τεχνολογίας. Αντικατοπτρίζει την καθυστέρηση που παρουσιάζουν οι πολίτες ως προς την εκμετάλλευση των νέων πληροφοριών που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην υλοποίηση της επένδυσης. Στο υπολογιστικό εργαλείο “ATOM”, ακόμη κι όταν η αντίσταση προς την επένδυση είναι χαμηλότερη από το προκαθορισμένο όριο (“threshold”), και η

⁴⁶ Ενεργειακός συμψηφισμός με αποθήκευση ενέργειας με μπαταρία.

επένδυση αξιολογείται θετικά από τους «πράκτορες», μόνο ένα ποσοστό των «πρακτόρων» θα υλοποιήσει τελικά την επένδυση. Η καθορισμένη τιμή για αυτή την παράμετρο στα πλαίσια της εργασίας, ισούται με **0,1** (πολύ χαμηλή). Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν το επενδυτικό περιβάλλον είναι ευνοϊκό για υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, μεγάλο ποσοστό των «πρακτόρων» δεν θα πάρει την τελική απόφαση για υλοποίηση της επένδυσης, ειδικά όταν πρόκειται να υποστηριχθεί με κάποιο νέο σχήμα. Η παράμετρος της αδράνειας ως προς την επένδυση θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, καθώς έχει καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα του εργαλείου.

Κλείνοντας, τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, καταδεικνύουν την ανάγκη για εφαρμογή **συνδυασμού** διαφορετικών σχημάτων ενεργειακής πολιτικής για την επίτευξη των ενεργειακών στόχων που έχει θέσει η Ελλάδα (έως το 2030 η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα να ισούται τουλάχιστον με **1 GW**⁴⁷), αφού η εφαρμογή ενός σχήματος δεν είναι αρκετή για την επίτευξη των «φιλόδοξων» ενεργειακών στόχων της χώρας που ορίζονται στο αναθεωρημένο ΕΣΕΚ. Παράλληλα, ισχυρό υποστηρικτικό ρόλο στη διάχυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα, αναμένεται να έχει η δημιουργία θεσμικού πλαισίου υποστήριξης της διάχυσης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία (“BESS”) μέσω κρατικής επιδότησης (ακόμη και για **100%** επιδότηση). Στα πλαίσια αυτού, αξίζει να επισημανθεί ότι βασικοί παράγοντες για τη διάχυση των συστημάτων αποθήκευσης αποτελούν ο ετήσιος συντελεστής μείωσης της τιμής των μπαταριών (ο οποίος μοντελοποιείται στα πλαίσια της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM”), καθώς επίσης και το κεφαλαιουχικό κόστος αγοράς και εγκατάστασής τους (€/kWh).

7.2. Μελλοντική έρευνα

Πιθανοί τομείς μελλοντικής έρευνας για την περαιτέρω ανάπτυξη του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης βάσει πρακτόρων “ATOM”, αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω:

- Εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης “ATOM” για τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για τα οποία έχει ήδη αναπτυχθεί το υποστηρικτικό πλαίσιο μοντελοποίησης μέσα από την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία (δηλ. Γαλλία, Δανία, Ισπανία, και Πορτογαλία).
- Κατάλληλη προσαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” με στόχο την εφαρμογή του και για άλλες τεχνολογίες που υποστηρίζουν την ενεργειακή μετάβαση, όπως είναι τα ηλεκτρικά οχήματα (“electric vehicles”), οι αντλίες θερμότητας (“heat pumps”), ή οι έξυπνοι μετρητές/θερμοστάτες (“smart meters/smart thermostats”).
- Περαιτέρω ανάπτυξη του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για τη μοντελοποίηση του διαθέσιμου εισοδήματος των «πρακτόρων» (πολίτες, καταναλωτές). Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο να γίνει μελέτη σχετικά με τον τρόπο που επιδρά το διαθέσιμο εισόδημα στη λήψη αποφάσεων των «πρακτόρων».
- Περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη του υπολογιστικού εργαλείου “ATOM” για την προσομοίωση της εξέλιξης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε κάθε σενάριο και κοινωνικοοικονομικό μονοπάτι ενεργειακής μετάβασης του υπολογιστικού εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης.

⁴⁷ Μέχρι και σήμερα (2023), η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα της Ελλάδας, ισούται με 352 MW.

- Δυναμική μεταβολή του μεγέθους της αδράνειας ως προς την επένδυση (“inertia to invest”) καθώς εξελίσσεται η προσομοίωση του κάθε σεναρίου. Η ιδέα αυτή βασίζεται στο ότι όσο διευρύνεται κοινωνικά η αποδοχή της τεχνολογίας και άρα αυξάνεται το πλήθος των υλοποιήσεων της επένδυσης, η αδράνεια ως προς την επένδυση θα πρέπει να μειώνεται (και το αντίστροφο σε περίπτωση που η τεχνολογία δεν καθίσταται κοινωνικά αποδεκτή).
- Ο τρόπος με τον οποίο συσχετίζεται το πλήθος των αιτήσεων για εγκατάσταση, με την εγκατεστημένη ισχύ, θα μπορούσε να παίξει υποστηρικτικό ρόλο στην κατανόηση της διάχυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα (από ποιους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες επηρεάζεται η απόφαση των αυτοπαραγωγών σχετικά με το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος που αποφασίζουν να εγκαταστήσουν).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ & ΠΗΓΕΣ

Abbass K., Qasim M. Z., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. 2022. A review of the global climate change impacts, adaptation and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*. Volume 29. 42539-42559.

Anagnostopoulos P., Spyridaki N. A., Flamos A. 2017. A "New-Deal" for the Development of Photovoltaic Investments in Greece? A Parametric Techno-Economic Assessment. *Energies*. Volume 10. Article 1173.

Bizet R., Bonev P., Leveque F. 2022. The effect of local monitoring on nuclear safety and compliance: Evidence from France. *Journal of Environmental Economics and Management*. Volume 113. Article 102651.

Bodis K., Kougiaris I., Jager-Waldau A., Taylor N., Szabo S. 2019. A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 114. Article 109309.

Bonabeau E. 2002. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Volume 99. 7280-7287.

BP. 2022. Statistical Review of World Energy. London. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.

Camilo F. M., Castro R., Almeida M. E., Pires V. F. 2017. Economic assessment of residential PV systems with self-consumption and storage in Portugal. *Solar Energy*. Volume 150. 353-362.

Champy J.-L., Castro O. U. 2022. Electricity storage in France: New calls for tenders will be launched. White & Case. Paris. <https://www.whitecase.com/sites/default/files/2022-06/client-alert-stockage-electricite%C3%A9-juin-2022.pdf>.

Chatterjee S., Stavrakas V., Oreggioni G., Süsler D., Staffell I., Lilliestam J., Molnar G., Flamos A., Ürgüç-Vorsatz D. 2022. Existing tools, user needs and required model adjustments for energy demand modelling of a carbon-neutral Europe. *Energy Research & Social Science*. Volume 90. Article 102662.

Christoforidis G., Panapakidis I., Papadopoulos T., Papagiannis G., Koumparou I., Hadjipanayi M., Georgiou G. 2016. A Model for the Assessment of Different Net-Metering Policies. *Energies*. Volume 9(4). 262.

Ciarreta A., Espinoza M., Pizarro-Irizar C. 2017. Optimal regulation of renewable energy: A comparison of Feed-in Tariffs and Tradable Green Certificates in the Spanish electricity system. *Energy Economics*. Volume 67. 387-399.

Climate Action Network. 2022. Rooftop Solar PV Country Comparison Study: Country Profiles. <https://caneurope.org/content/uploads/2022/05/Rooftop-Solar-PV-Comparison-Country-Profiles.pdf>.

Comello S., Reichelstein S. 2017. Cost competitiveness of residential solar PV: The impact of net metering restrictions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 75. 46-57.

CRE Commission de Regulation de l'Energie. 2018. Délibération de la Commission de régulation de l'énergie du 15 février 2018 portant orientations et recommandations sur l'autoconsommation. Paris. 13-17. <https://www.cre.fr/Documents/Deliberations/Orientation/autoconsommation>.

CRE Commission de Regulation de l'Energie. 2021. Deliberation of the French Energy Regulatory Commission of 21 January 2021 on the tariffs for the use of public distribution electricity grids (TURPE 6 HTA-BT). Paris. 75-77. <https://www.cre.fr/en/Documents/Deliberations/Decision/tariffs-for-the-use-of-public-distribution-electricity-grids-turpe-6-hta-bt>.

CRE Commission de Regulation de l'Energie. 2022. La CRE publie les nouveaux tarifs d'achat applicables aux installations photovoltaïques de puissance installée comprise entre 0 et 500 kWc. Paris. <https://www.cre.fr/Actualites/la-cre-publie-les-nouveaux-tarifs-d-achat-applicables-aux-installations-photovoltaïques-de-puissance-installee-comprise-entre-0-et-500-kwc>.

Danchev S., Maniatis G., Tsakanikas A. 2010. Returns on investment in electricity producing photovoltaic systems under de-escalating feed-in tariffs: The case of Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 14. 500-505.

Danish, Khan S. U. D., Ahmad A. 2021. Testing the pollution haven hypothesis on the pathway of sustainable development: Accounting the role of nuclear energy consumption. Nuclear Engineering and Technology. Volume 53. 2746-2752.

Danish Energy Agency. 2020. Guidance on the hybrid CfD and award criterion. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Udbud_aktuelle/guidance_on_the_hybrid_cfd_and_award_criterion.pdf

Danish Ministry of Climate Energy and Utilities. 2019. Denmark's Integrated National Energy and Climate Plan. 112. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/dk_final_necp_main_en_0.pdf.

Danish Ministry of Climate Energy and Utilities. 2022. Regeringen vil udskyde lukning af tre kraftværker. <https://kefm.dk/aktuelt/nyheder/2022/okt/regeringen-vil-udskyde-lukning-af-tre-kraftvaerker->

DAPEEP. 2022. RES & CHP Summary Information Sheet. Athens. <https://www.dapeep.gr/dimosieuseis/sinoptiko-pliroforiako-deltio-ape/>.

Djikuc M., Goraczowska J., Piwowar A., Djikuc M., Smolenski R., Kulyk P. 2021. The analysis of the innovative potential of the energy sector and low-carbon development: A case study for Poland. Energy Strategy Reviews. Volume 38. Article 100769.

Djikuc M., Piwowar A., Djikuc M. 2022. The importance and potential of photovoltaics in the context of low-carbon development in Poland. Energy Storage and Saving. Volume 1. 162-165.

Dufo-Lopez R., Bernal-Agustin J. L. 2015. A comparative assessment of net metering and net billing policies: Study cases for Spain. Energy. Volume 84. 684-694.

European Commission. 2020. Portugal: Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030. 18-24. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2019-03/ec_courtesy_translation_pt_necp_0.pdf.

European Commission. 2022a. Energy Balances 2022. European Union. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_balances/enbal.html?geo=EU27_2020&unit=KTOE&language=EN&year=2021&fuel=fuelMainFuel&siec=TOTAL&details=0&chartOptions=0&stacking=normal&chartBal=&chart=&full=0&chartBalText=&order=DESC&siecs=&dataset=nrg_bal_s&decimals=0&aggregates=0&fuelList=fuelElectricity,fuelCombustible,fuelNonCombustible,fuelOtherPetroleum,fuelMainPetroleum,fuelOil,fuelOtherFossil,fuelFossil,fuelCoal,fuelMainFuel.

European Commission. 2022b. Quarterly Report On European Electricity Markets. Market Observatory for Energy. 26. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/energy_climate_change_environment/quarterly_report_on_european_electricity_markets_q1_2022.pdf.

European Environment Agency. 2023. Atmospheric greenhouse gas concentrations. Copenhagen. <https://www.eea.europa.eu/ims/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations>.

Fernandez-Gonzalez R., Arce E., Garza-Gil D. 2021. How political decisions affect the economy of a sector: The example of photovoltaic energy in Spain. Energy Reports. Volume 7. 2940-2949.

Foles A., Fialho L., Collares-Pereira M. 2020. Techno-economic evaluation of the Portuguese PV and energy storage residential applications. Sustainable Energy Technologies and Assessments. Volume 39. Article 100686.

Frieden D., Tuerk A., Antunes A. R., Vasilakis A., Chronis A. G., Herbeumont S., Kirac M., Marouco R., Neumann C., Catalayud E. P., Primo N., Gubina A. F. 2021. Are we on the right track? Collective Self-Consumption and Energy Communities in the European Union. Sustainability. Volume 13. Article 12494.

Frieden D., Tuerk A., Neumann C., d'Hermebont S., Roberts J. 2020. Collective self-consumption and energy communities: Trends and challenges in the transposition of the EU framework. Compile. 21-22. <https://www.rescoop.eu/uploads/rescoop/downloads/Collective-self-consumption-and-energy-communities.-Trends-and-challenges-in-the-transposition-of-the-EU-framework.pdf>.

Gaitanarou A., Stavrakas V., Tzani D., Flamos A. 2021. Μοντελοποίηση της ενεργειακής ζήτησης στον οικιακό τομέα της Ελλάδας. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας. Πειραιάς, Ελλάδα. 17-21.

- Gholami H., Rostvik H. N. 2020. Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe. *Energy*. Volume 204. Article 117931.
- Gomez-Exposito A., Arcos-Vargas A., Gutierrez-Garcia F. 2020. On the potential contribution of rooftop PV to a sustainable electricity mix: The case of Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 132. Article 110074.
- Gornowicz R., Castro R. 2020. Optimal design and economic analysis of a PV system operating under Net Metering or Feed-In-Tariff support mechanisms: A case study in Poland. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Volume 42. Article 100863.
- Grafstrom J., Poudineh R. 2021. A critical assessment of learning curves for solar and wind power technologies. The Oxford Institute for Energy Studies. United Kingdom. 5-7.
- Hansen A. R., Jacobsen M. H., Gram-Hanssen K. 2022. Characterizing the Danish energy prosumer: Who buys solar PV systems and why do they buy them. *Ecological Economics*. Volume 193. Article 107333.
- HELAPCO. 2019. Greek PV Market Investment Opportunities. Athens, Greece. <https://helapco.gr/en/greek-pv-market-investment-opportunities/>.
- Hellenic Ministry of Environment and Energy. 2023. National Energy and Climate Plan (NECP). Athens. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/el_final_necp_main_el_0.pdf.
- Henni S., Staudt P., Weinhardt C. 2021. A sharing economy for residential communities with PV-coupled battery storage: Benefits, pricing and participant matching. *Applied Energy*. Volume 301. Article 117351.
- IEA. 2018a. PVPS: National Survey Report of PV Power Applications in Denmark. PA Energy Ltd. Paris. 5-8. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/NSR_Denmark_2018.pdf.
- IEA. 2018b. PVPS: National Survey Report of PV Power Applications in Portugal. LNEG, APREN. Paris. 4-9. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/NSR_Portugal_2018.pdf.
- IEA. 2019. PVPS: National Survey Report of PV Power Applications in France. Agence De La Transition Ecologique. Paris. 5-7. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/09/NSR_France_2019.pdf.
- IEA. 2020. PVPS: National Survey Report of PV Power Applications in Spain. UNEF. Paris. 6-9. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/09/NSR_Spain_2020_b.pdf.
- IEA. 2021a. France 2021: Energy Policy Review. Paris. 28-29. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7b3b4b9d-6db3-4dcf-a0a5-a9993d7dd1d6/France2021.pdf>.
- IEA. 2021b. Portugal 2021: Energy Policy Review. Paris. 140-141. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a58d6151-f75f-4cd7-891e-6b06540ce01f/Portugal2021EnergyPolicyReview.pdf>.
- IEA. 2021c. PVPS: National Survey Report of PV Power Applications in France. Agence De La Transition Ecologique. Paris. 10-15. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/07/IEA-PVPS-NSR-France-EN-2021-v5.pdf>.
- IEA. 2021d. Spain 2021: Energy Policy Review. Paris. 77-78. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/2f405ae0-4617-4e16-884c-7956d1945f64/Spain2021.pdf>.
- IEA. 2022a. Poland 2022: Energy Policy Review. Paris. 22-23, 74-79, 164. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b9ea5a7d-3e41-4318-a69e-f7d456ebb118/Poland2022.pdf>.
- IEA. 2022b. Solar PV. <https://www.iea.org/reports/solar-pv>.
- IEA. 2022c. World Energy Outlook 2022. Paris. 281. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c282400e-00b0-4edf-9a8e-6f2ca6536ec8/WorldEnergyOutlook2022.pdf>.
- IEA. 2023. Greece 2023: Energy Policy Review. Paris. 28-29, 73. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5dc74a29-c4cb-4cde-97e0-9e218c58c6fd/Greece2023.pdf>.
- Iglinski B., Pietrzak M. B., Kielkowska U., Skrzatek M., Kumar G., Piechota G. 2022. The assessment of renewable energy in Poland on the background of the world renewable energy sector. *Energy*. Volume 261. Article 125319.

- Ignaciuk K. 2019. Poland: Electricity Promotion in Poland. RES LEGAL. <http://www.res-legal.eu/search-by-country/poland/tools-list/c/poland/s/res-e/t/promotion/sum/176/lpid/175/>.
- Institute for Renewable Energy. 2022. Photovoltaic Market in Poland. Warsaw. 27-39. <https://sklepiao.pl/en/51.html>.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Geneva, Switzerland. 3-36. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
- IRENA. 2019. Innovation landscape brief: Net billing schemes. Abu Dhabi. 13. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Net_billing_2019.pdf?la=en&hash=DD239111CB0649A9A9018BAE77B9AC06B9EA0D25.
- IRENA. 2022. Renewable Capacity Statistics 2022. Abu Dhabi. 24-25. <https://www.irena.org/Publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>.
- Jimeno M. 2019. Portugal: Feed-in tariff (Tarifas feed-in). RES LEGAL. <http://www.res-legal.eu/search-by-country/portugal/single/s/res-e/t/promotion/aid/feed-in-tariff-tarifas-feed-in/lastp/179/>.
- Kleanthis N., Stavarakas V., Ceglarz A., Süsser D., Schibline A., Lilliestam J., Flamos A. 2022. Eliciting knowledge from stakeholders to identify critical issues of the transition to climate neutrality in Greece, the Nordic Region and the European Union. Energy Research & Social Science. Volume 93. Article 102836.
- Koengkan M., Fuinhas J. A., Osmani F., Kazemzadeh E., Auza A., Alavijeh N. K., Teixeira M. 2022. Do financial and fiscal incentive policies increase the energy efficiency ratings in residential properties? A piece of empirical evidence from Portugal. Energy. Volume 241. Article 122895.
- Koko S. P. 2022. Optimal battery sizing for a grid-tied solar photovoltaic system supplying a residential load: A case study under South African solar irradiance. Energy Reports. Volume 8. 410-418.
- Koumparou I., Christoforidis G., Efthymiou V., Papagiannis G., Georghiou G. 2017. Configuring residential PV net-metering policies - A focus on the Mediterranean region. Renewable Energy. Volume 113. 795-812.
- Krumm A., Süsser D., Blechinger P. 2022. Modelling social aspects of the energy transition: What is the current representation of social factors in energy models? Energy. Volume 239. Article 121706.
- Kulpa J., Olczak P., Stecula K., Soltysik M. 2022. The Impact of RES Development in Poland on the Change of the Energy Generation Profile and Reduction of CO2 Emissions. Applied Sciences. Volume 12. Article 11064.
- Kumar P., Malik N., Garg A. 2022. Comparative analysis of solar-battery storage sizing in net metering and zero export systems. Energy for Sustainable Development. Volume 69. 41-50.
- Malec M. 2022. The prospects for decarbonisation in the context of reported resources and energy policy goals: The case of Poland. Energy Policy. Volume 161. Article 112763.
- Maroulis G. 2019. Electricity Promotion in Greece. RES LEGAL. <http://www.res-legal.eu/search-by-country/greece/tools-list/c/greece/s/res-e/t/promotion/sum/140/lpid/139/>.
- Mason R., Skirving W., Dove S. 2020. Integrating physiology with remote sensing to advance the prediction of coral bleaching events. Remote Sensing of Environment. Volume 246. Article 111794.
- Masson G., Kaizuka I. 2021. Trends In Photovoltaic Applications. IEA. Paris. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/01/IEA-PVPS-Trends-report-2021-4.pdf>.
- Michas S., Stavarakas V., Papadelis S., Flamos A. 2020. A transdisciplinary modeling framework for the participatory design of dynamic adaptive policy pathways. Energy Policy. Volume 139. Article 111350.
- Ministry of Climate and Environment. 2021. Energy Policy of Poland Until 2040. Warsaw. <https://www.gov.pl/web/climate/energy-policy-of-poland-until-2040-epp2040>.
- Ministry of Ecological and Solidary Transition. 2022. French Strategy for Energy and Climate - Multi-Annual Energy Plan (PPE). Paris. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PPE-Executive%20summary.pdf>.
- Ministry of Finance. 2022. Denmark's National Reform Programme 2022. The Danish Government. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/denmarks_national_reform_programme_2022_en.pdf.

- MITECO Ministry for the Ecological Transition and the Demographic Challenge. 2020. Long-term Decarbonization Strategy 2050. Madrid. https://www.miteco.gob.es/es/prensa/documentoelp_tcm30-516109.pdf.
- MITECO Ministry for the Ecological Transition and the Demographic Challenge. 2021. Energy Storage Strategy. Madrid. https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento_tcm30-522655.pdf.
- Nikas A., Gambhir A., Trutnevyte E., Koasidis K., Lund H., Thellufsen J., Mayer D., Zachmann G., Miguel L. J., Ferreras-Alonso N., Sognaes I., Peters G. P., Colombo E., Howells M., Hawkes A., Van-den-Broek M., Van-de-Ven D., Gonzales-Eguino M., Flamos A., Doukas H. 2021. Perspective of comprehensive and comprehensible multi-model energy and climate science in Europe. *Energy*. Volume 215. Article 119153.
- Nikas A., Stavrakas V., Arsenopoulos A., Doukas H., Antosiewicz M., Witajewski-Baltvilks J., Flamos A. 2020. Barriers to and consequences of a solar-based energy transition in Greece. *ENvironmental Innovation and Societal Transitions*. Volume 35. 383-399.
- Olesen G. B. 2020. Energy Communities in Denmark: Good examples and concerns. *International Network for Sustainable Energy*.
- Ordóñez A., Sánchez E., Rozas L., García R., Parra-Dominguez J. 2022. Net-metering and net-billing in photovoltaic self-consumption: The cases of Ecuador and Spain. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Volume 53. Article 102434.
- Oriol L. 2018. Self-consumption framework in France. Ministry of Ecological and Solidary Transition (METS). Paris.
- Papadelis S., Flamos A., Androulaki S. 2012. Setting the framework for a Business Strategy Assessment Model. *International Journal of Energy Sector Management*. Volume 6. 488-517.
- Papadelis S., Stavrakas V., Flamos A. 2016. What Do Capacity Deployment Rates Tell Us about the Efficiency of Electricity Generation from Renewable Energy Sources Support Measures in Greece? *Energies*. Volume 9. Article 38.
- Papantonis D., Tzani D., Burbidge M., Stavrakas V., Bouzarovski S., Flamos A. 2022. How to improve energy efficiency policies to address energy poverty? Literature and stakeholder insights for private rented housing in Europe. *Energy Research & Social Science*. Volume 93. Article 102832.
- Pereira A. A., Pereira M. A. 2022. Energy storage strategy analysis based on the Choquet multi-criteria preference aggregation model: The Portuguese case. *Socio-Economic Planning Sciences*. Article 101437.
- Pestana D. G., Rodrigues S., Morgado-Dias F. 2018. Environmental and economic analysis of solar systems in Madeira, Portugal. *Utilities Policy*. Volume 55. 31-40.
- Plackett B. 2022. Why France's nuclear industry faces uncertainty. *Nature*. Article. doi: 10.1038/d41586-022-02817-2.
- Prol J. L., Steininger K. 2020. Photovoltaic self-consumption is now profitable in Spain: Effects of the new regulation on prosumers' internal rate of return. *Energy Policy*. Volume 146. Article 111793.
- Rai V., Douglas A. 2016. Agent-based modelling of consumer energy choices. *Natural Climate Change*. Volume 6. 556-562.
- Railsback S. F., Grimm V. 2019. *Agent-Based and Individual-Based Modeling*. Princeton University Press. USA. 2nd Edition. 9-12.
- REN21. 2022. Renewables 2022: Global Status Report. Paris. 126,180. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf.
- Rovekamp P., Schopf M., Wagon F., Weibelzahl M., Fridgen G. 2021. Renewable electricity business models in a post feed-in tariff era. *Energy*. Volume 216. Article 119228.
- Süsser D., Ceglarz A., Gaschnig H., Stavrakas V., Giannakidis G., Flamos A., Sander A., Lilliestam J. 2020. The use of energy modelling results for policymaking in the EU. Deliverable 1.1. Sustainable Energy Transitions Laboratory (SENTINEL) project. European Commission.

- Süsser D., Gaschnig H., Ceglarz A., Stavrakas V., Flamos A., Lilliestam J. 2022a. Better suited or just more complex? On the fit between user needs and modeller-driven improvements of energy system models. *Energy*. Volume 239. Article 121909.
- Süsser D., Martin N., Stavrakas V., Gaschnig H., Talens-Peiro L., Flamos A., Madrid-Lopez C., Lilliestam J. 2022b. Why energy models should integrate social and environmental factors: Assessing user needs, omission impacts and real-word accuracy in the European Union. *Energy Research & Social Science*. Volume 92. Article 102775.
- Süsser D., Pickering B., Chatterjee S., Oreggioni G., Stavrakas V., Lilliestam J. 2021. Integration of socio-technological transition constraints into energy demand and systems models. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS). Deliverable 2.5 Sustainable Energy Transitions Laboratory (SENTINEL). Potsdam. Germany. 10-11.
- SolarPower Europe. 2021. European Market Outlook for Residential Battery Storage. 10-16. <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/european-market-outlook-for-residential-battery-storage-2021-2025>.
- Spyridaki N. A., Stavrakas V., Dendramis Y., Flamos A. 2020. Understanding technology ownership to reveal adoption trends for energy efficiency measures in the Greek residential sector. *Energy Policy*. Volume 140. Article 111413.
- Stavrakas V., Flamos A. 2020. A modular high-resolution demand-side management model to quantify benefits of demand-flexibility in the residential sector. *Energy Conversion and Management*. Volume 205. Article 112339.
- Stavrakas V., Flamos A. 2022. Exploring regulatory designs and product-service offerings to empower end-users and incentivise demand flexibility: A modelling framework in support to low-carbon energy systems. Doctoral Dissertation Thesis. University of Piraeus. Department of Industrial Management & Technology. Piraeus, Greece. 87-111.
- Stavrakas V., Kleanthis N., Flamos A. 2020. An Ex-Post Assessment of RES-E Support in Greece by Investigating the Monetary Flows and the Causal Relationships in the Electricity Market. *Energies*. Volume 13. Article 4575.
- Stavrakas V., Papadelis S., Flamos A. 2019. An agent-based model to simulate technology adoption quantifying behavioural uncertainty of consumers. *Applied Energy*. Volume 225. Article 113795.
- Stavrakas V., Spyridaki N. A., Flamos A. 2018. Striving towards the Deployment of Bio-Energy with Carbon Capture and Storage (BECCS): A Review of Research Priorities and Assessment Needs. *Sustainability*. Volume 10(7). Article 2206.
- Sun N.-Z., Sun A. 2015. Model calibration and parameter estimation for environmental and water resource systems. Springer. USA. 2015th Edition. 23.
- Suri M., Betak J., Rosina K., Chrkavy D., Suriova N., Cebacauer T., Caltik M., Erdelyi B. 2020. Global Photovoltaic Power Potential by Country. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). World Bank Group. Washington DC. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/466331592817725242/pdf/Global-Photovoltaic-Power-Potential-by-Country.pdf>.
- Toporek M., Campos I. 2019. Assessment of existing EU-wide and Member State specific regulatory and policy frameworks of RES prosumers. PROSEU - Prosumers for the Energy Union: Mainstreaming active participation of citizens in the energy transition. Deliverable N°3.1.
- Trela M., Dubel A. 2022. Net-Metering vs. Net-Billing from the Investors Perspective - Impacts of Changes in RES Financing in Poland on the Profitability of a Joint Photovoltaic Panels and Heat Pump System. *Energies*. Volume 15. 227.
- Tsantopoulos G., Arabatzis G., Tampakis S. 2014. Public attitudes towards photovoltaic developments: Case study from Greece. *Energy Policy*. Volume 71. 94-106.
- Tzani D., Stavrakas V., Santini M., Thomas S., Rosenow J., Flamos A. 2022. Pioneering a performance-based future for energy efficiency: Lessons learnt from a comparative review analysis of pay-for-performance programmes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 158. Article 112162.
- United Nations. 1998. Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change. New York, USA. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.

United Nations. 2012. Doha amendment to the Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change. Doha, Qatar. https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/doha_amendment/application/pdf/attachment_sg_letter_doha_amendment.pdf.

United Nations. 2019. Emissions Gap Report 2019. New York, USA. 46-55.

Vlasis D., Stavrakas V., Flamos A. 2021. Ανάπτυξη υποστηρικτικού πλαισίου για την προσομοίωση σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας σε χώρες - μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών. Αθήνα, Ελλάδα. 21-24.

Vrapi M., Dagoumas A. 2020. Behaviour of energy prosumers: Role and impact on the future energy system of the European Union. Bachelor Thesis. University of Piraeus. Department of International and European Studies. Piraeus, Greece. 30.

Wedzik A., Siewierski T., Szykowski M. 2017. Green certificates market in Poland - The sources of crisis. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 75. 490-503.

Wicki L., Pietrzykowski R., Kusz D. 2022. Factors Determining the Development of Prosumer Photovoltaic Installations in Poland. Energies. Volume 15. Article 5897.

Wikberg K. 2019. Denmark: Premium tariff (Law on the Promotion of Renewable Energy). RES LEGAL. <http://www.res-legal.eu/search-by-country/denmark/single/s/res-e/t/promotion/aid/premium-tariff-law-on-the-promotion-of-renewable-energy/lastp/96/>.

Yu H. J. J. 2018. A prospective economic assessment of residential PV self-consumption with batteries and its systemic effects: The French case in 2030. Energy Policy. Volume 113. 673-687.

Zakeri B., Cross S., Dodds P. E., Gisse G. C. 2021. Policy options for enhancing economic profitability of residential solar photovoltaic with battery energy storage. Applied Energy. Volume 290. Article 116697.

Zdonek I., Tokarski S., Mularczyk A., Turek M. 2022. Evaluation of the Program Subsidizing Prosumer Photovoltaic Sources in Poland. Energies. Volume 15. Article 846.

Zeldin-O'Neill S., Chadwick P., Viner K. 2019. "It's a crisis, not a change": the six Guardian language changes on climate matters. The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2019/oct/16/guardian-language-changes-climate-environment>.

Zhang F., Li Y., Li F., Yuan J., Li Y. 2022. Decision-making behavior of power suppliers in the green certificate market: A system dynamics analysis. Energy Policy. Volume 171. Article 113296.

Ziras C., Calearo L., Marinelli M. 2021. The effect of net metering methods on prosumer energy settlements. Sustainable Energy, Grids and Networks. Volume 27. Article 100519.

Zissler R. 2022. France's nuclear power: Current Difficulties, New Policies and 100% Renationalization. Renewable Energy Institute. <https://www.renewable-ei.org/en/activities/column/REupdate/20220823.php>.