



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΜΠΑΛΚΟΝΙΩΝ ΚΑΙ Η ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ
ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΟΙΚΙΑΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ**

υπό

ΧΑΤΖΗΛΙΑΔΟΥ ΕΛΙΣΑΒΕΤ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Πανεπιστημίου Θεσσαλίας 2022

Μεταπτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Βόλος, 2025

© 2025 Χατζηλιάδου Ελισάβετ

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Δημήτρης Βαλουγεώργης Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Παναγιώτης Τσιακάρας, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της διαδρομής, νιώθω βαθιά ευγνωμοσύνη για τους ανθρώπους που με στήριξαν με τον δικό τους, μοναδικό τρόπο.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μπουζάκη Εμμανουήλ, για την ευγένεια, την υπομονή και τη διακριτική στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η κατανόηση και η καθοδήγησή του έκαναν αυτή τη διαδικασία όχι μόνο πιο εύκολη, αλλά και πιο ανθρώπινη. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητές κ. Τσιακάρα Παναγιώτη και κ. Βαλουγεώργη Δημήτρη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στη Γραμματεία της σχολής, κ. Ντόρα Παππά, για την αδιάκοπη βοήθεια, την ευγένεια και την άμεση ανταπόκρισή της, σε κάθε απορία και δυσκολία που προέκυπτε στην πορεία των σπουδών μου, για την κατανόησή της, την βοήθεια της ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου για το τέλος του διπλώματός μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους ανθρώπους που συμμετείχαν στο ερωτηματολόγιο και προσέφεραν τον χρόνο και τις σκέψεις τους. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, στους ανθρώπους μου, Ανανία και Βασιλική, που πίστεψαν πρώτα από όλους στις ικανότητες μου. Ήταν, είναι και θα είναι η κινητήριος δύναμη μου. Τον πατέρα μου και την μητέρα μου, για τη σιωπηλή τους δύναμη, για την υποστήριξή τους, που έμοιαζε σταθερή σαν θεμέλιο, και για τον τρόπο που πάντα ήξεραν πότε να μιλήσουν και πότε απλώς να σταθούν δίπλα μου, με τον δικό τους διακριτικό αλλά τόσο καθοριστικό τρόπο. Για όλα όσα έκαναν για μένα — με θυσίες, με κόπο, με αφοσίωση που δεν χωρά εύκολα σε λόγια, με παρότρυναν να πετύχω, γιατί η επιτυχία είναι μονόδρομος με τέτοιους γονείς.

Χωρίς εκείνους τίποτα δεν θα ήταν το ίδιο. Αφιερώνω αυτήν την εργασία σε αυτούς.

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΜΠΑΛΚΟΝΙΩΝ ΚΑΙ Η ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΟΙΚΙΑΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΧΑΤΖΗΛΙΑΔΟΥ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2025

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης,
Αναπληρωτής Καθηγητής Κατεργασιών Μορφοποίησης Υλικών

Περίληψη

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αποτελούν μία έξυπνη και καινοτόμο λύση για την παραγωγή πράσινης ενέργειας στο αστικό πεδίο και σε επίπεδο κατοικιών. Η διείσδυσή τους μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος στην οικιακή κατανάλωση. Πρόκειται για μικρής κλίμακας αυτόνομα ή διασυνδεδεμένα συστήματα, τα οποία εγκαθίστανται σε μπαλκόνια ή σε προσόψεις πολυκατοικιών χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων τεχνικών παρεμβάσεων, καθώς συνήθως συνδέονται σε ένα ρευματοδότη, και χωρίς να απαιτείται μεγάλη δαπάνη για την εγκατάστασή τους. Η ισχύς τους κυμαίνεται συνήθως από 500 έως 600 Wp ανά μονάδα, ισχύς η οποία είναι επαρκής ώστε να καλύψει έως και το 20-30% της ημερήσιας κατανάλωσης ενός μέσου νοικοκυριού. Σε συνδυασμό με μικροαντιστροφείς, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς τάσης μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενης τάσης και μπορεί να τροφοδοτεί απευθείας τις ηλεκτρικές καταναλώσεις ενός νοικοκυριού, χωρίς να απαιτείται η διασύνδεση του συστήματος με το γενικό πίνακα των κατοικιών ή με τη μετρητική διάταξη του διαχειριστή του δικτύου.

Το κόστος ενός τέτοιου συστήματος είναι συνήθως μικρότερο από 1.000€, καθιστώντας το ιδιαίτερα προσιτό. Η συμβολή των φωτοβολταϊκών μπαλκονιών στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η χρήση τους μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά 300–500 κιλά ετησίως ανά νοικοκυριό, ενώ απαντούν στο πρόβλημα της ανεπάρκειας κοινοχρήστων χώρων για εγκατάσταση κλασσικών φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης. Ωστόσο, η ανάπτυξή τους στην Ελλάδα και σε άλλες χώρες είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω έλλειψης ξεκάθαραυ θεσμικού πλαισίου. Επιπλέον, εντοπίζονται περιορισμοί που αφορούν στην ασφάλεια των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων απουσία αυστηρών προϋποθέσεων, ενώ παράλληλα έχει ενδιαφέρον το ζήτημα της κοινωνικής τους αποδοχής. Σε κάθε περίπτωση, μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος στην οικιακή κατανάλωση, μπορούν να δράσουν ως καταλύτης της πράσινης ενεργειακής μετάβασης και μπορούν να ενισχύσουν τον εκδημοκρατισμό της πρόσβασης στην ηλεκτρική ενέργεια.

Abstract

Balcony photovoltaic systems are a smart and innovative solution for the production of green energy in the urban field and at the residential level. Their penetration can significantly contribute to reducing the carbon footprint of household consumption. These are small-scale autonomous or interconnected systems, which are installed on balconies or facades of apartment buildings without the need for complex technical interventions, as they are usually connected to a power supply, and without requiring a large expense for their installation. Their power usually ranges from 500 to 600 Wp per unit, which is sufficient to cover up to 20-30% of the daily consumption of an average household. In combination with microinverters, the generated direct voltage electricity is converted into alternating voltage electricity and can directly supply the electricity consumption of a household, without the need to interconnect the system with the general table of homes or with the grid operator's metering device. The cost of such a system is usually less than €1,000, making them particularly affordable. The contribution of balcony photovoltaics to the reduction of the carbon footprint is particularly important, as their application can reduce CO₂ emissions by 300–500 kg per year per household, while they respond to the problem of insufficient shared spaces for the installation of classic rooftop photovoltaic systems. However, their development in Greece and other countries is limited, mainly due to the lack of a clear institutional framework. In addition, restrictions regarding the safety of electrical installations are identified in the absence of strict conditions, while at the same time the issue of their social acceptance is interesting. In any case, they can lead to a significant reduction in the carbon footprint of household consumption, can act as a catalyst for the green energy transition and can enhance the democratisation of access to electricity.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	7
Πίνακας περιεχομένων	8
Κατάλογος εικόνων	10
1. Εισαγωγή.....	12
2. ΑΠΕ και ηλιακή ενέργεια	20
2.1. Ηλιακή ακτινοβολία	20
2.2. Η ηλιακή ενέργεια.....	20
2.2.1. Παραγωγή θερμικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια	21
2.2.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια	22
2.2.3. Ηλιακή ενέργεια και βιοκλιματικός σχεδιασμός	22
3. Φωτοβολταϊκά συστήματα	24
3.1. Εισαγωγή.....	24
3.2. Χαρακτηριστικά και κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων	31
3.3. Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πάνελ	32
3.4. Κύριοι τύποι φωτοβολταϊκών πάνελ	36
3.4.1. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	37
3.4.2. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	38
3.4.3. Άμορφο πυρίτιο	38
3.5. Φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς.....	39
3.6. Τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων	41
4. Φωτοβολταϊκά μπαλκονιών.....	44

4.1.	Εισαγωγή.....	44
4.2.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	49
4.3.	Οφέλη και περιορισμοί.....	67
4.4.	Στατιστικά στοιχεία.....	84
5.	Μελέτη Περίπτωσης: Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού Συστήματος Μπαλκονιού σε Οικιακή Κατοικία στη Λάρισα.....	87
5.1	Η έλλειψη θεσμικού πλαισίου στην Ελλάδα	87
5.2	Περιγραφή περίπτωσης – Διαμέρισμα στο κέντρο της Λάρισας	87
5.3	Ανάλυση εξοικονόμησης και ανθρακικού αποτυπώματος	89
5.4	Παρατηρήσεις	89
5.5	Ερωτηματολόγιο	90
6.	Συμπεράσματα.....	92
	Βιβλιογραφία	100

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Τυπική διάταξη φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών (Gerber, et al., 2025)	14
Εικόνα 2.Μετακίνηση Φορτίων σε Φωτοενεργό Υλικό	22
Εικόνα 3.Πεδία φωτοβολταϊκών πάνελ σε γραμμική διάταξη, αξιοποιώντας τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή καθαρής και βιώσιμης ενέργειας	24
Εικόνα 4: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Brus, 1984)	25
Εικόνα 5: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικής κυψέλης (Izadian, et al., 2012)	25
Εικόνα 6: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικής κυψέλης (Izadian, et al., 2012)	26
Εικόνα 7: Καμπύλη I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης (Salas, et al., 2006)	27
Εικόνα 8: Καμπύλες I V φωτοβολταϊκής κυψέλης για διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος (Hady, 2017)	27
Εικόνα 9: Καμπύλες I V φωτοβολταϊκής κυψέλης για διαφορετική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμοκρασία 75°C(Hady, 2017)	28
Εικόνα 10: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών σταθμών και παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκούς σταθμούς, παγκοσμίως, ανά περιοχή (International Energy Agency, 2018)	29
Εικόνα 11: Ηλιακό δυναμικό στην Ευρώπη (Solargis, 2019)	30
Εικόνα 12: Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων	31
Εικόνα 13: Μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά πάνελ και πάνελ άμορφου πυριτίου (EnergySage, 2020)	33
Εικόνα 14: Διαφορές μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών πάνελ (EnergySage, 2020)	34
Εικόνα 15: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	36
Εικόνα 16: Καμπύλη I-V για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο	40
Εικόνα 17.Plug-and-play πάνελ τοποθετημένα σε κάγκελο, έτοιμα προς χρήση χωρίς ηλεκτρολόγο	45
Εικόνα 18.Γραμμική διάταξη πάνελ σε μπαλκόνι, στερεωμένα με δομή βάσης	46

Εικόνα 19.Εύκολα τοποθετούμενο και αποσπώμενο πάνελ, ιδανικό για ενοικιαστές ή αλλαγή κατοικίας	46
Εικόνα 20.Κλασική λύση με κάγκελο, σε αστικό περιβάλλον, με μόνιμη στήριξη.....	46

1. Εισαγωγή

Οι αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής γίνονται ολοένα και περισσότερο πιο αντιληπτές γεγονός το οποίο έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη συνειδητοποίηση γύρω από την ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Το ενδιαφέρον αυτό παρατηρείται τόσο σε ατομικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο κρατών και διεθνών οργανισμών. Καταγράφεται ότι η ανάγκη για μετάβαση σε μοντέλα βιώσιμης ανάπτυξης είναι πλέον αδήριτη προκειμένου να μπορέσει να υποστηριχθεί το υφιστάμενο οικονομικό μοντέλο χωρίς να συνεχίσει να επιβαρύνεται το περιβάλλον εξαιτίας της αλόγιστης χρήσης φυσικών και ορυκτών πόρων για την υποστήριξη της οικονομικής ανάπτυξης.

Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για μείωση των εκπομπών των αερίων ρύπων του θερμοκηπίου, για τον περιορισμό της εξάρτησης από τους φυσικούς πόρους και τα ορυκτά καύσιμα, για την ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας και για τον εκδημοκρατισμό της πρόσβασης στην ενέργεια μετουσιώνεται τόσο σε διαρκείς βελτιώσεις των ρυθμιστικών πλαισίων τα οποία αφορούν στην εγκατάσταση σταθμών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όσο και στη διαρκή αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Μεταξύ άλλων, η ηλιακή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών τόσο σε ηλεκτρική όσο και σε θερμική ενέργεια. Πρόκειται για μια απεριόριστη και καθαρή πηγή ενέργειας, με τα ηλιοθερμικά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα να αποτελούν αποδοτικές λύσεις για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο αντίστοιχα.

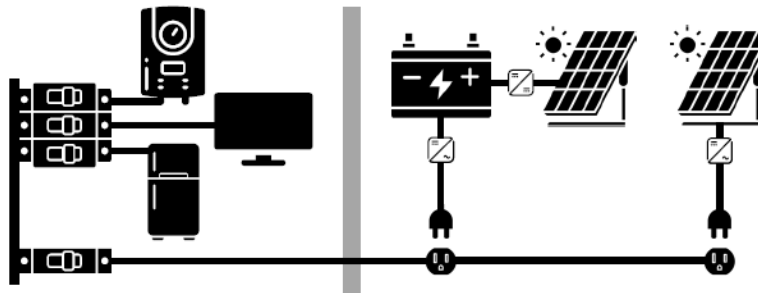
Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων και στην τεχνολογία των μπαταριών, όπως και η αποκλιμάκωση του κόστους του απαιτούμενου εξοπλισμού για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει δώσει σημαντική ώθηση στην εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

από την ηλιακή ενέργεια. Μολονότι το κόστος για την κατασκευή μεγάλων φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν έχει μειωθεί σημαντικά, εντούτοις καταγράφεται σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής μικρής κλίμακας φωτοβολταϊκών σταθμών η οποία έχει οδηγήσει στην αύξηση των εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κατοικίες και μικρές επιχειρήσεις.

Σημαντική δε περιορισμοί τίθενται σε ότι αφορά στα υφιστάμενα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία σε πολλές περιοχές της Ευρώπης και δη της Ελλάδας είναι κορεσμένα και δεν μπορούν να υποστηρίξουν την εγκατάσταση μεγάλων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σε αυτή την κατεύθυνση, η ενίσχυση της διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποκτά ολοένα και περισσότερη σημασία, καθώς περισσότεροι μικροί καταναλωτές μπορούν να παράγουν μέρος ή ακόμα και το σύνολο τις απαιτούμενες ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των κατοικιών ή επιχειρήσεων τους, οδηγώντας σε μείωση από την εξάρτησή τους από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, η στροφή στη διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεισφέρει στη βελτίωση της ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής να μειώνεται, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία των εφαρμογών των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών ή γενικά τα φωτοβολταϊκά συστήματα προσόψεων προς εγκατάσταση σε πολυκατοικίες. Τα συστήματα αυτά είναι μικρής κλίμακας φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία μπορούν να εγκαθίστανται σε μικρές επιφάνειες στις προσόψεις των κτηρίων, όπως στα κάγκελα των μπαλκονιών ίσως κάθετους τοίχους των πολυκατοικιών. Τα συστήματα αυτά μπορούν να λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε διασυνδεδεμένα με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Για την εγκατάστασή τους δεν απαιτείται η εκτέλεση μεγάλης κλίμακας ηλεκτρολογικών εργασιών καθώς συνήθως τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών συνδέονται σε κάποιο ρευματοδότη τοπικά στον ηλεκτρικό πίνακα των κατοικιών ή των επιχειρήσεων.

Παρακάτω παρατίθεται μια γραφική αναπαράσταση της διάταξης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πάνελ, μικρής κλίμακας αντιστροφείς γνωστούς και ως μικρό αντιστροφείς, μπορεί να διαθέτουν μπαταρίες για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας αν δεν υπάρχει κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εκείνη τη στιγμή και συνδέονται συνήθως σε ρευματοδότες προκειμένου να τροφοδοτήσουν την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση των κατοικιών:



Εικόνα 1: Τυπική διάταξη φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών (Gerber, et al., 2025)

Μάλιστα δεδομένου ότι μεγάλο μέρος των κατοίκων στα αστικά κέντρα δεν είναι ιδιοκτήτες των κατοικιών αλλά τις ενοικιάζουν, με αποτέλεσμα να έχουν είτε περιορισμένη πρόσβαση στην κοινόχρηστη ταράτσα ή στο κοινόχρηστο δώμα της πολυκατοικίας είτε να μην μπορούν να προχωρήσουν σε εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στέγης καθώς κατά το πέρας της ενοικίασης είναι δύσκολο έως ανέφικτο να το αφαιρέσουν και να το μετακινήσουν στη νέα τους κατοικία, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να αποτελέσουν μια βιώσιμη λύση για την ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας των κατοίκων στα αστικά παιδιά ανεξάρτητα από το ιδιοκτησιακό καθεστώς και την επάρκεια των κοινοχρήστων χώρων στα δώματα και στις ταράτσες των πολυκατοικιών.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών ως μια τεχνική λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κυρίως του οικιστικού τομέα. Στόχος της παρούσης είναι να καταγραφούν και να αξιολογηθούν τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων του μπαλκονιών, να αναλυθούν οι δυνατότητες

εφαρμογής τους, οφέλη από την εγκατάστασή τους και περιορισμοί και προκλήσεις για την εγκατάστασή τους, ειδικά σε ότι αφορά στο ρυθμιστικό πλαίσιο και ειδικά σε ότι αφορά στην Ελλάδα.

Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στο ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει τη σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών με κατοικίες και γενικά με καταναλωτές χαμηλής τάσης, το οποίο αναφέρεται εκ προοιμίου ότι δεν προβλέπει αλλά και δεν αποκλείει την εγκατάσταση τέτοιων φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στην Ελλάδα. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τυχόν περιορισμοί οι οποίοι μπορεί να προκύψουν από τα ισχύοντα πρότυπα που διέπουν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και γενικά σταθμών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε καταναλωτές οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και προτείνονται σχετικές λύσεις μέσα από την ανάλυση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας.

Σε ότι αφορά στην αύξηση του ενδιαφέροντος γύρω από τη διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αυτή συνδέεται άρρηκτα με την ανάγκη βελτίωσης της ενεργειακής αυτάρκειας, εκδημοκρατισμού της πρόσβασης στην ηλεκτρική, αντιμετώπισης της ενεργειακής φτώχειας και εν γένει μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα προκειμένου να υποστηριχθεί το υφιστάμενο οικονομικό μοντέλο χωρίς να συνεχίσει να επιβαρύνεται το περιβάλλον με αέριος ρύπους του θερμοκηπίου.

Τα μικρής κλίμακας φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να αποτελέσουν χαρακτηριστικό παράδειγμα διεσπαρμένες παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς περιορίζονται στην κλίμακα μιας μικρής κατοικίας. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών εμπίπτουν σε αυτή τη γενικότερη κατηγορία της μικρής κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς χαρακτηρίζονται από μικρή εγκατεστημένη ισχύ, εύκολη τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνελ και του λοιπού εξοπλισμού, και περιορισμένης κλίμακας τεχνικές παρεμβάσεις για την εγκατάσταση και θέση σε λειτουργία των συστημάτων αυτών.

Στην πράξη, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών συνήθως αποτελούνται από ένα μικρό αριθμό, συνήθως ένα ή δύο φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία συνδέονται με έναν

μικρό αντιστροφέα (micro inverter), ο οποίος μπορεί να μετατρέπει επιτόπου την παραγόμενη DC ηλεκτρική ενέργεια σε AC ηλεκτρική ενέργεια, και να τροφοδοτεί απευθείας στην εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση της κατοικίας είτε συνδεδεμένος με τον ηλεκτρικό πίνακα της κατοικίας είτε συνδεδεμένος με κάποιον ρευματοδότη στο μπαλκόνι της κατοικίας.

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών βασίζεται στις ίδιες ακριβώς αρχές οι οποίες διέπουν τη λειτουργία μεγαλύτερης κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων, με ειδοποιούς διαφορές να εντοπίζονται σε ότι αφορά στην κλίση και τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πάνελ, αλλά και στις σκιάσεις των φωτοβολταϊκών πάνελ. Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα μεγάλης κλίμακας τα οποία συνήθως εγκαθίστανται επί γηπέδων ή σε μεγάλα δώματα μονοκατοικιών ή επιχειρήσεων, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών εγκαθίστανται επί της προσόψεως των μπαλκονιών, άρα έχουν κάθετη κλίση και προσανατολισμό ίδιο με τον προσανατολισμό του μπαλκονιών, ενώ δεδομένου ότι το αστικό πεδίο είναι πυκνοκατοικημένο, συχνά μπορεί να υπάρχουν σκιάσεις στα φωτοβολταϊκά πάνελ των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών από παρακείμενα κτίρια, δέντρα ή άλλες κατασκευές.

Σε χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστρία και η Ολλανδία υπάρχει ήδη ενσωμάτωση της δυνατότητας εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών στα ισχύοντα ρυθμιστικά πλαίσια και μάλιστα ενθαρρύνεται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στα πλαίσια της ενεργειακής μετάβασης, με την υποστήριξη αρμοδίων φορέων και την ανάπτυξη ειδικών κανονιστικών πλαισίων. Στις περιπτώσεις αυτές όπου υπάρχει μέριμνα για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών στο κανονιστικό πλαίσιο, ισχύουν περιορισμοί σε ότι αφορά στην εγκατεστημένη ισχύ των συστημάτων, σε ότι αφορά σε απαιτήσεις ασφάλειας και διαδικασίες γνωστοποίησης ή αδειοδότησης, ωστόσο καταγράφεται ότι τα κανονιστικά πλαίσια αυτά δεν θέτουν εμπόδια στην ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών.

Στην Ελλάδα, η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο, παρά τις κλιματικές συνθήκες οι οποίες ευνοούν την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα. Η πολεοδομική οργάνωση απαιτήσεις και βίαιη ορισμοί για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πολυκατοικίες καθιστούν τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών ακόμα πιο σύνθετη. Δεν εντοπίζεται σαφές θεσμικό πλαίσιο το οποίο να ρυθμίζει τις απαιτήσεις και προδιαγραφές για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, αλλά ούτε και εντοπίζεται σαφές θεσμικό πλαίσιο το οποίο να απαγορεύει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Ως εκ τούτου υπάρχει ασάφεια σχετικά με τη δυνατότητα σύνδεσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε καταναλωτές οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Μέσα από την εστίαση της παρούσης εργασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών επιδιώκεται, μεταξύ άλλων, να καταγραφούν τεχνικές προδιαγραφές και απαιτήσεις για τη σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε κατοικίες.

Η εστίαση της παρούσας εργασίας στα φωτοβολταϊκά μπαλκονιών επιδιώκει την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης και την αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών, θεσμικών και οικονομικών παραμέτρων που σχετίζονται με τη χρήση τους. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τυχόν διαφοροποιήσεις σε ό,τι αφορά στην επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ αντιστροφών και τρόπου σύνδεσης του φωτοβολταϊκού συστήματος με την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, νομοθετικές και ρυθμιστικές εξελίξεις στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα, περιβαλλοντικές παράμετροι και παράμετροι που αφορούν στην ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών μπαλκονιών, ευκαιρίες και εμπόδια ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε υφιστάμενα κτίρια καθώς και η δυνητική συμβολή τους στη μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά.

Η παραπάνω πτυχές αποτελούν τη βάση για την αξιολόγηση του βαθμού πρωταθλητές στην παρθένο μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στα πλαίσια της πράσινης μετάβασης ειδικά για τους κατοίκους των αστικών κέντρων οι οποίοι δεν έχουν επαρκή πρόσβαση σε στέγες και άλλες επιφάνειες εγκατάστασης για την εγκατάσταση κλασικών φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης.

Η τεχνολογία πίσω από τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών δεν διαφοροποιείται σε σχέση με την τεχνολογία των υπολοίπων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αντί αυτού, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αποτελούν ένα διαφοροποιημένο πλαίσιο εφαρμογής της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλή ισχύ, συμπαγή μορφή των πάνελ και λοιπών υλικών και απλοποιημένη εγκατάσταση. Όπως προαναφέρεται τα συνηθέστερα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αποτελούνται από μικρό αριθμό φωτοβολταϊκών πάνελ, με την ισχύ τους να ακολουθεί τη μέγιστη ισχύ των εμπορικά διαθέσιμων φωτοβολταϊκών πάνελ, τα οποία κατά τον χρόνο γραφής της παρούσης διατίθενται σε ονομαστικές ισχύς της τάξεως των 500Wr έως 600Wr. Επιπρόσθετα αποτελούνται από έναν μικρό αντιστροφέα και ένα σύστημα στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ κατάλληλο για εγκατάσταση στην πρόσοψη του κτιρίου ή στην πρόσοψη ή τα κάγκελα ενός μπαλκονιών. Σε αντίθεση με άλλα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία εγκαθίστανται σε οικίες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών συνδέονται απευθείας στην εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση και όχι στη μετρητική διάταξη του διαχειριστή του δικτύου. Η εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι προαιρετική, ενώ αν δεν εγκαθιστά σύστημα αποθήκευσης ενέργειας το κόστος εγκατάστασης περιορίζεται και δεν απαιτεί ιδιαίτερη εξειδίκευση. Επιπρόσθετα, απουσία μέριμνας στο κανονιστικό και ρυθμιστικό πλαίσιο της Ελλάδας δεν υπάρχει διαδικασία αδειοδότησης και σύνδεσης του φωτοβολταϊκού συστήματος με την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση ή με το δίκτυο. Ωστόσο, όπως θα συζητηθεί στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσης εγείρονται ζητήματα τα οποία αφορούν κυρίως στην αντλησιδοποίηση (anti islanding), η οποία ρυθμίζεται από συγκεκριμένο πρότυπο, το οποίο για το ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι το VDE 0126. Στο πλαίσιο αυτό, ελλοχεύει ο κίνδυνος ο αυτοπαραγωγός να εγχέει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο όταν αυτό είναι σε διακοπή, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμό τυχόν τεχνικών οι οποίοι παρεμβαίνουν στο δίκτυο για εργασίες αποκατάστασης βλαβών ή κατασκευής. Στο πλαίσιο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι για παράδειγμα στη Γερμανία έχει τεθεί ανώτερο όριο ισχύος για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών, στα 600Wr, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η όποια παραγόμενη θα καταναλώνεται από την οικεία

και δεν θα εγχέεται στο δίκτυο σε περίπτωση διακοπής. Σε κάθε περίπτωση, όπως θα εξεταστεί στο τέταρτο κεφάλαιο, απαιτείται να θεσπιστεί μια διαδικασία αδειοδότησης ή απλές γνωστοποιήσεις καθώς και να τεθεί ένα μέγιστο όριο ισχύος για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών στην Ελλάδα προκειμένου να επιταχυνθεί η ενσωμάτωσή τους στα υφιστάμενα κτίρια.

Εξετάζοντας το ζήτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών από την περιβαλλοντική σκοπιά, εντοπίζεται ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την διείσδυσή τους καθώς μπορούν να αποτελέσουν το μέσο με το οποίο θα εξοικειωθεί το κοινό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και με το οποίο θα καλλιεργηθούν περιβαλλοντικά ευαισθητοποιημένες συμπεριφορές στο κοινό. Το δε χαμηλό κόστος κτήσης και εγκατάστασης του καταγράφεται ως ευκαιρία για την ευρεία διείσδυση τους στα ελληνικά αστικά κέντρα, όπως ως ευκαιρία καταγράφεται και η κλιμακούμενη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία επιβαρύνει τον προϋπολογισμό κάθε νοικοκυριού σε αστικό κέντρο, απουσία εναλλακτικών επιλογών για την εγκατάσταση σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Κλείνοντας το εισαγωγικό αυτό κομμάτι θα πρέπει να τονιστεί η ανάγκη προσαρμογής του ρυθμιστικού και κανονιστικού πλαισίου στην Ελλάδα, καθώς και σε άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπου δεν υπάρχει μέριμνα για τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, στα πλαίσια μιας ευρύτερης ενεργειακής στρατηγικής προσανατολισμένης στην πράσινη μετάβαση. Στα επόμενα κεφάλαια εξετάζονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η ηλιακή ενέργεια, Τα φωτοβολταϊκά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών σε βάθος.

2. ΑΠΕ και ηλιακή ενέργεια

Στο κεφάλαιο αυτό συζητούνται και παρουσιάζονται τα χρήματα από τη μεταγραφή και ανασκόπηση στο πεδίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ηλιακής ενέργειας.

2.1. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί σε διαφορές μορφές ενέργειας μέσα από την εκμετάλλευση φυσικών φαινομένων. Για παράδειγμα μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική, θερμική ή χημική ενέργεια. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσα από φωτοβολταϊκά συστήματα και συγκεκριμένα μέσα από φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο εξετάζεται αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο, το οποίο λαμβάνει χώρα στα φωτοβολταϊκά πάνελ και συγκεκριμένα στις φωτοβολταϊκές κυψέλες των πάνελ. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Edmond Becquerel το 1839 (Wurfel, 1982), με τον Alber Einstein να αναπτύσσει τη θεωρία γύρω από την φωτοηλεκτρική από το 1905. Το 1930 αναπτύχθηκε η πρώτη πρότυπη φωτοβολταϊκή κυψέλη από τους Mott και Schottky, ενώ το 1954 ανακαλύφθηκε τυχαία ότι η ηλιακή ακτινοβολία επηρέαζε συγκεκριμένες ημιαγωγικές επαφές. Κατά την ανακάλυψη αυτή καταγράφηκε ότι ημιαγωγικές επαφές p και n μπορούσαν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα με απόδοση περί το 6%. Εξήντα χρόνια αργότερα, η απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών από ημιαγωγικές επαφές p και n ξεπερνούσε το 33% (Kazmerski, 1997).

2.2. Η ηλιακή ενέργεια

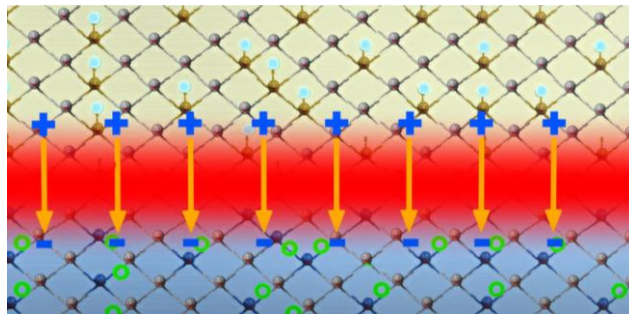
Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από τον ήλιο, και είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Μεταξύ άλλων, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσα από φωτοβολταϊκούς σταθμούς, καθώς και σε θερμική, μέσα από ενεργητικά παθητικά ηλιοθερμικά συστήματα.

2.2.1. Παραγωγή θερμικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια

Μια από τις πρώτες εφαρμογές αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι η παραγωγή ζεστό νερού η οποία καταγράφεται πολύ νωρίτερα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Zhang, et al., 2015). Η παραγόμενη θερμική από την ηλιακή μπορεί να τροφοδοτηθεί για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης των εσωτερικών χώρων αλλά και για την κάλυψη αναγκών σε ζεστά νερά χρήσης, υποκαθιστώντας τη θερμική η οποία παράγεται μέσα από καύση ορυκτών πόρων όπως το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο συνεισφέροντας στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων και γενικότερα στην πράσινη μετάβαση (Sharma, et al., 2015). Σε ό,τι αφορά ειδικά στην παραγωγή θερμικής ενέργειας από την ηλιακή μπορούν να χρησιμοποιούνται ενεργητικά και παθητικά συστήματα παραγωγής ηλιοθερμικής ενέργειας εκμεταλλευόμενα τόσο την ηλιακή ακτινοβολία όσο και τη θερμότητα η οποία παράγεται όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε επιφάνειες συλλεκτών (Tian & Zhao, 2013).

2.2.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια

Όπως αναφέρεται στο εισαγωγικό κομμάτι της παρούσης, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι εφικτή μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται, μεταξύ άλλων, από φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία μπορούν να εγκαθίστανται σε ελεύθερες επιφάνειες κτηρίων ή σε γήπεδα, ακόμη και στις προσόψεις των κτηρίων. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από φωτοβολταϊκά συστήματα μπορεί ομοίως, με τα ηλιοθερμικά συστήματα, να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας η οποία προέρχεται από καύση ορυκτών πόρων, να οδηγήσει σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων και εν γένει να συνεισφέρει στην πράσινη μετάβαση.



2. Μετακίνηση Φορτίων σε Φωτοενεργό Υλικό

2.2.3. Ηλιακή ενέργεια και βιοκλιματικός σχεδιασμός

Δεδομένου ότι η παρούσα πραγματεύεται τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών, αξίζει να γίνει μια σύντομη αναφορά στη σύνδεση της ηλιακής ενέργειας και του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός εντοπίζεται στη βιβλιογραφία στη δεκαετία του 60, στα πλαίσια μελετών για την εύρεση τρόπων αισθητικής προσαρμογής των κτηρίων στο αστικό περιβάλλον. Αργότερα, τη δεκαετία του 70, το ενδιαφέρον γύρω από τον βιοκλιματικό σχεδιασμό αυξάνεται λόγω της ενεργειακής κρίσης, με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό να εξετάζεται ως μια εναλλακτική για τη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας στα κτίρια στο αστικό περιβάλλον προκειμένου να επιβραδυνθεί η κλιματική αλλαγή (Zuhairy & Sayigh, 1993).

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αναφέρεται σε πρακτικές σχεδιασμού των κτηρίων οι οποίες έχουν ως στόχο την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, τη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας για τη λειτουργία των κτηρίων, τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κτηρίων αλλά και αν είναι δυνατόν τη ρύθμιση του μικροκλίματος αν πρόκειται για κτίρια σε αστικά κέντρα. Σύμφωνα με τον Battisti (2020), στόχος του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι η μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, του φυσικού φωτισμού και αερισμού και του εκάστοτε κλίματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ανάγκη για κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για τη λειτουργία των κτηρίων (Battisti, 2020).

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών από μόνη της ή και σε συνδυασμό με την εγκατάσταση ηλιοθερμικών συστημάτων ή και κάθετων πράσινων προσόψεων εμπίπτει στο πεδίο του βιοκλιματικού σχεδιασμού καθώς έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη αφομοίωση του κτιρίου στο φυσικό περιβάλλον και τη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας για τη λειτουργία του εκάστοτε κτιρίου (Ehringer & Zito, 1984).

3. Φωτοβολταϊκά συστήματα

Στο κεφάλαιο αυτό συζητούνται και παρουσιάζονται τα χρήματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στο πεδίο των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



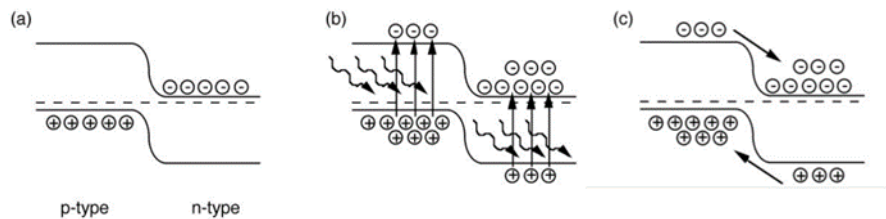
3.Πεδία φωτοβολταϊκών πάνελ σε γραμμική διάταξη, αξιοποιώντας τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή καθαρής και βιώσιμης ενέργειας

3.1. Εισαγωγή

Όπως προαναφέρεται στο εισαγωγικό τμήμα της παρούσης, τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούνται από φωτοβολταϊκές κυψέλες. Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη ανακλάται με αποτέλεσμα η απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ να κυμαίνεται στα επίπεδα του 30% έως 40%. Ένα άλλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη απορροφάται από τη φωτοβολταϊκή κυψέλη με αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Καθώς προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία στην φωτοβολταϊκή κυψέλη, φωτόνια, τα οποία έχουν πολύ μεγάλη ενέργεια διεγείρουν τα ηλεκτρόνια της ημιαγωγικής επαφής η της κυψέλης. Ως αποτέλεσμα, τα ηλεκτρόνια κινούνται προς την ημιαγωγική επαφή p γεμίζοντας κενές θέσεις, γνωστές ως οπές. Η διαρκής κίνηση ηλεκτρονίων από την επαφή n στην επαφή p προκαλεί μια διαφορά

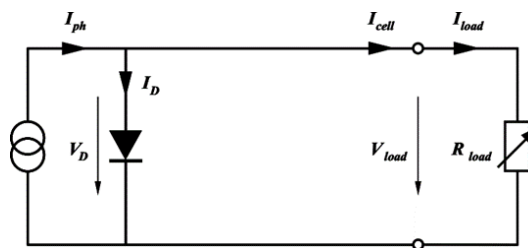
δυναμικού ανάμεσα στις δύο ημιαγωγικές επαφές στην οποία οφείλεται η ροή ηλεκτρικού ρεύματος εντός της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Καθαρότητα των ημιαγωγικών υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένη μια φωτοβολταϊκή κυψέλη και η δυνατότητα διάχυσης των ηλεκτρονίων της ημιαγωγικής επαφής επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών και κατά συνέπεια την απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ (Salas, et al., 2006).

Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητό παρακάτω παρατίθεται γραφικά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Κατά την κατάσταση α η ημιαγωγική επαφή ισορροπεί. Στην κατάσταση b γίνεται η μετακίνηση ηλεκτρονίων από την επαφή n στην επαφή p. Στην κατάσταση c η ημιαγωγική επαφή ισορροπεί ξανά:



Εικόνα 4: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Brus, 1984)

Απόρροια της ροής ηλεκτρονίων ρέει ένα φωτόρευμα I_{ph} μέσα στην κυψέλη. Προκειμένου να γίνει περαιτέρω κατανοητό το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρακάτω παρατίθεται γραφικά το ισοδύναμο κύκλωμα της ιδανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης:

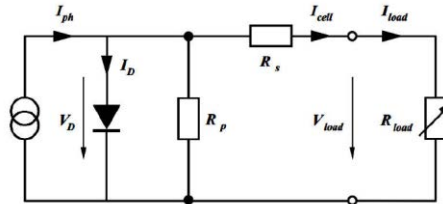


Εικόνα 5: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικής κυψέλης (Izadian, et al., 2012)

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο εξηγείται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0(e^{qV/kT} - 1)$$

Η παραπάνω φωτοβολταϊκή κυψέλη αναφέρεται ως ιδανική καθώς μια πραγματική φωτοβολταϊκή κυψέλη έχει επιπρόσθετα μία ωμική αντίσταση εξαιτίας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η κυψέλη και εξαιτίας των ρευμάτων διαρροής ανάμεσα στην επαφή p-n:



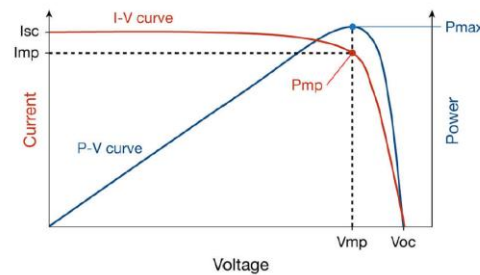
Εικόνα 6: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικής κυψέλης (Izadian, et al., 2012)

Η έξοδος της φωτοβολταϊκής κυψέλης αναπαρίσταται από ένα γράφημα ρεύματος και τάσης ($I - V$). Στο γράφημα αυτό αποτυπώνεται η σχέση ανάμεσα στην παραγόμενη τάση και στ παραγόμενο ρεύμα. Συνηθέστερα, η καμπύλη ρεύματος και τάσης αφορά στο παραγόμενο ρεύμα και στην παραγόμενη τάση σε ιδανικές συνθήκες δοκιμής, γνωστές και ως STC ή Standard Test Conditions. Στις συνθήκες αυτές γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία της τάξης των 1000W/m^2 , θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C και μάζα αέρα 1,5 δεδομένου ότι η παραγόμενη ισχύς από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η μάζα αέρα.

Για την αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών πάνελ πρέπει να εξετάζονται το μέγιστο σημείο ισχύος ή maximum power point (MPP), η τάση ανοιχτού κυκλώματος (Open Circuit Voltage (V_{oc})) και το ρεύμα βραχυκύκλωσης (Short circuit I (I_{sc})).

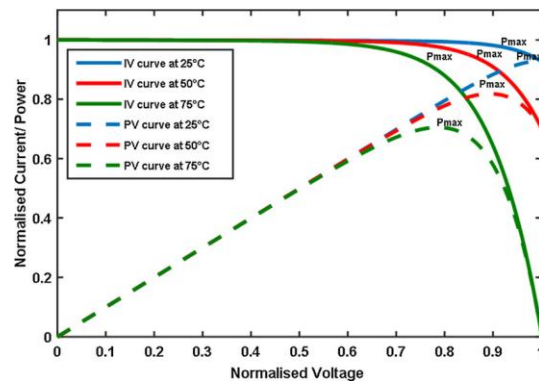
Στο μέγιστο σημείο ισχύος της φωτοβολταϊκής κυψέλης η κυψέλη παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ για τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας. Ως τάση ανοιχτού κυκλώματος αναφέρεται η μέγιστη τάση η οποία μπορεί να επιτευχθεί στην έξοδο της φωτοβολταϊκής κυψέλης ή του φωτοβολταϊκου πάνελ όταν αυτό δεν τροφοδοτεί κάποιο φορτίο δηλαδή όταν το ρεύμα εξόδου της κυψέλης ή του πάνελ είναι μηδενικό. Ως ρεύμα βραχυκύκλωσης αναφέρεται το μέγιστο ρεύμα το οποίο μπορεί να επιτευχθεί στην έξοδο της φωτοβολταϊκής κυψέλης ή του φωτοβολταϊκου πάνελ όταν αυτό δεν τροφοδοτεί

κανένα φορτίο δηλαδή όταν η τάση εξόδου είναι μηδέν. Τόσο από την καμπύλη ρεύματος τάσης όσο και από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η σχέση ανάμεσα στην τάση και στο ρεύμα εξόδου είναι αντιστρόφως ανάλογη.

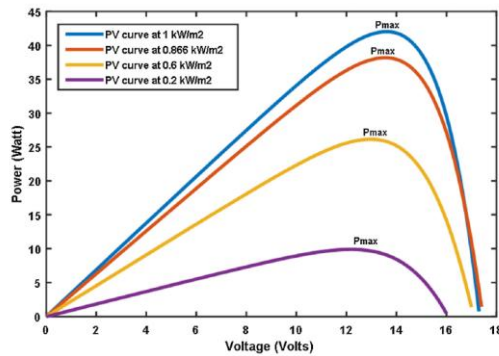


Εικόνα 7: Καμπύλη I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης (Salas, et al., 2006)

Καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες λειτουργίας μπορεί να μειώνεται η παραγόμενη ισχύς από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Πιο συγκεκριμένα καθώς μειώνεται η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, σε επίπεδα κάτω από τα 1000W/m^2 , και όσο αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε επίπεδα πάνω από 25°C τόσο μειώνεται η παραγόμενη ισχύς (Cañete, et al., 2014):



Εικόνα 8: Καμπύλες I V φωτοβολταϊκής κυψέλης για διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος (Hady, 2017)



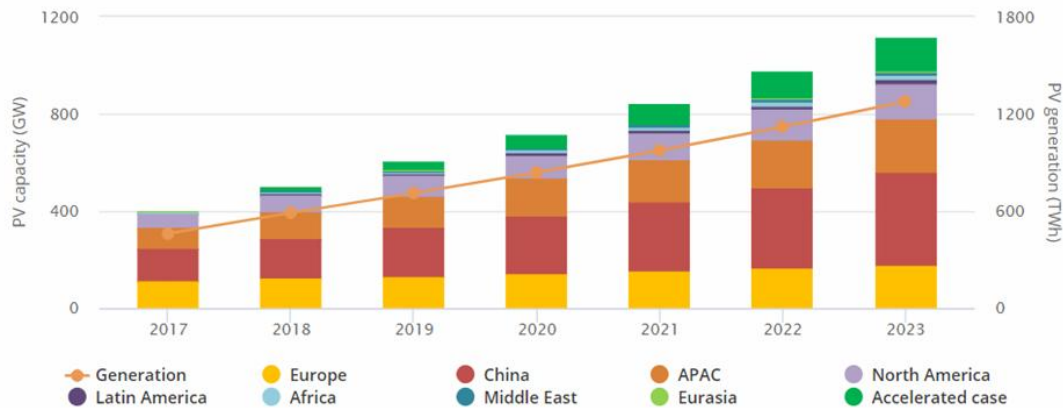
Εικόνα 9: Καμπύλες $I-V$ φωτοβολταϊκής κυψέλης για διαφορετική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμοκρασία 75°C (Hady, 2017)

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποσκοπούν στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας, δηλαδή της ηλιακής ακτινοβολίας, σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσα από την αξιοποίηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Τα κυριότερα μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, στα οποία λαμβάνει χώρα η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και οι αντιστροφείς (inverters), στους οποίους η παραγόμενη ηλεκτρική συνεχούς τάσης μετατρέπεται σε ηλεκτρική εναλλασσόμενης τάσης.

Επιπρόσθετα για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτείται η χρήση κάποιου συστήματος έδρασης των φωτοβολταϊκών πάνελ, ανάλογα με την επιφάνεια στην οποία αυτά πρόκειται να εγκατασταθούν. Τα δε φωτοβολταϊκά πάνελ συνδέονται με καλώδια με τους αντιστροφείς και η αντίστροφη συνδέονται με καλώδια με ηλεκτρικούς πίνακες προκειμένου να γίνει η διανομή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Kannan & Vakeesan, 2016).

Ανά τα χρόνια καταγράφεται μια διαρκής αύξηση τόσο της εγκατεστημένης ισχύος σε φωτοβολταϊκούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας όσο και σε επίπεδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από φωτοβολταϊκούς σταθμούς:



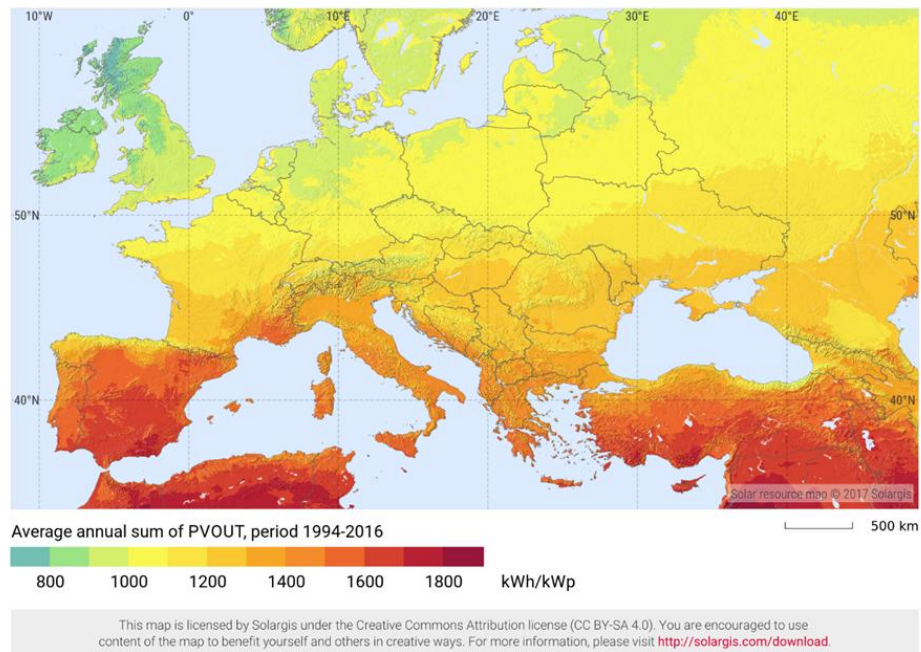
Εικόνα 10: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών σταθμών και παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκούς σταθμούς, παγκοσμίως, ανά περιοχή (International Energy Agency, 2018)

Τα μεγαλύτερα μερίδια σε όρους εγκατεστημένης ισχύος και παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από φωτοβολταϊκούς σταθμούς κερδίζουν οι χώρες στην Ασία όπως η Κίνα, χώρες στην Ευρώπη και χώρες στον ειρηνικό ωκεανό (International Energy Agency, 2018).

Στην Ελλάδα είναι διαθέσιμο περισσότερο ηλιακό δυναμικό σε σχέση με τις περισσότερες χώρες της Ευρώπης, πράγμα το οποίο οφείλεται στο γεωγραφικό πλάτος της χώρας. Εξαιρεση αποτελούν η Ισπανία και η Πορτογαλία και κάποια τμήματα της Ιταλίας, όπως φαίνεται παρακάτω στο χάρτη ηλιακού δυναμικού:

PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL EUROPE

SOLARGIS



Εικόνα 11: Ηλιακό δυναμικό στην Ευρώπη (Solargis, 2019)

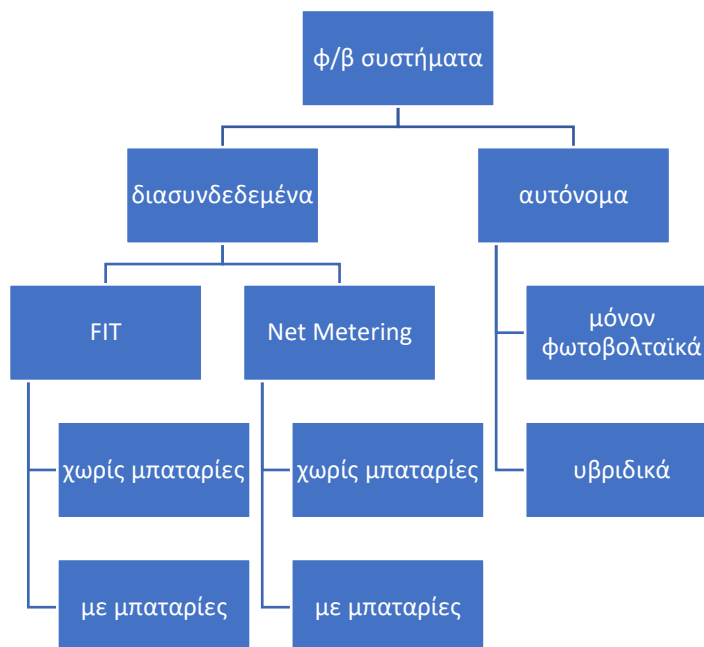
Πέρα από το αυξημένο ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα, σύμφωνα με τους Loumakis et al. (2019) υπάρχουν και άλλοι λόγοι που συντελούν στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα στους οποίους περιλαμβάνονται κρατικές παρεμβάσεις και επιδοτήσεις, στα πλαίσια της πράσινης ενεργειακής μετάβασης και επίτευξης στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης περί της μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος – απανθρακοποίησης (Loumakis, et al., 2019).

Στον αντίποδα, αξίζει να σημειωθεί ότι η παλαιότητα του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και ο υψηλός κορεσμός του δρουν αρνητικά στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών.

3.2. Χαρακτηριστικά και κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να καταταχθούν σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίον λειτουργούν, για παράδειγμα αν είναι διασυνδεδεμένα με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ή αν είναι αυτόνομα, ανάλογα με το αν διαθέτουν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ή όχι, ανάλογα με το μοντέλο με το οποίο αξιοποιείται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, για παράδειγμα μπορούν να διαχωρίζονται σε φωτοβολταϊκά συστήματα για ιδιοκατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας ή για πώληση της παραγόμενης ενέργειας, ανάλογα με το αν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται μόνο από φωτοβολταϊκά πάνελ ή αν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια και από άλλες πηγές, για παράδειγμα από ανεμογεννήτριες, οπότε διακρίνονται τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα.

Παρακάτω παρατίθεται ένα εποπτικό διάγραμμα των διαφορετικών κατηγοριών και τύπων φωτοβολταϊκών συστημάτων:



Εικόνα 12: Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

3.3. Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πάνελ

Η πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών κυττάρων αντιπροσωπεύεται κυρίως από τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου (mSi), τα οποία διαθέτουν θεωρητική απόδοση που αγγίζει το 32% (Green et al., 2021). Στη δεύτερη γενιά ανήκουν κυρίως τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου (pSi) και τα κύτταρα από άμορφο πυρίτιο (aSi) (Alharbi & Kais, 2015). Η τρίτη γενιά περιλαμβάνει κυρίως οργανικά ή πολυμερή φωτοβολταϊκά στοιχεία, καθώς και κύτταρα με πολλαπλές λειτουργίες. Η τέταρτη γενιά προκύπτει από τον συνδυασμό οργανικών και ανόργανων υλικών, προσφέροντας τεχνολογίες με βελτιωμένα χαρακτηριστικά, όπως λεπτές και οικονομικές μεμβράνες. Οι μελλοντικές γενιές φωτοβολταϊκών αναμένεται να αξιοποιούν προηγμένα υλικά, όπως νανοσωλήνες άνθρακα και γραφένιο, οδηγώντας σε ακόμη υψηλότερες αποδόσεις (Jayawardena et al., 2013).

Η αποδοτικότητα των διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς μελέτης στη διεθνή βιβλιογραφία. Μέσα από αυτές τις έρευνες έχουν αναπτυχθεί προσομοιωτικά μοντέλα που σχετίζονται με την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, χρησιμοποιώντας κρίσιμες παραμέτρους όπως η μέγιστη ισχύς εξόδου, η συνολική απόδοση της συστοιχίας και ο λόγος ενεργειακής απόδοσης (Bianchini et al., 2016).

Η απόδοση τόσο των κυττάρων μονοκρυσταλλικού, πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου όσο και άλλων τεχνολογιών όπως το τελλούριο καδμίου (CdTe), ο χαλκός-ίνδιο-σελήνιο (CIS) και ο χαλκός-ίνδιο-γάλλιο-σελήνιο (CIGS), έχει μελετηθεί ευρέως. Στην έρευνα των Carr και Pryor (2004), αξιολογήθηκαν πέντε τύποι φωτοβολταϊκών πάνελ – ανάμεσά τους πάνελ κρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου – σε συνθήκες του Περθ, στη Δυτική Αυστραλία. Η ετήσια απόδοση των πάνελ με τεχνολογία κρυσταλλικής επαφής με λέιζερ και κυματοειδείς διασυνδέσεις κυμάνθηκε μεταξύ 11,5% και 12,5%, ενώ για τα πάνελ τριπλής σύνδεσης η απόδοση ήταν σχεδόν η μισή.

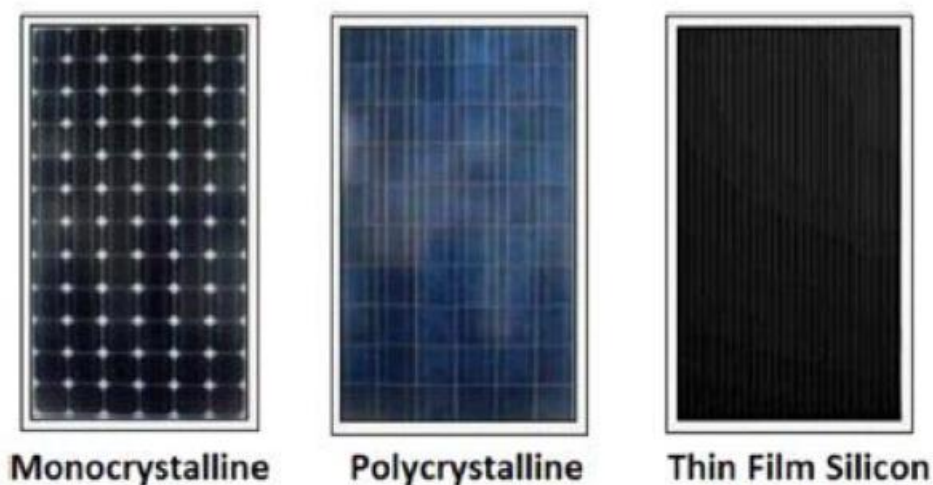
Αντίστοιχα, οι Bashir et al. (2014) διεξήγαγαν πειραματική μελέτη στο Πακιστάν κατά τους χειμερινούς μήνες, εξετάζοντας τρεις τύπους πάνελ. Διαπιστώθηκε ότι η μέση

απόδοση του μονοκρυσταλλικού πάνελ ήταν περίπου 2,3 φορές υψηλότερη από αυτή του άμορφου, ενώ ο λόγος απόδοσης του άμορφου πυριτίου ξεπέρασε κατά σχεδόν τριπλάσιο ποσοστό αυτόν του μονοκρυσταλλικού.

Οι Dollera et al. (2015) εξέτασαν τη λειτουργία μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών πάνελ εγκατεστημένων στο Μιλάνο, αναπτύσσοντας ένα μοντέλο πρόβλεψης της ενεργειακής τους απόδοσης βάσει των τοπικών μετεωρολογικών δεδομένων. Σε αντίστοιχη μελέτη, οι Visa et al. (2016) αξιολόγησαν τη συμπεριφορά φωτοβολταϊκών πάνελ διαφόρων τεχνολογιών σε περιοχές με μεσογειακό κλίμα. Επιπλέον, οι Dias et al. (2017) ανέλυσαν διάφορα μοντέλα ενεργειακής απόδοσης και πρότειναν ένα νέο υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο βασίστηκε σε δεδομένα από έξι διαφορετικούς τύπους πάνελ, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονταν και πάνελ άμορφου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Παρά την εξέλιξη και ποικιλομορφία στις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών πάνελ, τα πολυκρυσταλλικά παραμένουν κυρίαρχα στην παγκόσμια αγορά, καταλαμβάνοντας περίπου το 93% του μεριδίου, ενώ τα πάνελ άμορφου πυριτίου αντιπροσωπεύουν το 50% της αγοράς (Ribeyron, 2017).

Παρακάτω παρατίθενται τα τρία κυριότερα είδη φωτοβολταϊκών πάνελ:

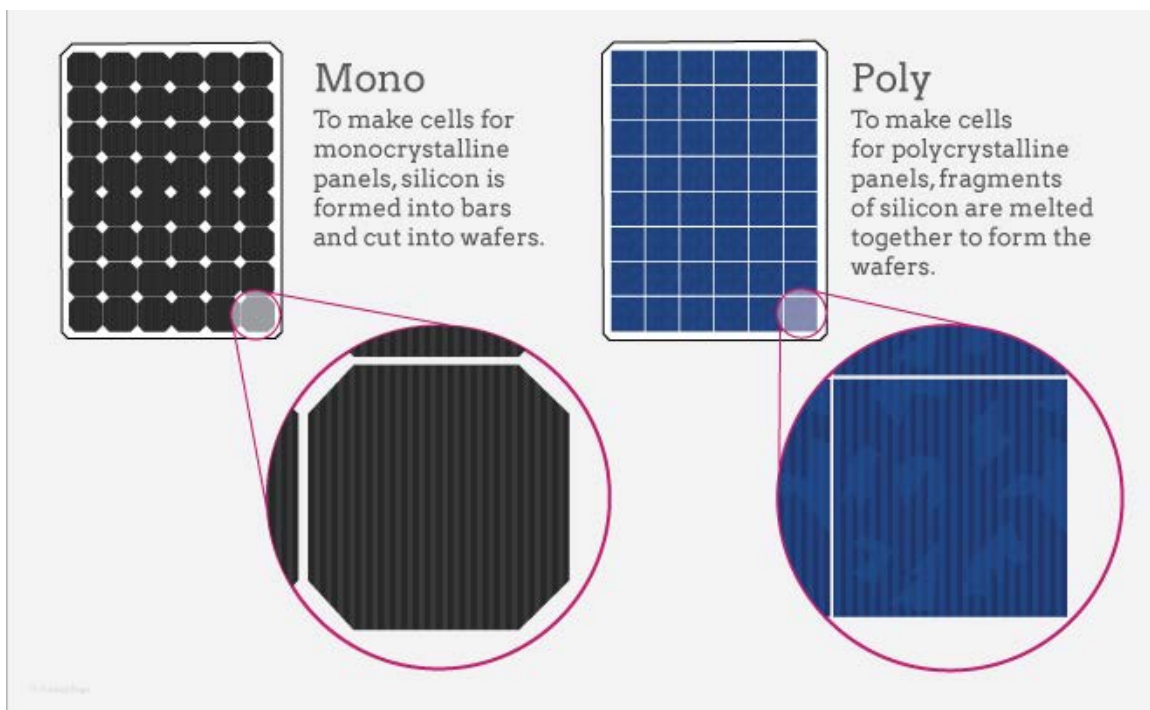


Εικόνα 13: Μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά πάνελ και πάνελ άμορφου πυριτίου (EnergySage, 2020)

Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πάνελ τείνουν να προσφέρουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση συγκριτικά με τα πολυκρυσταλλικά, ωστόσο συνοδεύονται και από αυξημένο κόστος παραγωγής και αγοράς. Η κατασκευή τους βασίζεται στη δημιουργία ράβδων μονοκρυσταλλικού πυριτίου, οι οποίες στη συνέχεια κόβονται σε λεπτές φέτες. Ο χαρακτηρισμός «μονοκρυσταλλικό» αποδίδεται στο γεγονός ότι το υλικό αποτελείται από έναν ενιαίο κρύσταλλο πυριτίου, γεγονός που διευκολύνει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος με μεγαλύτερη ένταση.

Αντίθετα, τα πολυκρυσταλλικά πάνελ παρότι είναι λιγότερο αποδοτικά ενεργειακά, παρουσιάζουν το πλεονέκτημα χαμηλότερου κόστους κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή, το πυρίτιο δεν υφίσταται διεργασία καθαρισμού σε μονοκρυσταλλική μορφή, αλλά ψύχεται με τρόπο που οδηγεί σε δημιουργία πολλών μικρών κρυστάλλων εντός κάθε κυψέλης. Η παρουσία αυτών των πολυάριθμων κρυσταλλικών δομών επηρεάζει αρνητικά την αγωγιμότητα του υλικού, με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά πάνελ.

Παρακάτω παρατίθενται γραφικά οι διαφορές μεταξύ των δύο παραπάνω τύπων πάνελ:



Εικόνα 14: Διαφορές μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών πάνελ (EnergySage, 2020)

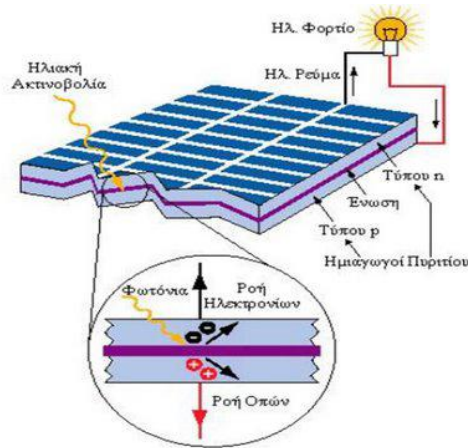
Όσον αφορά τη διείσδυση των δύο κυρίαρχων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών πάνελ στην αγορά, στοιχεία της έκθεσης του οργανισμού ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaic) δείχνουν ότι το μερίδιο των μονοκρυσταλλικών πάνελ προβλεπόταν να αγγίξει το 75% της παγκόσμιας παραγωγής μέχρι το 2020. Αντίστοιχα, τα πολυκρυσταλλικά πάνελ αναμενόταν να περιοριστούν στο 20%, ενώ το υπόλοιπο 5% καλύπτεται από τεχνολογίες άμορφου πυριτίου και άλλες λιγότερο διαδεδομένες λύσεις. Η ίδια έκθεση προβλέπει ότι έως το 2030, τα μονοκρυσταλλικά πάνελ θα κυριαρχούν πλήρως στην αγορά με ποσοστό 95%, αφήνοντας μόλις το 5% στα πολυκρυσταλλικά (Solar Business Hub, 2020).

Η μετατόπιση της αγοράς προς τα μονοκρυσταλλικά πάνελ αποδίδεται κυρίως στην ανάγκη βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης. Χαρακτηριστικά, το 2010 η αγορά κυριαρχούνταν από πολυκρυσταλλικά πάνελ με μέση ισχύ περίπου 230 Wp, ενώ σήμερα επικρατούν τα μονοκρυσταλλικά πάνελ με ισχύ γύρω στα 330 Wp. Επιπλέον, η χρήση διπλής όψης (bifacial) τεχνολογίας σε συνδυασμό με τα μονοκρυσταλλικά πάνελ μπορεί να αυξήσει την αποδιδόμενη ισχύ ακόμη και έως τα 450 Wp.

Ένα φωτοβολταϊκό (ΦΒ) στοιχείο αποτελείται από δύο υλικά σε επαφή, τα οποία υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας αναπτύσσουν στα άκρα τους συνεχή ηλεκτρική τάση. Η πλέον διαδεδομένη τεχνολογία σήμερα βασίζεται στη χρήση δύο ημιαγωγών διαφορετικού τύπου — ενός τύπου-n και ενός τύπου-p — που βρίσκονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι μία περιοχή επαφής (ένωση p-n). Συνήθως, τα δύο αυτά στρώματα προέρχονται από το ίδιο βασικό υλικό, συνήθως πυρίτιο. Στην εξωτερική επιφάνεια του κυψέλης τοποθετούνται αγωγίμα ηλεκτρόδια, ενώ η δομή του στοιχείου έχει συνήθως τετραγωνική ή σχεδόν τετραγωνική γεωμετρία, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή επιφάνεια για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Κατά την έκθεση του ΦΒ στοιχείου στο ηλιακό φως, δημιουργείται στο εσωτερικό του ηλεκτρικό ρεύμα — γνωστό ως φωτόρευμα — το οποίο είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Σε συνθήκες τυπικής ηλιακής ακτινοβολίας 1 kW/m^2 , η

τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός ΦΒ στοιχείου κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,5 και 0,7 Volt, ενώ το παραγόμενο ρεύμα κυμαίνεται από 10 έως 40 mA/cm².



Εικόνα 15: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Αν και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είχε ανακαλυφθεί ήδη από τον 19ο αιώνα, η ουσιαστική ανάπτυξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών κυψελών σημειώθηκε κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα. Στα αρχικά στάδια της εξέλιξής τους, οι πρώτες ΦΒ κυψέλες κατάφερναν να επιτύχουν αποδόσεις της τάξης του 6%, γεγονός που αποτέλεσε τη βάση για τις μετέπειτα τεχνολογικές βελτιώσεις και την ευρύτερη εμπορική εφαρμογή τους.

3.4. Κύριοι τύποι φωτοβολταϊκών πάνελ

Το κυρίαρχο υλικό για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών στη βιομηχανία είναι το πυρίτιο, το οποίο χρησιμοποιείται σε ποσοστό που ξεπερνά το 90% της παγκόσμιας παραγωγής φωτοβολταϊκών. Πρόκειται για ένα από τα λίγα υλικά που επεξεργάζονται σε τόσο μεγάλη κλίμακα, λόγω των ιδιαίτερα ευνοϊκών φυσικών και χημικών του χαρακτηριστικών.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του πυριτίου περιλαμβάνουν:

- **Αφθονία στη φύση:** Είναι το δεύτερο πιο διαδεδομένο στοιχείο στον φλοιό της Γης μετά το οξυγόνο. Απαντάται κυρίως ως διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), δηλαδή ως άμμος ή χαλαζίας, και αποτελεί περίπου το 28% του γήινου φλοιού.
- **Περιβαλλοντική συμβατότητα:** Το πυρίτιο θεωρείται ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον.
- **Ευκολία επεξεργασίας:** Έχει τη δυνατότητα να λιώνει και να διαμορφώνεται σχετικά εύκολα, ενώ μπορεί να μετατραπεί σε μονοκρυσταλλική μορφή με σχετικά απλές τεχνικές.
- **Θερμική ανθεκτικότητα:** Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του διατηρούνται σε θερμοκρασίες έως και 125°C , καθιστώντας το κατάλληλο για λειτουργία σε ευρύ φάσμα κλιματικών συνθηκών.

Η εξάπλωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων βασισμένων στο πυρίτιο ενισχύθηκε σημαντικά από την ήδη ανεπτυγμένη τεχνογνωσία στην κατεργασία πυριτίου, προερχόμενη από τον κλάδο της ηλεκτρονικής — κυρίως από εφαρμογές όπως οι υπολογιστές και οι τηλεοράσεις.

Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ μπορεί να είναι κατασκευασμένο από:

- Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (mono – crystalline Si)
- Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (poly – crystalline , multi – crystalline Si)
- Άμορφο πυρίτιο (amorphous Si)

3.4.1. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία διαθέτουν συνήθως πάχος περίπου 0,3 χιλιοστών και εμφανίζουν αποδόσεις που κυμαίνονται μεταξύ 14% και 18% σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον, ωστόσο, έχουν καταγραφεί ακόμα υψηλότερες τιμές, με αποδόσεις να αγγίζουν έως και το 24,7%. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η υψηλή ενεργειακή

πυκνότητα, δηλαδή η αυξημένη απόδοση σε σχέση με την επιφάνεια που καταλαμβάνει το στοιχείο. Ωστόσο, το κόστος παραγωγής τους είναι σημαντικά αυξημένο σε σύγκριση με τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά. Παρ' όλα αυτά, η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ακόμη και το 18,5%, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε εφαρμογές όπου η διαθέσιμη επιφάνεια είναι περιορισμένη.

Προκειμένου να βελτιωθεί περισσότερο ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάνελ, πολλοί κατασκευαστές έχουν στραφεί σε φωτοβολταϊκά τα οποία είναι διάφανα και διαθέτουν στην οπίσθια πλευρά κάτοπτρο, ενώ οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι δύο όψεων με αποτέλεσμα να παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα και μέσω της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο κάτοπτρο στην οπίσθια πλευρά των πάνελ.

3.4.2. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που βασίζονται σε πολυκρυσταλλικό πυρίτιο έχουν πάχος περίπου 0,3 χιλιοστά. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι οικονομικότερη σε σύγκριση με αυτή των μονοκρυσταλλικών πάνελ, γεγονός που καθιστά την τελική τους τιμή πιο προσιτή. Χαρακτηριστικό τους είναι η παρουσία διακριτών μονοκρυσταλλικών περιοχών, οι οποίες είναι ορατές στην επιφάνεια του υλικού. Η απόδοση αυτών των πάνελ σχετίζεται με το μέγεθος των κρυσταλλικών περιοχών, καθώς μεγαλύτερη έκταση αυτών συνήθως συνεπάγεται και καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Σε ερευνητικό επίπεδο, τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία έχουν φτάσει αποδόσεις έως και 20%, ενώ τα εμπορικά διαθέσιμα πάνελ εμφανίζουν αποδόσεις που κυμαίνονται μεταξύ 13% και 15%.

3.4.3. Άμορφο πυρίτιο

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που βασίζονται σε άμορφο πυρίτιο παρουσιάζουν σαφώς χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με εκείνα που κατασκευάζονται από μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Πρόκειται για τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων (thin-film), στην οποία το ημιαγώγιμο υλικό —συνήθως πυρίτιο— εναποτίθεται σε υπόστρωμα χαμηλού κόστους, όπως γυαλί ή φύλλα αλουμινίου. Η χρήση μικρότερης ποσότητας πυριτίου συμβάλλει στη μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής. Ο χαρακτηρισμός «άμορφο» αποδίδεται στη μη κρυσταλλική —τυχαία—

διάταξη των ατόμων του πυριτίου στο υλικό. Οι αποδόσεις των φωτοβολταϊκών αυτής της κατηγορίας κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 6% και 8%, και επιτυγχάνονται κυρίως μέσω της τεχνολογίας thin-film.

3.5. Φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς

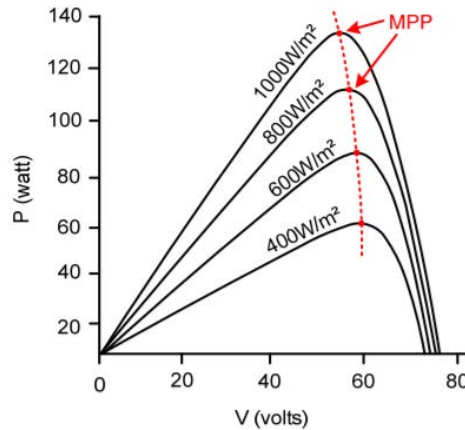
Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει ο αντιστροφέας (inverter). Ο βασικός του σκοπός είναι η μετατροπή του παραγόμενου συνεχούς ρεύματος (DC) από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) συχνότητας 50 Hz, το οποίο είναι συμβατό με τις απαιτήσεις του δημόσιου δικτύου. Η μετατροπή αυτή πρέπει να πραγματοποιείται με υψηλή ενεργειακή απόδοση, ελαχιστοποιώντας τις ενεργειακές απώλειες κατά τη διαδικασία.

Οι σύγχρονοι αντιστροφείς ενσωματώνουν ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος, όπως MOSFET, GTO και IGBT, τα οποία επιτρέπουν την αποδοτική διαχείριση της μετατροπής ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσης ενός αντιστροφέα (η) ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου.

Επιπλέον, ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων είναι η ικανότητά τους να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος, ο αντιστροφέας πρέπει να λειτουργεί στο «σημείο μέγιστης ισχύος» (Maximum Power Point – MPP) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, το οποίο μεταβάλλεται συνεχώς ως συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Οι φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς διαθέτουν έξυπνα συστήματα τα οποία μπορούν να ακολουθούν την καμπύλη ρεύματος τάσης των φωτοβολταϊκών πάνελ πώς συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας στοιχειοσειρές έτσι ώστε τα φωτοβολταϊκά πάνελ κάθε σειράς να λειτουργούν διαρκώς στο σημείο μέγιστης ισχύος. Για το λόγο αυτό, αυτό το σύστημα ονομάζεται MPPT, με τα αρχικά να προέρχονται από το maximum power point tracker.

Επιπρόσθετα, οι αντιστροφείς διαθέτουν διατάξεις προστασίας οι οποίες παρακολουθούν τις παραμέτρους τόσο της AC όσο και της DC πλευράς. Σε περίπτωση όπου αυτές βρίσκονται εκτός των ορίων ασφαλείας, ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας τίθεται εκτός λειτουργίας.



Εικόνα 16: Καμπύλη I-V για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι φωτοβολταϊκές σταθμοί αποτελούν ακριβές επενδύσεις, και συχνά εγκαθίστανται σε απομακρυσμένα σημεία δημιουργείται η ανάγκη για επιτήρηση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων απομακρυσμένα. Στην κατεύθυνση αυτή και οι περισσότεροι φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς διαθέτουν τη δυνατότητα εκπομπής δεδομένων για τη λειτουργία τους στο διαδίκτυο αρκεί να υπάρχει διαθέσιμη σύνδεση δικτύου.

Εκτός από στοιχεία τα οποία αφορούν σε δεδομένα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι μονάδες αυτές έχουν συχνά τη δυνατότητα να συλλέγουν δεδομένα σχετικά με βλάβες ή σφάλματα και να τις εκπέμπουν στο διαδίκτυο. Με τον τρόπο αυτό, η παρακολούθηση της ορθής λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πάρκου γίνεται απομακρυσμένα, ενώ ελαχιστοποιούνται οι χρόνοι αντίδρασης σε περιπτώσεις βλαβών.

Αξίζει επιπλέον να αναφερθεί ότι κατά τη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη συνεργασία μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του ηλεκτρονικού αντιστροφέα. Ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας απαιτεί στην είσοδο του ένα συγκεκριμένο εύρος για την τάση λειτουργίας, έχοντας ένα ανώτατο όριο τάσης

εισόδου. Το ανώτατο όριο δεν πρέπει να υπερβαίνεται ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος καταστροφής του αντιστροφέα. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πανελ τα οποία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά (στοιχειοσειρά) υπολογίζεται έτσι ώστε να μην υπερβαίνονται τα όρια τάσης αυτά υπό οποιαδήποτε συνθήκη λειτουργίας.

3.6. Τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Μολονότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης, υπάρχει πληθώρα φωτοβολταϊκών πάνελ, φωτοβολταϊκών αντιστροφέων και τύπων συστημάτων στήριξης έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων ανεξάρτητα από τη θέση εγκατάστασης. Μέσα από την αξιοποίηση από το σύνολο των διαθέσιμων τεχνολογικών προσεγγίσεων σχεδόν οποιαδήποτε μορφής επιφάνεια μπορεί να είναι κατάλληλη για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εξελίξεις στον τομέα των εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ, των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών κυψελών των φωτοβολταϊκών πάνελ δύο όψεων καθώς και οι εξελίξεις στον τομέα των μικροαντιστροφέων.

Παρά το γεγονός ότι για κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να προκύπτει πληθώρα τεχνικών περιορισμών, σπάνια ο διαθέσιμος χώρος εγκατάστασης αποτελεί τον σημαντικότερο περιορισμό. Σε ότι αφορά στην ορθολογική χρήση της γης τα μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα συχνά θεωρούνται αναποτελεσματικά καθώς καταλαμβάνουν εκτεταμένη επιφάνεια η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για γεωργική παραγωγή ή για άλλες δραστηριότητες πλην της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα, σύμφωνα με μελέτη του υπουργείου ενέργειας των ΗΠΑ εκτιμάται ότι προκειμένου να μηδενιστούν οι εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου εξαιτίας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ θα απαιτούνταν η κατασκευή φωτοβολταϊκών πάρκων συνολικής έκτασης ίσης με το 0,5% της χερσαίας επιφάνειας των ΗΠΑ.

Ως εκ τούτου η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε επιφάνειες άλλες από τα γήπεδα κέφι σε επιφάνειες στο αστικό πεδίο αποτελεί ανάγκη προκειμένου να

επιταχυνθεί η μετάβαση σε μοντέλα βιώσιμης ανάπτυξης αλλά και προκειμένου να επιταχυνθεί η πράσινη ενεργειακή μετάβαση. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση του δομημένου χώρου στο αστικό περιβάλλον και να περιοριστεί η περαιτέρω υποβάθμιση και κατάτμηση του φυσικού περιβάλλοντος.

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ σε κεκλιμένες στέγες επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι δεν περιορίζονται στο γεγονός ότι οι οροφές είναι κεκλιμένες. Μάλιστα όταν τα φωτοβολταϊκά πάνελ εγκαθίστανται σε κεκλιμένες στέγες βελτιστοποιείται ο καθαρισμός της επιφάνειας τους από τη φυσική βροχή μειώνονται οι επικαθίσεις και μειώνεται η πιθανότητα συσσώρευσης χιονιού κατά το χειμώνα. Ωστόσο συνήθως κεκλιμένες στέγες διαθέτουν οι μονοκατοικίες και δεν απαντώνται συχνά στα αστικά κέντρα. Σε κάθε περίπτωση προκειμένου να βελτιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα πρέπει η κλίση εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πάνελ να πλησιάζει το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης το οποίο μπορεί να επιτευχθεί είτε τοποθετώντας τα πάνελ παράλληλα με τις στέγες είτε χρησιμοποιώντας ειδικά συστήματα στήριξης προκειμένου να αυξομειωθεί η γωνία κλίσης. Επιπρόσθετα, προκειμένου να μεγιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αυτά θα πρέπει να έχουν γωνία αζιμουθίου μηδέν μοίρες, το οποίο σημαίνει ότι για εγκατάσταση στο βόρειο ημισφαίριο προσανατολισμός τους θα πρέπει να είναι νότιος και για εγκατάσταση στο νότιο ημισφαίριο προσανατολισμούς τους θα πρέπει να είναι βόρειος. Ωστόσο ακόμα και με τη χρήση εξελιγμένων συστημάτων στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ συχνά δεν είναι εφικτό να βελτιστοποιηθεί ο προσανατολισμός ή η κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ πράγμα το οποίο οδηγεί σε μειωμένη ενεργειακή απόδοση.

Σε περιπτώσεις όπου τα φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετούνται σε επίπεδες οροφές, υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς την επιλογή του προσανατολισμού και της κλίσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ωστόσο και σε αυτή την περίπτωση ο προσανατολισμός του κτιρίου δεν είναι τέτοιος ώστε η γωνία αζιμουθίου να είναι μηδέν μοίρες, η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνελ υπό γωνία σε σχέση με το πλαίσιο της οροφής οδηγεί σε δραστική μείωση και ισχύος η οποία μπορεί να εγκατασταθεί στην οροφή.

Αν πρόκειται για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ σε κάθετες επιφάνειες, όπως συμβαίνει με τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών και προσόψεων, πέρα από την ανάγκη επιλογής αισθημάτων στήριξης τέτοιων ώστε τα φωτοβολταϊκά πάνελ να μπορούν να αντέχουν τις μηχανικές καταπονήσεις αλλά και τις καταπονήσεις από ανεμοπιέσεις, αντικείμενο μελέτης αποτελεί και η αισθητική ενσωμάτωσή τους στο δομημένο περιβάλλον, καθώς σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία τοποθετούνται σε οροφές και στέγες, τα κάθετα τοποθετημένα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ορατά από παρακείμενα κτίρια αλλά και από το δρόμο και μπορεί να δημιουργούν οπτική όχληση. Σε ότι αφορά στη δυνατότητα ρύθμισης του προσανατολισμού και της κλίσης τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ, αυτή είναι περιορισμένη. Ωστόσο αν δεν επαρκεί η επιφάνεια των οροφών και στεγών για την εγκατάσταση των απαιτούμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων τότε η επιλογή αξιοποίησης των κάθετων επιφανειών αποτελεί μονόδρομο προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των κτηρίων. Τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνισή τους και κερδίζουν διαρκώς ενδιαφέρον οι ηλιακοί υαλοπίνακες, δηλαδή φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία είναι διάφανα ή ημιδιάφανα και τοποθετούνται αντί των κλασικών υαλοπινάκων στα κτίρια, και ειδικά σε πολυώροφα κτίρια. Η ενεργειακή τους αποδοτικότητα δεν υπερβαίνει το 7% δεδομένου ότι η κλίση τοποθέτησης τους είναι κάθετη, Ενώ περιορίζεται η ευεξία σχεδιασμό το κτίριο με αποτέλεσμα παρά το αυξημένο ενδιαφέρον η εφαρμογή τους επί της παρούσης να είναι περιορισμένη.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρεται ένας διαχωρισμός ανάμεσα σε φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία είναι ενσωματωμένα στα κτηριακά κελύφη και σε φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία προσαρτώνται στα κτηριακά κελύφη. Η μεγαλύτερη μερίδα των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών εμπίπτει στη δεύτερη κατηγορία καθώς αυτά τοποθετούνται σε υφιστάμενα κτίρια και δεν έχουν τοποθετηθεί στις προσόψεις ή στα κιγκλιδώματα των μπαλκονιών κατά τη φάση κατασκευής των κτηρίων.

4. Φωτοβολταϊκά μπαλκονιών

Στο κεφάλαιο αυτό συζητούνται και παρουσιάζονται τα ευρήματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στο πεδίο των φωτοβολταϊκών μπαλκονιών. Παρουσιάζονται παράγοντες οι οποίοι ωθούν την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών μπαλκονιών καθώς και σχετικές προκλήσεις. Επιπλέον παρουσιάζονται ευρήματα αναφορικά με την απόδοση των φωτοβολταϊκών μπαλκονιών.

4.1. Εισαγωγή

Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για εύρεση βιώσιμων πηγών ενέργειας, ειδικά για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των σπιτιών και ειδικά αυτών στα αστικά κέντρα έχει οδηγήσει στην αύξηση του ενδιαφέροντος γύρω από τα φωτοβολταϊκά μπαλκονιών. Δύο σημαντικοί περιοριστικοί παράγοντες σε ό,τι αφορά στην ανάπτυξη φωτοβολταϊκών στέγης στο αστικό περιβάλλον είναι η διαθεσιμότητα επιφάνειας για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών για όλες τις οικίες μιας πολυκατοικίας και το θεσμικό πλαίσιο το οποίο διέπει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στέγης σε κοινόχρηστους χώρους όπως είναι οι ταράτσες πολυκατοικιών. Σε επόμενη παράγραφο γίνεται αναλυτική αναφορά σε αυτούς καθώς και σε άλλους περιοριστικούς παράγοντες προκειμένου να τεκμηριωθεί η ανάγκη για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στέγης.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αποτελούν μια πρακτική, εύκολη στην εγκατάσταση και οικονομικά αποδοτική μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο ειδικά για εφαρμογή σε οικίες οι οποίες βρίσκονται σε πολυκατοικίες. Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να δεσμεύεται κοινόχρηστος χώρος στην ταράτσα της πολυκατοικίας, χωρίς να απαιτούνται πολύπλοκες ηλεκτρολογικές εργασίες και εγκαταστάσεις και χωρίς να γίνονται σημαντικές δομικές τροποποιήσεις στις πολυκατοικίες. Στην περίπτωση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης θα έπρεπε να ισομοιραστεί ο διαθέσιμος κοινόχρηστος χώρος στην ταράτσα και τυχόν σκέπαστρα στους εξώστες της πολυκατοικίας προκειμένου όλοι οι ιδιοκτήτες οικιών να

μπορούν να εγκαταστήσουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Επιπρόσθετα, για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης απαιτείται η τοποθέτηση ειδικός βάσεων για την έδραση των φωτοβολταϊκών πάνελ, η δημιουργία οδεύσεων ηλεκτρικών γραμμών ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά πάνελ, τον αντιστροφέα του συστήματος, τον μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας της οικίας και τον γενικό πίνακα της οικίας. Όπως γίνεται αντιληπτό στην περίπτωση αυτή αλλάζει δομικά ο κοινόχρηστος χώρος των πολυκατοικιών ενώ απαιτούνται εκτενείς ηλεκτρολογικές εργασίες για την όδευση καλωδίων και την εγκατάσταση μετρητικών διατάξεων και άλλου ηλεκτρικού εξοπλισμού. Σύμφωνα με τους Rodrigues et al. (2024), η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια στο αστικό περιβάλλον μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας από τις κατοικίες και ακολούθως στη μείωση των εκπομπών CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα μπορεί να οδηγήσει στη σημαντική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κατοικιών και συνολικά των κτηρίων (Rodrigues, et al., 2024).



17.Plug-and-play πάνελ τοποθετημένα σε κάγκελο, έτοιμα προς χρήση χωρίς ηλεκτρολόγο



18.Γραμμική διάταξη πάνελ σε μπαλκόνι, στερεωμένα με δομή βάσης



19.Εύκολα τοποθετούμενο και αποσπώμενο πάνελ, ιδανικό για ενοικιαστές ή αλλαγή κατοικίας



20.Κλασική λύση με κάγκελο, σε αστικό περιβάλλον, με μόνιμη στήριξη

Όπως προαναφέρεται στο δεύτερο κεφάλαιο, η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων και η θέση εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πάνελ. Πιο συγκεκριμένα η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαρτάται από την κλίση τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ και από τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πάνελ. Σε αντίθεση με τα

κλασικά φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης όπου μπορεί να επιλεγεί η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πάνελ, στα φωτοβολταϊκά μπαλκονιών τα φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετούνται κάθετα στην πρόσοψη του κτιρίου, δηλαδή εγκαθίστανται με κλίση 90° . Ως εκ τούτου, αναμένεται σημαντική μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε σχέση με τα κλασικά φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης. Επιπλέον, σε ό,τι αφορά τον προσανατολισμό της εγκατάστασης ομοίως σε ένα κλασικό φωτοβολταϊκό σύστημα στέγης τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα μπορούσαν να τοποθετηθούν με τρόπο τέτοιο ώστε το αζιμούθιο τους να είναι 0° , δηλαδή να είναι προσανατολισμένα στο νότο, ωστόσο συνήθως τοποθετούνται παράλληλα και κάθετα με τα όρια της ταράτσας της πολυκατοικίας προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η επιφάνεια που μπορεί να αξιοποιηθεί. Ως εκ τούτου, δεν αναμένεται σημαντική διαφορά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε σχέση με τα κλασικά φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης εξαιτίας του προσανατολισμού της εγκατάστασης.

Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι η κοινόχρηστη επιφάνεια προς εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στα δωμάτια και τις ταράτσες των πολυκατοικιών είναι πεπερασμένη και δεν διατίθεται συνήθως επαρκής χώρος για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών όλων των διαμερισμάτων μιας πολυκατοικίας, η επιλογή της εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών δεν συνεπάγεται μεγάλη διαφορά στην επιφάνεια εγκατάστασης, υπό το σενάριο ότι όλοι οι ιδιοκτήτες διαμερισμάτων μιας πολυκατοικίας θα ισομοιραζόντουσαν τη διαθέσιμη επιφάνεια στο δώμα ή στην ταράτσα της πολυκατοικίας. Ωστόσο υπό την υπόθεση ότι θα μπορούσε να εγκατασταθεί ένα σύστημα για να καλύψει το σύνολο των ενεργειακών αναγκών μιας οικίας στο δώμα του κτιρίου, πρέπει να σημειωθεί ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να καλύψουν μικρότερο μέρος των ενεργειακών αναγκών των κατοικιών το οποίο κυμαίνεται ανάμεσα στο 25 και 40% των ενεργειακών αναγκών (Goodmen Energy, 2023).

Επιπρόσθετα δεν αποκλείεται η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών, τα οποία θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά

την οικονομική απόδοση αυτών των φωτοβολταϊκών συστημάτων μέσα από τη βελτίωση του ταυτοχρονισμού παραγωγής πράσινης ενέργειας και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από την οικία. Μάλιστα, σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης σε ενέργειας σε φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ιδιοκατανάλωσης έως και περίπου 50% και να οδηγήσει σε μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας έως και 64%. Ενδεικτικά, σύμφωνα με την ίδια μελέτη η οικονομική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού σύστημα του μπαλκονιών μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την περίοδο απόσβεσης του να κυμαίνεται περί τα 4 έτη (EUPD Research & Anker SOLIX, 2025).

Επιπλέον στα πλαίσια του βιοκλιματικού σχεδιασμού στο αστικό περιβάλλον, σύμφωνα με τους Wu και Chul-Soo (2023), η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών μπορεί να συνδυαστεί με την ενσωμάτωση κάθετων πράσινων τοίχων προσφέροντας επιπλέον οφέλη στις κατοικίες, όπως τη βελτίωση του μικροκλίματος στο εσωτερικό των κατοικιών, με αποτέλεσμα τη μείωση των ενεργειακών αναγκών για τη θέρμανση και ψύξη των εσωτερικών χώρων, αλλά μπορεί να οδηγήσει και σε σημαντική αισθητική αναβάθμιση των κτηρίων (Wu & Chul-Soo, 2023).

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να αποτελέσουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας στα αστικά κέντρα, για την επιτάχυνση μετάβασης σε βιώσιμα μοντέλα ανάπτυξης και είναι για την ενίσχυση της βιωσιμότητας στο αστικό περιβάλλον. Η διαρκής πρόοδος στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών πάνελ, των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων και των μπαταριών αναμένεται να οδηγήσει στην περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών η οποία με τη σειρά της θα οδηγήσει στην ενίσχυση του ενδιαφέροντος γύρω από την εγκατάστασή τους.

4.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σε τεχνολογικό επίπεδο κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχημένη και αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών αποτελεί η επιλογή κατάλληλων τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ. Σύμφωνα με τους Wu και Chul-Soo (2023), ειδικά για εγκατάσταση σε φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να βρουν εφαρμογή εύκαμπτα καμπυλωτά και διαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ καθώς μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στις προσόψεις των κτηρίων, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία τους, όπως και στα κάγκελα μπαλκονιών χωρίς να εμποδίζεται η εισροή του φυσικού φωτός και η οπτική επαφή (Wu & Chul-Soo, 2023). Πιο συγκεκριμένα, οι Wu και Chul-Soo (2023) πρότειναν την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ και κάθετων πράσινων προσόψεων σε υφιστάμενες πολυκατοικίες προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση των πολυκατοικιών αλλά και να επιτευχθεί αισθητική αναβάθμιση του αστικού τοπίου. Μάλιστα πρότειναν ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να συνδυαστούν και με ηλιοθερμικά πάνελ για την παράλληλη παραγωγή θερμικής ενέργειας εκτός από ηλεκτρική ενέργεια. Ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών πάνελ και πράσινων προσόψεων μπορεί να φέρει σωρευτικά οφέλη μέσα από την μείωση των ενεργειακών αναγκών των κατοικιών και μέσα από την κάλυψη των ενεργειακών αυτών αναγκών από πράσινη παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Οι Wu και Chul-Soo (2023) Εντοπίζουν ζητήματα σε ότι αφορά στην αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών μπαλκονιών εξαιτίας της μεγάλης γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ιδανικά, η κλίση εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πάνελ πρέπει να πλησιάζει στο γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης προκειμένου η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια των πάνελ. Ενδεικτικά στο άρθρο αυτό αναφέρεται ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών έχουν σημαντικά χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση από ότι σε φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 65% έως 75% της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στέγης. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται ετήσια παραγωγή από 180kWh έως 220kW για κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ ονομαστικής ισχύος 300Wr, τοποθετημένο σε κάθε πρόσοψη κτιρίου με νότιο προσανατολισμό, δηλαδή με γωνία αζιμούθιο μηδέν μοίρες, σε γεωγραφικό πλάτος 37°

έως 40°. Επιπρόσθετα οι ίδιοι ερευνητές εστίασαν στις τεχνικές απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να πληρούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ προκειμένου να είναι κατάλληλα για τοποθέτηση σε προσόψεις κτηρίων και δη σε συνδυασμό με κάθετες προσόψεις κτηρίων. Το πλαίσιο αυτό πρότειναν ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα πρέπει να έχουν μικρό βάρος και μικρό πάχος, προκειμένου να μην επιβαρύνεται στατικά η κατασκευή στην οποία πρόκειται να τοποθετηθούν. Επιπλέον πρότειναν ότι θα πρέπει να έχουν υψηλή αντοχή στην υγρασία και στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, απαιτήσεις τις οποίες πληρούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία εγκαθίστανται και σε συστήματα στέγης. Ωστόσο αν πρόκειται να συνδυαστούν με κάθετες πράσινες προσόψεις αναμένεται να είναι επιβαρυμένες σε συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασιακών διακυμάνσεων λόγω της εξάτμισης του νερού και της συσσωρευμένης θερμότητας λόγω του ποτίσματος και των ίδιων των κάθετων πράσινων προσόψεων. Επιπλέον πρότειναν ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ για τοποθέτηση σε κάθετες προσόψεις θα πρέπει να έχουν υψηλή αποδοτικότητα σε συνθήκες σκίασης. Η σκίαση δεν αναμένεται μόνον εξαιτίας των κάθετων πράσινων προσόψεων αλλά και εξαιτίας άλλων παρακείμενων κατασκευών, όπως πολυκατοικίες κολώνες δέντρα και άλλα. Στη βάση αυτή πρότειναν ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ τεχνολογίας μισής κυψέλης με πολλές διόδους παράκαμψης (by pass diodes) μπορούν να αποδίδουν καλύτερα σε συνθήκες σκίασης, καθώς όταν σκιάζεται ένα μέρος του φωτοβολταϊκού πάνελ τα υπόλοιπα μέρη του μπορούν να συνεχίζουν να παράγουν ενέργεια με απόδοση η οποία θα πλησιάζει στην ονομαστική τους απόδοση. Σημαντικός παράμετρος η οποία πρέπει να εξετάζονται κατά την επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ για φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών είναι η δυνατότητα αισθητικής ενσωμάτωσής τους στην πρόσοψη των κτηρίων καθώς μπορούν να αλλάξουν άρδην την εξωτερική εικόνα ενός κτιρίου.

Σε ότι δε αφορά στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε συνδυασμό με κάθετες πράσινες προσόψεις, ο ίδιο άρθρο προτείνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πάνελ χάρη στην παρακείμενη κάθετη πράσινη πρόσοψη, η οποία μπορεί να κυμαίνεται ανάμεσα στους 1,5°C έως 3°C σε σχέση με άλλα πάνελ τοποθετημένα στην πρόσοψη ενός

κτηρίου χωρίς να υπάρχει κάθετη πράσινη πρόσοψη. Όπως αναφέρεται στο τρίτο κεφάλαιο, όσο αυξάνει η θερμοκρασία στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πάνελ τόσο μειώνεται η ενεργειακή τους απόδοση εξαιτίας μείωση της τάσης ή και του ρεύματος εξόδου. Ενδεικτικά για κάθε έναν βαθμό κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας της επιφάνειας πάνω από τις συνθήκες STC μειώνεται η απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ κατά περίπου 0,4%. Ως εκ τούτου η παραπάνω μείωση μπορεί να επιφέρει αύξηση της απόδοσης κατά 0,5% έως 1,2%. Συνεπώς, ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών πάνελ και κάθε των πράσινων προσόψεων έχει σωρευτικά οφέλη καθώς βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου, την αισθητική του κτηρίου και την ενεργειακή απόδοση του ίδιου του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών (Wu & Chul-Soo, 2023).

Οι Naeimi et al. (2020) πρότειναν ότι η δυνατότητα μεταβολής της γωνίας κλίσης των φωτοβολταϊκών πάνελ καθώς εναλλάσσονται οι εποχές του χρόνου μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ενδεικτικά αναφέρουν ότι η δυνατότητα αυξομείωσης της κλίσης από 15° έως 60° μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ενεργειακής απόδοσης έως και 15%. Ως εκ τούτου, αν είναι εφικτό τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών να τοποθετούνται υπό μια μικρή κλίση, ώστε να μην είναι κάθετα με το έδαφος, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ενεργειακή τους απόδοση (Naeimi, et al., 2020).

Οι Krauter και Bendfeld (2024) εστίασαν στην ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών μικροαντιστροφέων οι οποίοι τοποθετούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών. Προκειμένου να αξιολογήσουν καλύτερα την απόδοση των αντιστροφέων εξέτασαν 17 διαφορετικούς τύπους σε διαφορετικά επίπεδα εγκατεστημένης ισχύος στο πεδίο. Όπως τονίζουν οι Krauter και Bendfeld (2024), κατά την αξιολόγηση και επιλογή του εξοπλισμού για φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών σπάνια αξιολογείται η ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών μικροαντιστροφέων καθώς το κύριο κριτήριο επιλογής του εξοπλισμού είναι η εγκατεστημένη ισχύς και η απαιτούμενη επιφάνεια εγκατάστασης. Οι εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι όταν η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ κυμαίνεται κάτω από το 60% ή πάνω από το 80% της ονομαστικής ισχύος του μικρού αντιστροφέα η απόδοση του μειώνεται δραματικά. Επιπλέον στην

κατεύθυνση επιλογής του βέλτιστου εξοπλισμού για την κάθε εγκατάσταση, οι Krauter και Bendfeld (2024) πρότειναν τη χρήση του ευρωπαϊκού βαθμού απόδοσης των μικροαντιστροφέων (η euro) αντί του μέγιστου βαθμού απόδοσης (η max) καθώς ο δεύτερος αναφέρεται σε συνθήκες STC οι οποίες σαφώς δεν επιτυγχάνονται στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών εξ αρχής εξαιτίας της κλίσης και του προσανατολισμού των φωτοβολταϊκών πάνελ (Krauter & Bendfeld, 2024). Ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης μπορεί να είναι πιο αντιπροσωπευτικός ειδικά για φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών καθώς για τον υπολογισμό του λαμβάνεται υπόψη η μέση κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας για το εύρος των περιοχών της Ευρώπης και καθώς η τιμή αυτού το βαθμό απόδοσης προκύπτει από τη στάθμιση των αποδόσεων του αντιστροφέα για διαφορετικά επίπεδα εισερχόμενης ισχύος (ηλιακής ακτινοβολίας). Κατόπιν αξιολόγησης 17 διαφορετικών μικροαντιστροφέων, οι Krauter και Bendfeld (2024) προτείνουν ότι οι μικροαντιστροφείς με τις βέλτιστες αποδόσεις επιτυγχάνουν βαθμούς απόδοσης η euro πάνω από 95% ενώ σε αντιστροφείς χαμηλότερης ποιότητας ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης δεν ξεπερνά το 90%. Επιπρόσθετα στο ίδιο άρθρο προτείνεται ότι η απόδοση των μικρών αντιστροφέων δεν εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ των φωτοβολταϊκών πάνελ για εγκατάσταση σε μπαλκόνια αλλά εξαρτάται αμιγώς από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του μικρού αντιστροφέα. Σε ό τι αφορά στην επίδραση της σκίασης και στην και απόδοση των μικροαντιστροφέων υπό συνθήκες σκίασης, προτείνεται ότι οι μικροαντιστροφείς με διαφορετικούς MPPT για κάθε διαφορετικό πάνελ επιτυγχάνουν σημαντικά υψηλότερη ενεργειακή απόδοση από ότι μικρό αντιστροφείς οι οποίοι έχουν έναν MPPT για όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ της εγκατάστασης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ενδέχεται στο αστικό πεδίο ένα από τα 2 ή 3 πάνελ ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών να σκιάζεται με αποτέλεσμα η μειωμένη του απόδοση να επηρεάζει και την απόδοση των υπόλοιπων φωτοβολταϊκών πάνελ του συστήματος. Σύμφωνα με τις εργαστηριακές δοκιμές, φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών με έναν MPPT είχαν έως και 12% λιγότερη και απόδοση από φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών με έναν MPPT για κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ. Επιπλέον, οι Krauter και Bendfeld (2024) αξιολόγησαν τη διακύμανση της ενεργειακής

απόδοσης των μικροαντιστροφών συναρτήσει της μεταβολής θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Δεδομένου ότι οι μικροαντιστροφείς τοποθετούνται συχνά κοντά στα πανελ ή επί της εξωτερικής πρόσοψης του κτιρίου, η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι αυξημένη. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τις εργαστηριακές δοκιμές, καταγράφηκε μέση μείωση της απόδοσης των μικροαντιστροφών της τάξεως του 0,4% ανά βαθμό κελσίου για θερμοκρασίες πάνω από τους 40°C. Στο πλαίσιο αυτό οι ερευνητές πρότειναν ότι υπάρχει ανάγκη για φυσική ή τεχνητή ψύξη των μικροαντιστροφών ή για τοποθέτησή τους σε κάποιο μέρος με σκίαση, ειδικά για φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών σε περιοχές με ιδιαίτερα αυξημένες θερμοκρασίες το καλοκαίρι. Στο συγκεκριμένο άρθρο οι ερευνητές επιχείρησαν να αποτυπώσουν τη διακύμανση του κόστους κτήσης μικροαντιστροφών με υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τα οφέλη τα οποία αναμένονται σε επίπεδο παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως. Σύμφωνα με την ανάλυσή τους, η επιλογή ενός μικροαντιστροφέα με αυξημένη απόδοση κατά 4% έως 5% μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως των 30-45 kWh/έτος για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών ονομαστικής ισχύος 800Wr. Λαμβάνοντας υπόψη ένα μέσο κόστος ενέργειας από 0,30€ έως 0,40€/kWh, προκύπτει όφελος από 12€ έως 18€ ετησίως. Κατόπιν έρευνας αγοράς, κατά τον χρόνο συγγραφής του άρθρου, το κόστος ενός μικροαντιστροφέα υψηλής απόδοσης μπορεί να είναι έως και 60€ υψηλότερο από έναν μικροαντιστροφέα χαμηλότερης απόδοσης, το οποίο σημαίνει ότι το αυξημένο κόστος αναμένεται να αποσβέσει εντός 3 έως 5 ετών (Krauter & Bendfeld, 2024).

Οι Xiang και Matusiak (2022), εστίασαν ευρύτερα στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών, χωρίς να περιορίζονται σε plug and play συστήματα, αλλά εξετάζοντας πιο σφαιρικά το ζήτημα του κτηριακού σχεδιασμού και της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων στις κάθετες προσόψεις των κτηρίων, ειδικά για πολυώροφα κτίρια κατοικιών, προκρίνοντας την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε προβολικά μπαλκόνια αν αυτά είναι διαθέσιμα (Xiang & Matusiak, 2022).

Οι Xiang και Matusiak (2022) εντοπίζουν ότι ειδικά σε πολυώροφα κτίρια υπάρχουν μεγάλες διαθέσιμες επιφάνειες για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ

προκειμένου να μειωθεί το ανθρακικό αποτύπωμα των κατοικιών αυτών των πολυώροφων κτηρίων οι οποίες δεν είναι άλλες από τις κάθετες προσόψεις τους. Μάλιστα σύμφωνα με τους ερευνητές, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ και φωτοβολταϊκών συστημάτων του μπαλκονιών σε πολυώροφα κτίρια μπορεί να ενταχθεί σε ένα ευρύτερο πλαίσιο αρχιτεκτονικής αισθητικής, ενίσχυσης της ποιότητας φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτηρίων, και ταυτόχρονης απομείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών. Η μελέτη των Xiang και Matusiak (2022) εστίασε στην πόλη του Τροντχάιμ στη Νορβηγία, μια πόλη με ιδιαίτερα κλιματικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι όμοια στις σκανδιναβικές χώρες. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοψίζουν στο μεγάλο γεωγραφικό πλάτος, στη διαρκώς και για μεγάλα διαστήματα χαμηλή θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στις έντονες εποχιακές διακυμάνσεις του φυσικού φωτός οι οποίες εισάγουν περιορισμούς στο φυσικό φωτισμό των κατοικιών. Προκειμένου να εξεταστούν καλύτερα οι δυνατότητες ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών πάνελ στα μπαλκόνια των πολυώροφων κτηρίων, οι Xiang και Matusiak (2022) κατέγραψαν τα μπαλκόνια των πολυκατοικιών στο Τροντχάιμ και τα διαχώρισαν σε 3 κατηγορίες μικρό μεσαίο και μεγάλο μπαλκόνι, καθώς ανάλογα με τη διαθεσιμότητα επιφάνειας επηρεάζεται και η δυνατότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ και φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Ακολούθως προκειμένου να εξεταστεί καλύτερα η εφικτότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών αξιολογήθηκε η θέση των μπαλκονιών σε σχέση με τους επάνω και κάτω ορόφους κάθε κατοικίας καθώς ενδέχεται λόγω της διάταξης των μπαλκονιών τα μπαλκόνια ενός ορόφου να σκιάζουν τα μπαλκόνια αλλά και τα διαμερίσματα ενός άλλου ορόφου. Οι Xiang και Matusiak (2022) ανέλυσαν τη διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού και κατέληξαν ότι σε πολυκατοικίες όπου τα μπαλκόνια βρίσκονται πλευρικά των κατοικιών και δεν υπάρχουν σκιάσεις από τον έναν όροφο στον άλλο τόσο φυσικός φωτισμός στο εσωτερικό των διαμερισμάτων όσο και η διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας φτάνουν στις μέγιστες δυνατές τιμές. Επιπρόσθετα προκειμένου να καταγράψουν ποια θα ήταν τα οφέλη σε όρους φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των διαμερισμάτων από την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών μπαλκονιών κατέγραψαν τα δομικά στοιχεία των

μπαλκονιών και τα κατέταξαν σε 3 διαφορετικές κατηγορίες ανακλαστικότητας, προτείνοντας ότι όσο πιο ανακλαστικά είναι τα φονικά υλικά στο δάπεδο των μπαλκονιών τόσο καλύτερος είναι ο φυσικός φωτισμός στο εσωτερικό των διαμερισμάτων. Σε ό,τι αφορά στα ίδια τα φωτοβολταϊκά πάνελ οι Xiang και Matusiak (2022) πρότειναν ότι η επιφάνεια τους θα πρέπει να προσαρμόζεται στα χρώματα των κτηρίων του αστικού κέντρου, ενώ θα πρέπει να υπάρχει μια διαβάθμιση από τους χαμηλότερους στους ψηλότερους ορόφους των κτηρίων με την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πάνελ να σκουραίνει στους υψηλότερους ορόφους των κτηρίων.

Ακολούθως οι Xiang και Matusiak (2022) εξέτασαν την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων για μπαλκόνια και προσόψεις λαμβάνοντας υπόψη, μεταξύ άλλων, την απόχρωση των φωτοβολταϊκών πάνελ. Θέτοντας τα μαύρα φωτοβολταϊκά πάνελ ως σημείο αναφοράς όπου θεωρήθηκε ότι επιτυγχάνεται το 100% της ενεργειακής απόδοσης εξέτασαν πιο ανοιχτές αποχρώσεις φωτοβολταϊκών πάνελ οι οποίες έφτασαν να επιτυγχάνουν το 70% της απόδοσης του σημείου αναφοράς. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι ανάκλαση και όσο μικρότερη είναι η απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας τόσο μειώνεται η ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ και ακολούθως των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Σε ό,τι αφορά στην πραγματική συνεισφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των διαμερισμάτων των πολυώροφων κτηρίων, οι Xiang και Matusiak (2022) αξιολόγησαν την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών με βάση τον προσανατολισμό των μπαλκονιών, την ονομαστική απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ, και τις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Στο άρθρο αυτό προτείνονται φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών και προσόψεων τα οποία μπορούν να καλύψουν από το 31% έως και το 45% Τροντχάιμ, ενώ σε περίπτωση όπου τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών και προσόψεων συνδυάζονται με φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης το ποσοστό κάλυψης των ετήσιων ενεργειακών αναγκών σε ηλεκτρική μπορεί να φτάσει ακόμη και το 62%. Στο άρθρο αυτό ελήφθη ως δεδομένο ότι ένα μέσο νοικοκυριό καταναλώνει περί τις 3.870kWh ετησίως, καθώς και ότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών σε θέματα μπαλκονιών

κυμαίνεται από το 75% έως και το 90% ανάλογα με τις παραπάνω παραμέτρους (προσανατολισμός μπαλκονιών η πρόσοψης και χρωματισμός επιφάνειας φωτοβολταϊκού πάνελ).

Σε όρους περιβαλλοντικής απόδοσης, η εφαρμογή των προτεινόμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων για μπαλκόνια και προσόψεις μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών και συνολικά των κτηρίων σε ένα αστικό κέντρο. Οι Xiang και Matusiak (2022) υπολογισαν ότι η ενσωμάτωση τέτοιων προσόψεων σε πολυώροφα κτίρια θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της εκπομπής αερίων α ρύπων του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα σε μείωση της εκπομπής CO₂ κατά 35 έως 40 τόνους ετησίως ανά πολυκατοικία, λαμβάνοντας υπόψη ότι σύμφωνα με το ευρωπαϊκό ενεργειακό μείγμα εκπέμπονται περί τα 0,23 έως 0,28 kg διοξειδίου του άνθρακα για κάθε καταναλισκόμενη κιλοβατώρα ηλεκτρικής ενέργειας (Xiang & Matusiak, 2022).

Ως εκ τούτου από το άρθρο των Xiang και Matusiak (2022) καταδεικνύεται η δυνατότητα σημαντικής συνεισφοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε μπαλκόνια και προσόψεις στην κατεύθυνση της πράσινης μετάβασης και απανθρακοποίησης ειδικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και η δυνατότητα σημαντικής συνεισφοράς τους στην πρακτική μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας για τους κατοίκους των αστικών κέντρων οι οποίοι μέχρι πρότινος δεν είχαν τη δυνατότητα να απολαύσουν αυτά τα οφέλη δεδομένων των περιορισμένων επιφανειών προς εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες (Xiang & Matusiak, 2022).

Όπως προαναφέρεται, οι Xiang και Matusiak (2022) προτείνουν ότι επί συνεισφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσόψεων και μπαλκονιών μπορεί να καλύψει περίπου το 40% των ενεργειακών αναγκών των διαμερισμάτων, αν τα φωτοβολταϊκά αυτά συστήματα εγκαθίστανται και καταλαμβάνουν και τις προσόψεις των κτηρίων. Ως εκ τούτου γίνεται αντιληπτό ότι μολονότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών του προσόψεων μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών στο αστικό πεδίο, δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως λύσεις οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ενεργειακή αυτονομία, εκτός και αν

συνδυάζονται και με άλλος σταθμούς παραγωγής πράσινης ενέργειας όπως φωτοβολταϊκά στέγης, όπου η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μπορεί να φτάνει συνδυαστικά μέχρι και το 62% των ετήσιων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια. Εναλλακτικά ποιοι συνδυαστικά με την εγκατάσταση και άλλων σταθμών παραγωγής πράσινης ενέργειας, η τυχόν ενσωμάτωση στρατηγικών διαχείρισης της καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας μπορεί να μεγεθύνει τα οφέλη των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσόψεων και μπαλκονιών σε όρους μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών στο αστικό πεδίο. Σε κάθε περίπτωση, οι Xiang και Matusiak (2022) προτείνουν ότι η βέλτιστη πρακτική για την ενσωμάτωση εικόνων σε προσόψεις και μπαλκόνια είναι αυτή της ολιστικής εξέτασης του σχεδιασμού των κτηρίων, με τα φωτοβολταϊκά συστήματα να ενσωματώνονται εξ αρχής κατά την κατασκευή των κτηρίων στις προσόψεις και τα μπαλκόνια τους προκειμένου να μεγιστοποιούνται τα οφέλη από την ενσωμάτωσή τους σε επίπεδο διαμερισμάτων κτηρίων και αστικών κέντρων (Xiang & Matusiak, 2022).

Οι Freitas και Brito (2016) εξέτασαν τα οφέλη από την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ διπλής όψεως στις κατακόρυφες και ημι-οριζόντιες επιφάνειες των μπαλκονιών πολυώροφων κτηρίων. Σύμφωνα με το άρθρο αυτό, τα μπαλκόνια των πολυώροφων κτηρίων, είτε πρόκειται για ημι-οριζόντιες είτε πρόκειται για κάθετες επιφάνειες προσφέρουν ιδανικές συνθήκες για τη συλλογή τόσο τις άμεσες όσο και τις ανακλώμενες ηλιακής ακτινοβολίας προκειμένου αυτή να αξιοποιηθεί και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Freitas & Brito, 2016). Οι Freitas και Brito (2016) διεξήγαγαν παραμετρική μοντελοποίηση και προσομοίωση της λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων τοποθετημένα σε μπαλκόνια προκειμένου να εξετάσουν την επίδραση της γεωμετρίας των μπαλκονιών και την επίδραση της επιλογής φωτοβολταϊκών πάνελ διπλής όψεως στην ενεργειακή απόδοση των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Πιο συγκεκριμένα διεξήχθησαν προσομοιώσεις για τρεις τοποθεσίες εγκατάστασης με σημαντικά διαφορετικά γεωγραφικά και ηλιακά χαρακτηριστικά και πιο συγκεκριμένα για το Όσλο (59.95°N), για τη Λισαβόνα (38.71°N) και για το Άμπου Ντάμπι (24.47°N). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κατέδειξαν ότι υπό βέλτιστες συνθήκες γεωμετρίας

των μπαλκονιών η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών με φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψεως μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως και 30% με την μέση αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων να κυμαίνεται περίπου στο 20% σε σχέση με φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών χωρίς ανακλαστικές επιφάνειες και με φωτοβολταϊκά πάνελ διαφορετικής τεχνολογίας από αυτά των διπλής όψεως. Επιπρόσθετα σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων οι υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις καταγράφονται σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στα μπαλκόνια των ανατολικών προσόψεων των πολυώροφων κτηρίων και ειδικότερα στη Λισαβόνα και στο Άμπου Ντάμπι όπου τα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας είναι υψηλότερα σε σχέση με το Όσλο (Freitas & Brito, 2016).

Σύμφωνα με το άρθρο αυτό όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας εγκατάστασης, τόσο μειώνεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία αλλά και η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να περιορίζονται σημαντικά τα οφέλη από την επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ διπλής όψεως, ειδικά για μπαλκόνια σε προσόψεις με βόρειο ή δυτικό προσανατολισμό. Αντί αυτού, οι Freitas και Brito (2016) προτείνουν ότι σε πόλεις με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να είναι αποδοτικά, σε βαθμό τέτοιο έτσι ώστε να είναι και οικονομικά βιώσιμη η εγκατάστασή τους, όταν εγκαθίστανται μόνο σε προσόψεις με νότιο προσανατολισμό.

Αντίθετα σε περιοχές με μικρό γεωγραφικό πλάτος όπως το Άμπου Ντάμπι, τα υψηλά επίπεδα διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας καθιστούν βιώσιμη την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών ακόμη και σε μπαλκόνια προσόψεων με βόρειο προσανατολισμό δεδομένου ότι τα μπαλκόνια διαθέτουν υλικά με υψηλές τιμές ανάκλασης έτσι ώστε τα φωτοβολταϊκά πάνελ να απορροφούν σημαντικά ποσά ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Περαιτέρω, οι Freitas και Brito (2016) αξιολόγησαν την ευαισθησία των φωτοβολταϊκών πάνελ διπλής όψεως συνάρτηση τις εγκαταστάσεις κουφωμάτων και δομικών υλικών με υψηλές τιμές ανάκλασης, π.χ. ανοιγμάτων με μεγάλες γυάλινες επιφάνειες, καθρέφτες ή

λευκούς τοίχους στις προσόψεις των κτηρίων. Πιο συγκεκριμένα όταν τα δομικά αυτά υλικά με υψηλές τιμές ανάκλασης αντικαταστάθηκαν με άλλα με χαμηλότερες τιμές ανάκλασης η συνολική απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών μειώθηκε σημαντικά έως και 30% σε επίπεδο ετήσιας παραγωγής ενέργειας. Στη βάση αυτή, οι Freitas και Brito (2016) προτείνουν ότι η επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ διπλής όψεως και η τακτική τους συντήρηση και ο τακτικός καθαρισμός μπορεί να εξασφαλίσει υψηλές αποδόσεις των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών.

Επιπλέον στο ίδιο άρθρο εξετάστηκε η επίδραση της σκίασης από παρακείμενες κατασκευές ανθρώπους ή αντικείμενα στα μπαλκόνια των κτηρίων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι όταν εισήχθη στην προσομοίωση η παρουσία ενός ανθρώπου στο χώρο του μπαλκονιών η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών μειώθηκε κατά περίπου 5% εξαιτίας της μειωμένης ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην πίσω όψη των φωτοβολταϊκών πάνελ διπλής όψεως. Στη βάση αυτή, οι Freitas και Brito (2016) προτείνουν ότι είναι σημαντικό να επιλέγονται φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψεως με κατά το δυνατόν περισσότερες διόδους παράκαμψης και μικρό αντιστροφής με κατά το δυνατόν περισσότερους MPPT έτσι ώστε να περιορίζεται η επίδραση της σκίασης μέρους των φωτοβολταϊκών πάνελ στη συνολική ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών.

Συγκρίνοντας την ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών με φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψεως και φωτοβολταϊκά πάνελ μίας όψεως, οι Freitas και Brito (2016) προτείνουν ότι αν τα φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετηθούν σε σταθερή και κάθετη διάταξη, τα φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψεως μπορεί να οδηγούν σε μειωμένη ενεργειακή απόδοση ακόμη και έως 15%, ειδικά σε τοποθεσίες εγκαταστάσεις με μεγάλο γύρο πλάτος όπως το Όσλο. Αντίθετα για τοποθεσίες εγκατάστασης με μικρό γεωγραφικό πλάτος, η επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ διπλής όψεως μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ενεργειακής απόδοσης έως και 8%. Τα συμπεράσματα αυτά εξηγούνται από το γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψεως παράγουν περισσότερη όταν υπάρχει μεγαλύτερη διαθεσιμότητα ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης και όσο αυξάνεται η κλίση των

φωτοβολταϊκών πάνελ, αλλά και όσο μειώνεται η απόσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ από παρακείμενες κατασκευές όπως τα κιγκλιδώματα των μπαλκονιών ή οι προσόψεις των κτηρίων (Freitas & Brito, 2016).

Οι Seme et al. (2024) μελέτησαν εκτενώς τόσο την ενεργειακή απόδοση όσο και την οικονομική απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών και διεξήγαγαν μια ολοκληρωμένη τεchnικοοικονομική ανάλυση προκειμένου να αξιολογήσουν τη βιωσιμότητα και σκοπιμότητα εγκατάστασης τέτοιων φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στην περιοχή της Σλοβενίας. Στη Σλοβενία υφίσταται περιορισμός της ανώτατης ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στα 600Wr, με τα συστήματα αυτά να είναι εφικτό να εγκατασταθούν από τους ίδιους τους καταναλωτές χωρίς να απαιτείται από το διαχειριστή του δικτύου η εγκατάσταση να γίνει από εξειδικευμένους τεχνικούς και χωρίς να απαιτείται κάποια αδειοδοτική διαδικασία από το διαχειριστή του δικτύου ή από κάποιον άλλον φορέα, με προϋπόθεση να συμμορφώνονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών με συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές ειδικά σε ό,τι αφορά στην ασφάλεια των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Πιο συγκεκριμένα στη Σλοβενία υπάρχει συγκεκριμένη μέριμνα για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις χαμηλής ισχύος, και υπό την οποία οι καταναλωτές οφείλουν να γνωστοποιήσουν στο διαχειριστή του δικτύου τουλάχιστον δύο εβδομάδες πριν την ενεργοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών αναφορικά με τα τεχνικά στοιχεία του εγκαθιστούμε εξοπλισμού και με την ημερομηνία ενεργοποίησης του. Ωστόσο πέραν από την απαιτούμενη γνωστοποίηση δεν προβλέπεται κάποια άλλη αδειοδοτική διαδικασία ούτε και απαιτείται η σύναψη σύμβασης με το διαχειριστή του δικτύου ή με κάποιον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας. Το ευνοϊκό αυτό θεσμικό πλαίσιο έχει καταστήσει τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μια ευέλικτη και προσιτή λύση για τη μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας στη Σλοβενία, ειδικά για κατοικίες σε πολυώροφα κτίρια καθώς και για ενοικιαζόμενες κατοικίες όπου δεν προβλέπεται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης από τους ενοικιαστές από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο (Seme, et al., 2024).

Οι Seme et al. (2024) εστίασαν στο προφίλ κατανάλωσης ενέργειας διαφορετικών κατηγοριών νοικοκυριών και διεξήγαγαν τεχνικοοικονομική ανάλυση προκειμένου να αξιολογήσουν την οικονομική σκοπιμότητα και βιωσιμότητα της επένδυσης μέσα από την αξιολόγηση της εξοικονόμησης ενέργειας. Για την εκπόνηση αυτής της μελέτης αναλύθηκαν τα δεδομένα καταναλώσεων σε επίπεδο δεκαπεντάλεπτου καθώς και εισήχθησαν δεδομένα αναφορικά με τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας από την μετεωρολογική υπηρεσία της Σλοβενίας.

Το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών στην τεχνικοοικονομική ανάλυση των Seme et al. (2024) αποτελούνταν από φωτοβολταϊκά πάνελ συνολικής ισχύος 600W, με ονομαστική απόδοση 20% και έναν μικροαντιστροφέα ενώ η σύνδεσή του με την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση των νοικοκυριών πραγματοποιείται μέσω σύνδεσης σε ένα ρευματοδότη του μπαλκονιών. Σύμφωνα με έρευνα αγοράς των Seme et al. (2024), αντίστοιχα πακέτα εξοπλισμού φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών διατίθενται στη Σλοβενία με το κόστος τους να κυμαίνεται από τα 600 έως και τα 1.000€ συμπεριλαμβανόμενου του ΦΠΑ. Προκειμένου τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και της τεχνικοοικονομικής ανάλυσης να είναι ρεαλιστικά, εισήχθησαν αναλυτικά δεδομένα κλίσεων και προσανατολισμού των πάνελ, καθώς και δεδομένα από τα φυλλάδια τεχνικών προδιαγραφών των φωτοβολταϊκών πάνελ και του μικροαντιστροφέα, ενώ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αξιολογήθηκε σε επίπεδο δεκαπενταλέπτου προκειμένου να μπορεί να συγκριθεί με τα διαθέσιμα δεδομένα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα προκειμένου τα αποτελέσματα της τεχνικοοικονομικής ανάλυσης να είναι ακόμη πιο ακριβή και ρεαλιστικά, εισήχθησαν στη μελέτη οι τιμές πραγματικών τιμολογίων ηλεκτρικής ενέργειας, με διακύμανση χρέωσης σε ζώνες χαμηλής και υψηλής ζήτησης συμπεριλαμβανομένων χρεώσεων χρήσης δικτύου διανομής και μεταφοράς, χρεώσεων για ΑΠΕ, και ειδικών φόρων και ΦΠΑ. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του άρθρου αυτού, η ετήσια κατανάλωση ενός μέσου νοικοκυριού στη Σλοβενία κυμαίνεται περί τις 3.537,9 kWh, ενώ το μέσο μηνιαίο κόστος ρεύματος φθάνει περίπου στα 64,0€, δηλαδή ετήσια το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας φτάνει περίπου στα 768,32€ (Seme, et al., 2024).

Κατόπιν εγκατάστασης του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών plug and play, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της τεχνικοοικονομικής ανάλυσης, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο η οποία οδηγεί σε μείωση του ετήσιου κόστους ενέργειας κατά περίπου 15%. Κατόπιν υπολογισμού αυτής της εξοικονόμησης, το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για ένα μέσο νοικοκυριό στη Σλοβενία μειώνεται στα 651,41€, καθώς επιτυγχάνεται μια εξοικονόμηση της τάξεως των 116,92€. Λαμβάνοντας αυτή την ετήσια εξοικονόμηση υπόψη καθώς και το προαναφερόμενο κόστος κτήσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών υπολογίζεται μια περίοδο απόσβεσης η οποία κυμαίνεται από τα 5 έως τα 9 έτη, ανάλογα με την τελική τιμή κτήσης του προς εγκατάσταση εξοπλισμού, καθώς και ανάλογα με το προφίλ κατανάλωσης ενέργειας του εκάστοτε νοικοκυριού. Η ελάχιστη περίοδος απόσβεσης υπολογίζεται σε περίπου τεσσεράμισι έτη, και μπορεί να επιτευχθεί υπό σενάριο αύξησης των τιμών προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και αύξησης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 30%, ενώ η μέγιστη η περίοδος απόσβεσης υπολογίζεται σε περίπου 10,8 έτη και επιτυγχάνεται υπό σενάριο μείωσης των τιμών προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και μείωσης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 30%.

Ακολούθως προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι προσαρμοσμένα σε διαφορετικά νοικοκυριά, οι Seme et al. (2024) αξιολόγησαν την απόδοση το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα του μπαλκονιών για 6 διαφορετικούς τύπους νοικοκυριών τα οποία διαφέρουν ως προς την επιφάνεια της κάθε κατοικίας, με την επιφάνεια να κυμαίνεται από 35 έως 135 τ.μ., να διαφέρουν ως προς τον τύπο του συστήματος θέρμανσης, διακρίνοντάς νοικοκυριά με τηλεθέρμανση, με χρήση υπέρυθρων πάνελ θέρμανσης ή με αντλίες θερμότητας, και να διαφέρουν ως προς την ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να κυμαίνεται από 751 έως 6829 kWh. Για κάθε διαφορετικό τύπο νοικοκυριού υπολογίζεται καν διαφορετική χρονιά απόσβεσης για την απόκτηση του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και την κατανομή της εντός ενός ημερολογιακού έτους.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της τεχνικοοικονομικής ανάλυσης, καταδεικνύεται ότι ο μικρότερος χρόνος απόσβεσης επιτυγχάνεται σε νοικοκυριά με σταθερά υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους καθώς η παραγόμενη ηλεκτρική από το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών απορροφάται σε μεγαλύτερο βαθμό άμεσα χωρίς να εγχέονται τυχόν περίσσειες στο δίκτυο. Αντίθετα στην περίπτωση νοικοκυριών με αυξομειούμενη εποχικά κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, επιχείρησαν νοικοκυριά με μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του χειμώνα και μηδενική ή χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η περίοδος απόσβεσης αυξάνεται σημαντικά, καθώς κατά τον χρόνο όπου σημειώνονται μεγάλες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών είναι μειωμένη. Η δε μεγαλύτερη περίοδος απόσβεσης υπολογίζεται για νοικοκυριά με χαμηλή και σταθερή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς ενδέχεται στην περίπτωση αυτή η παραγόμενη ηλεκτρική από το φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών να μην αξιοποιείται στο σύνολό της και σημαντικό της μέρος να εγχέεται στο δίκτυο χωρίς ο καταναλωτής να απολαμβάνει κάποια αποζημίωση για αυτή.

Εστιάζοντας περαιτέρω την τεχνική αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, οι Seme et al. (2024) προτείνουν την ανάγκη χρησιμοποίησης καλής ποιότητας μικροαντιστροφέων για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Η επιλογή τέτοιων μικροαντιστροφέων μπορεί να φέρει οφέλη σε όρους ενεργειακής απόδοσης τόσο σε συνθήκες σκίασης, όπως προαναφέρεται, όσο και σε συνθήκες βλάβης σε ένα από τα φωτοβολταϊκά πάνελ του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών (Seme, et al., 2024).

Ειδικά σε ότι αφορά σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας ιδιαίτερο ενδιαφέρον κερδίζουν οι μικρής κλίμακας αντιστροφείς, όπως προαναφέρονται ως μικροαντιστροφείς, καθώς επιτρέπουν τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά πάνελ και πιο συγκεκριμένα επιτρέπουν τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από με ένα φωτοβολταϊκό σταθμό μικρής κλίμακας χάρη στο

γεγονός ότι σε κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ είναι τοποθετημένος ένας μικροαντιστροφέας. Μάλιστα, οι μικροαντιστροφείς MPPT, όπως και οι κλασσικοί φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς, ενώ κάποιοι διαθέτουν πάνω από ένα MPPT. Στην τελευταία περίπτωση, διαφορετικές δίοδοι παράκαμψης των φωτοβολταϊκών πάνελ μπορούν να τροφοδοτούν κάθε διαφορετικό MPPT του μικροαντιστροφέα. Σύμφωνα με τους Ritson και Elkhateb (2020), με τον τρόπο αυτό μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου κάθε φωτοβολταϊκού πάνελ και αντίστοιχα μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου της στοιχειοσειράς του φωτοβολταϊκού σταθμού μικρής κλίμακος, καθώς κάθε πάνελ λειτουργεί ανεξάρτητα από όλα τα υπόλοιπα πάνελ της στοιχειοσειράς και καθώς κάθε συστοιχία κυψελών η οποία είναι συνδεδεμένη σε μια δίοδο παράκαμψης λειτουργεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες συστοιχίες των κυψελών των φωτοβολταϊκών πάνελ. Επιπρόσθετα, σε συνθήκες μερικής σκίασης ενός πάνελ τα τμήματα τα οποία δεν σκιάζονται παράγουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ, όπως αντίστοιχα σε περίπτωση όπου κάποια κυψέλη του φωτοβολταϊκού πάνελ έχει βλάβη, π.χ. έχει σπάσει ή έχει θερμά σημεία (hot spots) ή εντοπίζεται το φαινόμενο PID, οι υπόλοιπες κυψέλες στο πάνελ οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε διαφορετικές δίοδους παράκαμψης εξακολουθούν να λειτουργούν στη μέγιστη δυνατή ισχύ. Τα πλεονεκτήματα αυτά τα οποία προσφέρουν οι μικροαντιστροφείς είναι καίρια για την αποτελεσματική λειτουργία των φωτοβολταϊκών σταθμών μικρής κλίμακας και δη των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών καθώς όπως προαναφέρεται και θα αναφερθεί και στην επόμενη παράγραφο οι σκιάσεις και η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά μειωμένες αποδόσεις, ενώ δεδομένου ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ τα συστήματα αυτά τοποθετούνται μέσα σε ένα πυκνά δομημένο περιβάλλον οι σκιάσεις αυτές μεταβάλλονται με την πάροδο της ώρας και μπορεί να επηρεάζουν διαφορετικά τμήματα των φωτοβολταϊκών πάνελ ή και του συνολικού φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών (Ritson & Elkhateb, 2020).

Η εργασία των Rodrigues et al. (2024) αποτελεί μια συστηματική ανασκόπηση της ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων στο δομημένο αστικό περιβάλλον, εστιάζοντας σε δύο διαστάσεις: αφενός στην ενεργειακή επίδοση και τη μοντελοποίηση

κατανάλωσης, και αφετέρου στις επιπτώσεις των ΦΒ συστημάτων στο μικροκλίμα και την άνεση εντός και εκτός των κτιρίων. Το άρθρο εντάσσεται στο πλαίσιο της αυξανόμενης διεθνούς ερευνητικής προσπάθειας για αποανθρακοποίηση των πόλεων και ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας, δεδομένου ότι οι πόλεις ευθύνονται για το 70% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ και πάνω από τα δύο τρίτα της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας.

Οι Rodrigues et al. (2024) πρότειναν ότι είναι σώμα της φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτιριακά κελύφη ειδικά στο αστικό μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών και των κτηρίων στις πόλεις λαμβάνοντας υπόψη την ανεπάρκεια χώρου για εγκατάσταση κλασσικών φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης. Ωστόσο το άρθρο αυτό γίνεται ένας σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία ενσωματώνονται αρχιτεκτονικά στο κέλυφος των κτηρίων, όπως για παράδειγμα σε προσόψεις στέγες ή ανοίγματα, συστήματα τα οποία αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως building-integrated photovoltaics ή BIPV, και στα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία προσαρμόζονται σε υπάρχουσες κατασκευές του κελύφους των κτηρίων όπως στα μπαλκόνια οι σε στέγες επί μεταλλικών βάσεων, συστήματα τα οποία αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως building-attached photovoltaics ή BAPV. Στη δεύτερη κατηγορία σαφώς εμπίπτουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών όπως και τα φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης (Rodrigues, et al., 2024).

Αν και τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκόνια έχουν σημαντικά μικρότερη απόδοση από ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα σε στέγες, εντούτοις μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην ενεργειακή αυτάρκεια των κτηρίων ειδικά όταν συνδυάζονται και με άλλος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπλέον ειδικά πρόκειται για φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών τα οποία τοποθετούνται σε υψηλούς ορόφους των κτηρίων, οι οποίοι έχουν μειωμένες σκιάσεις από παρακείμενες κατασκευές, η διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας είναι σημαντική για μεγάλα χρονικά διαστήματα της ημέρας. Μάλιστα αν υπάρχει δυνατότητα έστω και μικρής τροποποίησης της κλίσης τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ, έτσι ώστε να

μην είναι κάθετα στον ορίζοντα, ειδικά αν πρόκειται για τοποθεσίες εγκατάστασης με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος, και ειδικά αν τα μπαλκόνια οι προσόψεις των κτηρίων έχουν νότιο προσανατολισμό ή μικρή γωνία αζιμουθίου, τότε οι αποδόσεις που μπορούν να επιτυγχάνονται είναι σημαντικές. Σύμφωνα με τους Rodrigues et al. (2024), τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών είναι συνήθως μικρής ισχύος και δεν υπερβαίνουν τα 800W αν πρόκειται για συστήματα τα οποία τροφοδοτούν ένα διαμέρισμα, ενώ όπως προαναφέρεται και στην ανασκόπηση προηγούμενων άρθρων τονίζεται η ευκολία εγκατάστασης αλλά και η ευκολία μετακίνησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε περίπτωση όπου ένας ενοικιαστής μετακομίζει. Προκειμένου δε να μεγιστοποιούνται τα οφέλη από την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, στο άρθρο αυτό προτείνεται η χρήση έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου τόσο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα όσο και της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την κατοικία. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να τροποποιούνται οι καταναλώσεις ή και οι συνήθειες των χρηστών της κατοικίας έτσι ώστε οι μεγαλύτερες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας να λαμβάνουν χώρα κατά τις ώρες όπου υπάρχει επαρκής παραγωγή πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών. Επιπρόσθετα στο ίδιο άρθρο τονίζεται ότι προκειμένου να βελτιστοποιείται η οικονομική απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, τα ίδια έξυπνα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου της παραγωγής και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην ελαχιστοποίηση των ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες εγχέονται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και για τις οποίες οι χρήστες των κατοικιών δεν λαμβάνουν κάποια αποζημίωση από το διαχειριστή του δικτύου ή από κάποιον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας (Rodrigues, et al., 2024).

Η δε οικονομική απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών συνδέεται άρρηκτα με τον ταυτοχρονισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα και της οικιακής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με έρευνα, η ενσωμάτωση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση του ταυτοχρονισμού κατανάλωσης και παραγωγής κατά περίπου

50% οδηγώντας σε μείωση του κόστους προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας κατά έως και 64% (EUPD Research & Anker SOLIX, 2025). Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ιδιαίτερα υψηλές τα τελευταία χρόνια, και μετά το ξέσπασμα του πολέμου στην Ουκρανία, η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορεί να περιορίζεται και σε έως 4 έτη.

Εξελίξεις στο πεδίο των ρυθμιστικών πλαισίων καταγράφονται και στο Βέλγιο, όπου η εγκατάσταση ενός απλού φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση έως και 25% της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας ενός νοικοκυριού, καθώς υπολογίζεται ότι ένα μέσο φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών μπορεί να παράγει περί τις 250kWh έως 350kWh ετησίως.

4.3. Οφέλη και περιορισμοί

Σε πρόσφατο άρθρο, οι Gerber et al. (2025) εστίασαν στους περιοριστικούς παράγοντες και τις προκλήσεις σε ότι αφορά στην ευρεία ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών και άλλων σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι Gerber et al. (2025) εστίασαν στους περιορισμούς οι οποίοι εντοπίζονται στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Αρχικά σύμφωνα με τους Gerber et al. (2025) τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αποτελούν εύκολες στην εγκατάσταση και χρήση μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς ειδικά στις ΗΠΑ δεν απαιτείται η εγκατάσταση τους από αδειούχο εγκαταστάτη, ενώ ανεξαρτήτως χώρας είθισται να συνδέονται σε συμβατικούς ρευματοδότες, πράγμα το οποίο μπορεί να υλοποιηθεί ακόμη και από τους ιδιοκτήτες ή τους ενοικιαστές μιας κατοικίας. Μάλιστα πρότειναν ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αποτελούν ιδανική λύση για κατοικίες οι οποίες δεν έχουν πρόσβαση προκειμένου να υλοποιήσουν φωτοβολταϊκούς σταθμούς σε στέγες ή σε γήπεδα. Επιπλέον, οι Gerber et al. (2025) καταγράφουν ως σημαντικό όφελος των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών το γεγονός ότι δεν απαιτείται η διαστασιολόγηση του συστήματος, όπως απαιτείται σε φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης, καθώς λόγω των περιορισμών οι οποίοι εισάγονται από το διαθέσιμο

χώρο εγκατάστασης στα μπαλκόνια ίσες κάθετες προσόψεις των κτηρίων συνήθως η ισχύς των συστημάτων αυτών περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα επιφάνειας εγκατάστασης.

Στο άρθρο αυτό καταγράφεται ότι παρά τα σημαντικά οφέλη σε όρους κόστους κτήσης και εγκατάστασης καθώς και σε όρους υλοποίηση ηλεκτρολογικών εργασιών και μελέτης των ιδίων των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ή διείσδυσή τους ειδικά στις ΗΠΑ είναι περιορισμένη. Αντίθετα στο ίδιο άρθρο καταγράφεται ότι στην Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα στη Γερμανία καταγράφεται σημαντική διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών με περισσότερα από ένα εκατομμύριο συστήματα να έχουν εγκατασταθεί μέχρι και το τέλος του 2024 (Gerber, et al., 2025).

Οι Gerber et al. (2025) καταγράφουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες προκλήσεων και περιορισμούς για την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, οι οποίες περιλαμβάνουν τεχνικούς περιορισμούς, ρυθμιστικούς περιορισμούς, και περιορισμούς στη διασύνδεση των συστημάτων αυτών με τις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των κατοικιών.

Σε ό,τι αφορά στους τεχνικούς περιορισμούς, οι Gerber et al. (2025) εντοπίζουν τρεις κύριες προκλήσεις. Αρχικά, εξαιτίας της σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στους ρευματοδότες μιας κατοικίας ενδέχεται να παρατηρηθεί το φαινόμενο breaker masking, κατά το οποίο εξαιτίας της αμφίδρομης ροής ρεύματος στην ηλεκτρική γραμμή η οποία τροφοδοτεί το ρευματοδότη όπου έχει συνδεθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών, και εξαιτίας της αμφίδρομης ροής ρεύματος στην ηλεκτρική γραμμή τις παροχής της κατοικίας ενδέχεται τα μέσα προστασίας που ασφαλίζουν τις γραμμές αυτές να μην μπορούν να μετρήσουν το συνολικό ρεύμα το οποίο ρέει μέσα από τις γραμμές λόγω της ισορροπίας ζυγού. Πιο συγκεκριμένα, τα μέσα προστασίας των ηλεκτρικών γραμμών αντιλαμβάνονται τη διαφορά του ρεύματος το οποίο τώρα φανταστείτε από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με το ρεύμα το οποίο τροφοδοτείται από το φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών. Ως εκ τούτου ελλοχεύει ο κίνδυνος τα μέσα προστασίας να μην μπορούν να λειτουργήσουν σε περίπτωση

υπερφόρτισης των ηλεκτρικών γραμμών με αποτέλεσμα να κινδυνεύει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση από πυρκαγιά. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα, οι Gerber et al. (2025) προτείνουν ως βέλτιστη τακτική την υιοθέτηση κανονισμών οι οποίοι έχουν ήδη εφαρμοστεί σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπως στη Γερμανία, όπου έχει τεθεί ανώτατο όριο για την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών συστημάτων του μπαλκονιών. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ότι ένα όριο της τάξεως των 600Wr – 800Wr μπορεί να αποκλείσει το ενδεχόμενο σοβαρών υπερφορτίσεων των ηλεκτρικών γραμμών των κατοικιών. Ωστόσο σε ότι αφορά ειδικά στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, δεδομένου ότι η τάση δικτύου είναι μικρότερη από ότι στα δίκτυα στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 120V έναντι 230V, ενδέχεται να απαιτείται το όριο αυτό να είναι προσαρμοσμένο σε χαμηλότερα επίπεδα προκειμένου το ρεύμα το οποίο εγχέουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών στις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των κατοικιών να είναι αντίστοιχο με αυτό του ορίου εγκατεστημένης ισχύος στη Γερμανία.

Ακολούθως, οι Gerber et al. (2025) εντοπίζουν ότι δεδομένου ότι η σύνδεση και αποσύνδεση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών μπορεί να γίνεται και από τους ίδιους τους χρήστες, ιδιοκτήτες ή ακόμη και ενοίκους, ελλοχεύει ο κίνδυνος επαφής τους με την γραμμή της εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών. Δεδομένου ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα αυτά δεν διαθέτουν διακοπτικά μέσα στην έξοδό τους ή στην έξοδο των αντιστροφών, ηλεκτρική γραμμή η οποία προορίζεται να συνδεθεί σε κάποιο ρευματοδότη μιας κατοικίας βρίσκεται διαρκώς υπό τάση αν υπάρχει ηλιοφάνεια. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι μικροαντιστροφεείς οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών διαθέτουν ενσωματωμένες προστασίες αντινησιδοποίησης, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι τίθενται εκτός λειτουργίας όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών δεν είναι συνδεδεμένο σε κάποιον ρευματοδότη. Μολονότι οι μικροαντιστροφεείς διαθέτουν αυτή την προστασία, η διακοπή της τάσης στην έξοδο του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται εντός 2 ή 3 δευτερολέπτων, ειδικά αναφορά σε συστήματα προς εγκατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση όπου είναι σε ισχύ το πρότυπο αντινησιδοποίησης VDE 0126, χρόνος

ο οποίος είναι αρκετός ώστε όποιος επιχειρήσει να αποσυνδέσει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών από το ρευματοδότη να έρθει σε επαφή με τους πόλους του ρευματολήπτη του φωτοβολταϊκού συστήματος και να πάθει ηλεκτροπληξία. Εξετάζοντας τους ρευματοδότες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποίοι είναι τύπου Schuko, οι Gerber et al. (2025) προτείνουν ότι λόγω των μακρύτερων επαφών των ρευματοληπτών μειώνεται ο κίνδυνος επαφής του χρήστη με τους ακροδέκτες του ρευματολήπτη αλλά δεν εξαλείφεται. Προκειμένου να εξαλειφθεί ο κίνδυνος της ηλεκτροπληξίας κατά τη σύνδεση ή αποσύνδεση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών, προτείνεται η ενσωμάτωση περαιτέρω προστασιών και διακοπών φορτίου στην έξοδο των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών.

Τέλος, οι Gerber et al. (2025) εντοπίζουν ακόμη έναν εξίσου σημαντικό περιορισμό για την ασφαλή λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών ο οποίος σχετίζεται με τη διαφορική προστασία των εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Η διαφορική προστασία των εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων είναι αυτή η οποία προστατεύει τις εγκαταστάσεις από τον κίνδυνο της πυρκαγιάς, όταν ρυθμίζεται σε ρεύματα διαρροής 300mA και αυτή η οποία προστατεύει τους χρήστες των εγκαταστάσεων από τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας όταν αυτή ρυθμίζεται σε ρεύματα διαρροής 30mA. Δεδομένου ότι η διαφορική προστασία και τα μέσα διαφορικής προστασίας λειτουργούν με τρόπο τέτοιο ώστε να μετρούν το άθροισμα του ρεύματος το οποίο ρέει στις φάσεις και στον ουδέτερο στην έξοδο μιας ηλεκτρικής γραμμής είναι σαφές ότι η λειτουργία των μέσων προστασίας αυτών δεν είναι αμφίδρομη. Με άλλα λόγια, δεν προστατεύεται διαφορικά η ηλεκτρική γραμμή η οποία τροφοδοτεί το ρευματοδότη όπου έχει συνδεθεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών καθώς το ρεύμα ρέει αντίστροφα προς την ηλεκτρική εγκατάσταση από το ρευματοδότη και όχι από την ηλεκτρική εγκατάσταση προς το ρευματοδότη.

Πέρα από τεχνικές προκλήσεις και περιορισμούς, οι Gerber et al. (2025) εξέτασαν περιορισμός η οποία αφορούν στη διασύνδεση Των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών με τις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και κατ' επέκταση με τα δίκτυα

ηλεκτρικής ενέργειας. Τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής όσο και στην Ευρώπη, όπως και στην Ελλάδα, οι καταναλωτές οι οποίοι τροφοδοτούνται με ηλεκτρική από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι υποχρεωμένοι να συνάπτουν συμβάσεις με το διαχειριστή του δικτύου και με κάποιον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να μπορούν να εγχέουν ηλεκτρική ενέργεια, παραγόμενη από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα δεδομένου ότι καθόσον υπάρχει ηλιοφάνεια ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών παράγει ηλεκτρική ενέργεια, ελλοχεύει ο κίνδυνος το φωτοβολταϊκό αυτό σύστημα να εγχέει μέρος ή και το σύνολο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο αν τη χρονική στιγμή εκείνη δεν υπάρχει καμία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ή αν η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερη από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση. Μάλιστα προκειμένου να συναφθούν οι παραπάνω αναφερόμενες συμβάσεις απαιτούνται πολύπλοκες διαδικασίες στις οποίες εμπλέκονται μηχανικοί, ηλεκτρολόγοι και οι διαχειριστές των δικτύων και πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν πρόκειται να εμπίπτουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών σε τέτοιες διατάξεις, τότε ένα μεγάλο μέρος των παραπάνω αναφερόμενων πλεονεκτημάτων των συστημάτων αυτών χάνεται καθώς και πολυπλοκότητα εγκατάστασης και σύνδεσης τους φτάνει να είναι η ίδια με τα φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης. Μάλιστα εάν πρόκειται για ενοικιαστές οι οποίοι θέλουν να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών στις κατοικίες που εκμισθώνουν τότε στην περίπτωση αυτή απαιτείται όχι μόνο η γνωστοποίηση αλλά και η σύμφωνη γνώμη του ιδιοκτήτη της κατοικίας. Οι Gerber et al. (2025) προτείνουν ότι ο περιορισμός αυτός μπορεί να καμφθεί εάν εφαρμοστούν μεθοδολογίες μηδενικής έγχυσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την εγκατάσταση ενός μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας στην έξοδο του φωτοβολταϊκού συστήματος ο οποίος θα πρέπει να επικοινωνεί με τον μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας του διαχειριστή του δικτύου έτσι ώστε να αποκόπτεται η παραγόμενη ηλεκτρική από το φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών αν αυτή υπερβαίνει την καταναλισκόμενη ηλεκτρική από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, η μηδενική έγχυση

ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί και με άλλα έξυπνα συστήματα, όπως έξυπνους μετρητές κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι μπορούν να ενσωματώνονται στον μικροαντιστροφέα προκειμένου να μην αυξάνεται η πολυπλοκότητα εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών (Gerber, et al., 2025).

Τέλος, οι Gerber et al. (2025) εντοπίζουν και ρυθμιστικούς περιορισμούς και προκλήσεις στη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Για παράδειγμα, στη Γερμανία οι χρήστες οικιακών φωτοβολταϊκών, είτε πρόκειται για συστήματα στέγης είτε πρόκειται για συστήματα μπαλκονιών, είναι υποχρεωμένοι να δηλώνουν τα φωτοβολταϊκά τους συστήματα σε μια εθνική βάση δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό όχι μόνον ενισχύεται η διαφάνεια και η δυνατότητα ελέγχου από τους διαχειριστές των δικτύων, αλλά καθίσταται εφικτή και η τεχνική αξιολόγηση της επίδρασης διεσπαρμένων μικρών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι διασυνδέονται στο σύστημα διανομής. Σε περίπτωση όπου εγκαθίστανται φωτοβολταϊκά σε θέματα μπαλκονιών αλόγιστα και χωρίς να δηλώνονται σε κάποια βάση δεδομένων, ελλοχεύει ο κίνδυνος το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να κορεστεί καθώς δεν θα είναι εφικτός ο σχεδιασμός των υποδομών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να μπορεί να καλύψει το σύνολο των φορτίων, καταναλωτών και παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας.

Εξετάζοντας τους παραπάνω περιορισμούς και τις παραπάνω προκλήσεις, οι Gerber et al. (2025) προτάσσουν ως παράδειγμα τη νομοθεσία η οποία έχει εισαχθεί στην πολιτεία της Γιούτα, όπου έχει τεθεί ανώτατο όριο εγκατεστημένης ισχύος, για φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών και γενικά για διεσπαρμένες μικρές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το οποίο φτάνει στα 1.200W, με απαραίτητη προϋπόθεση τα συστήματα τα οποία εγκαθίστανται να φέρουν πιστοποίηση από ανεξάρτητους φορείς. Ένα ακόμη σενάριο το οποίο εξετάζεται στο άρθρο αυτό, είναι η δυνατότητα πολλών αυτοπαραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας από μικρές διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να συνεταιρίζονται και να σχηματίζουν ενεργειακές κοινότητες οι οποίες θα

μπορούν να συμμετέχουν στην αγορά χονδρικής προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τέτοια μέριμνα στη νομοθεσία θα μπορούσε να καταστήσει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών ακόμη πιο ελκυστική καθώς η αυτοπαραγωγή θα μπορούσαν όχι μόνο να καταναλώνουν την παραγόμενη αλλά και να την πωλούν στην αγορά όταν δεν τη χρειάζονται.

Σε ότι αφορά στα ισχύοντα νομικά πλαίσια και πρότυπα όχι μόνο στις ΗΠΑ αλλά και στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι Gerber et al. (2025) δεν εντοπίζουν κάποια ευθεία αναφορά στη δυνατότητα σύνδεσης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε ρευματοδότες, όπως δεν εντοπίζουν και ευθείες αναφορές σε ότι αφορά στη θερμική, μαγνητική και διαφορική προστασία τέτοιων γραμμών οι οποίες τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών και μικρές μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μια ερμηνεία η οποία είναι τεχνικά ορθότερη μπορεί να είναι ότι η απουσία ευθείας αναφοράς σημαίνει ότι τα συστήματα αυτά δεν προβλέπεται να εγκαθίστανται και να συνδέονται σε ρευματοδότες ενώ μια άλλη ερμηνεία είναι ότι τα συστήματα αυτά δεν απαγορεύεται να εγκαθίστανται και να συνδέονται σε ρευματοδότες κατοικιών. Σε ό,τι αφορά στις ΗΠΑ όλα τα κιτ φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών θα πρέπει να φέρουν πιστοποίηση από τον οργανισμό UL ενώ σε ότι αφορά στην Ευρωπαϊκή Ένωση τα αντίστοιχα κιτ φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών θα πρέπει να φέρουν πιστοποίηση CE έτσι ώστε να είναι νόμιμη η διάθεση τους αλλά και η εγκατάστασή τους και θέση σε λειτουργία. Μάλιστα εάν εξετάζονται φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών τα οποία διαθέτουν και διάταξη αποθήκευσης ενέργειας, τότε τα συστήματα αυτά μπορεί να εμπίπτουν σε ακόμη αυστηρότερες διατάξεις καθιστώντας την ευρεία διείσδυση τους ακόμη πιο δύσκολη αν δεν ληφθεί κατάλληλη μέριμνα για την αναθεώρηση των νομικών πλαισίων και προτύπων για τις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις (Gerber, et al., 2025).

Σύμφωνα με τους Rodrigues et al. (2024), τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να λειτουργήσουν καταλυτικά για την ενίσχυση της ενεργειακής δημοκρατίας καθώς μπορούν να συνεισφέρουν τόσο στη στροφή προς την αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με έμφαση σε νοικοκυριά χαμηλού και μεσαίου

εισοδήματος τα οποία μέχρι πρότινος δεν είχαν πρόσβαση σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λόγω του μεγάλου κόστους κτήσης και εγκατάστασης αντίστοιχων σταθμών, όπως είναι οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί στέγης (Rodrigues, et al., 2024). Στο ίδιο άρθρο προτείνεται ότι άλλο σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο προκύπτει από την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών αφορά στο μικροκλίμα στο εσωτερικό των κτηρίων. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στα κιγκλιδώματα των μπαλκονιών ή στις προσόψεις πέρα από τη συνεισφορά μέσω της παραγωγής πράσινης και δωρεάν ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρει ένα μέσο ηλιακής σκίασης. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ απορροφούν μέρος της ηλιακής ενέργειας η οποία θα έφτανε στο εσωτερικό των κατοικιών μέσα από τα ανοίγματα αυξάνοντας τη θερμοκρασία στο εσωτερικό των κτηρίων αλλά και απορροφούν μέρος της ηλιακής ενέργειας η οποία θα απορροφούνταν από τα ίδια τα ανοίγματα, π.χ. από τα παράθυρα ή τις πόρτες των κατοικιών, με αποτέλεσμα να μειώνεται η υπερθέρμανση των εσωτερικών χώρων ειδικά κατά τους θερινούς μήνες. Επαγόμενα, μειώνονται οι ανάγκες ψύξης κατά τους θερινούς μήνες με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ίδιες οι ενεργειακές ανάγκες των κατοικιών (Rodrigues, et al., 2024). Όπως εντοπίζεται και από άλλα άρθρα τα οποία αναλύονται στην παρούσα παράγραφο, ενδέχεται να προκύπτουν περιορισμοί για την ευρεία διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών εξαιτίας της τροποποίησης της αισθητικής των εξωτερικών όψεων των κτηρίων. Η αισθητική αυτή τροποποίηση μπορεί να μην είναι αποδεκτή από τις τοπικές κοινωνίες, από τους συνιδιοκτήτες σε πολυκατοικίες αλλά και πιο σπάνια από δανεικούς ή άλλους περιορισμούς. Επιπρόσθετα από την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών τα οποία μπορεί να μη φέρνει τις απαραίτητες πιστοποιήσεις ελλοχεύουν σημαντικοί κίνδυνοι ασφάλειας για τους χρήστες στις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Στο πλαίσιο αυτών των περιορισμών τυχόν αναθεωρήσεις των κανονιστικών πλαισίων από τα επίπεδα των πολεοδομικών διατάξεων μέχρι το επίπεδο της ασφάλειας ηλεκτρικών εγκαταστάσεων οι οποίες τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας μπορούν να δράσουν θετικά και να επιταχύνουν τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Επιπλέον, οι

Rodrigues et al. (2024) εντοπίζουν ότι τα υφιστάμενα λογισμικά προσομοίωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς σε ότι αφορά στον ακριβή υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας και δη από φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών, ειδικά όταν πρόκειται για συστήματα τα οποία ενσωματώνουν και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να σχετίζονται στα εφαρμοζόμενα μοντέλα των λογισμικών τα οποία είναι προσαρμοσμένα για εγκαταστάσεις επί εδάφους ή στεγών αλλά μπορεί και να σχετίζονται από την μη διαθεσιμότητα τεχνικών στοιχείων για φωτοβολταϊκά πάνελ και μικροαντιστροφείς οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών. Παράλληλα, δεδομένου του σημαντικού ρόλου που παίζουν οι ανακλάσεις τόσο από το ίδιο το κτίριο όσο και από παρακείμενα κτίρια και κατασκευές, ειδικά αν πρόκειται για φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών τα οποία κατασκευάζονται με φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψευς, τα υφιστάμενα λογισμικά προσομοίωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων αδυνατούν να λάβουν υπόψη την επίδραση αυτών των ανακλάσεων (Rodrigues, et al., 2024).

Αντίστοιχα, οι Xiang και Matusiak (2022) αναγνώρισαν τόσο σημαντικά οφέλη όσο και σημαντικούς περιορισμούς και προκλήσεις από την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων στις προσόψεις και στα μπαλκόνια πολυώροφων κτηρίων (Xiang & Matusiak, 2022). Ειδικότερα, τα οφέλη που προτείνονται από τους Xiang και Matusiak (2022), καθώς αναλύθηκαν σε επίπεδο ενεργειακής αυτονομίας, μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος και βελτίωσης της κλασικού φωτισμού στο εσωτερικό των κατοικιών, έχουν συζητηθεί εκτενώς στην παράγραφο 4.2. Ειδικότερα σε ότι αφορά σε προκλήσεις και εμπόδια, οι Xiang και Matusiak (2022) αναγνωρίζουν ως σημαντικότερο εμπόδιο τη σκίαση ανάμεσα σε διαδοχικούς ορόφους των πολυώροφων κτηρίων, η οποία μπορεί να περιορίσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσόψεων και μπαλκονιών, ειδικά όταν τα μπαλκόνια είναι ευθυγραμμισμένα και τοποθετημένα κατακόρυφα το ένα πάνω από το άλλο. Σε περίπτωση όπου οι σκίαση των μπαλκονιών ενός ορόφου στα μπαλκόνια ενός άλλου ορόφου δεν ληφθεί υπόψη κατά τη μελέτη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

μπαλκονιών προσόψεως, ενδέχεται τα αποτελέσματα της μελέτης να καταλήγω σε αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως και 20%. Ειδικά αν πρόκειται για φωτοβολταϊκά συστήματα σε προσόψεις και μπαλκόνια των χαμηλότερων ορόφων πολυώροφων κτηρίων, τότε το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξάνεται σημαντικά.

Επιπρόσθετα οι ίδιοι ερευνητές προτείνουν ότι η θέση των κιγκλιδωμάτων των μπαλκονιών και των παραθύρων και πορτών των κατοικιών εισάγει περιορισμούς στη δυνατότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ, καθώς όχι μόνον μειώνεται η διαθέσιμη επιφάνεια προς εγκατάσταση των ίδιων των φωτοβολταϊκών πάνελ, αλλά επιπρόσθετα μπορεί να υποβαθμίζεται η ποιότητα του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των διαμερισμάτων.

Επιπρόσθετα, σε περίπτωση χρησιμοποίησης φωτοβολταϊκών πάνελ με ανοιχτόχρωμες αποχρώσεις, οι Xiang και Matusiak (2022) και υπολόγισαν κατόπιν προσομοιώσεων ότι ενδέχεται να αυξάνεται το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς μειώνεται η ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ όπως συζητήθηκε εκτενώς στην παράγραφο 4.2. Επιπλέον σημαντικός περιορισμός ο οποίος πιθανώς δεν εξετάζεται επαρκώς στη βιβλιογραφία εισάγεται από την στατική αντοχή των προσόψεων και των μπαλκονιών και ιδιαίτερα των κιγκλιδωμάτων των μπαλκονιών, καθώς απαιτείται η επιλογή ειδικών συστημάτων στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα παραμένουν στη θέση τους παρά τις αντίξοες συνθήκες στις οποίες μπορεί να εκτίθενται. Άλλωστε τυχόν φωτοβολταϊκά πάνελ εγκατεστημένα στους τελευταίους ορόφους ενός πολυώροφου κτιρίου εκτίθενται σε σημαντικά υψηλότερες ανεμοπιέσεις σε σχέση με φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία είναι εγκατεστημένα σε γήπεδα ή σε στέγες κτηρίων όπου μπορεί να χρησιμοποιούνται ανεμοθραύστες. Σε κάθε περίπτωση, οι Xiang και Matusiak (2022) προτείνουν ότι θα πρέπει να εξασφαλίζεται η κανονιστική συμμόρφωση με τους πολεοδομικούς κανονισμούς, αν και όπως εντοπίζουν στο άρθρο τους δεν υπάρχει ειδική μέριμνα τουλάχιστον στους πολεοδομικούς κανονισμούς της Νορβηγίας σε ό,τι αφορά στην ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ στα μπαλκόνια και στις προσόψεις πολυώροφων κτηρίων σε αστικά κέντρα.

Ένα ακόμη σημαντικό σημείο τριβής σύμφωνα με τους Xiang και Matusiak (2022) είναι η διαχείριση και συντήρηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσόψεων και μπαλκονιών, ζητήματα τα οποία είναι κρίσιμα για την εξασφάλιση της διαρκούς λειτουργίας τους κατά την πάροδο των χρόνων. Η συντήρηση τέτοιων φωτοβολταϊκών πάνελ απαιτεί την εργασία σε ύψος η οποία ελλοχεύει κινδύνους ατυχημάτων από πτώσεις, θερινό σε περίπτωση όπου εγκαθίστανται κοινόχρηστα φωτοβολταϊκά συστήματα προσόψεων και μπαλκονιών θα πρέπει να υπάρξει μια φόρμουλα για την από κοινού διαχείριση και συντήρησή τους από όλους τους συνιδιοκτήτες οι οποίοι απολαμβάνουν την παραγόμενη πράσινη από τα φωτοβολταϊκά συστήματα προσόψεων και μπαλκονιών. Μάλιστα στην περίπτωση κοινόχρηστων φωτοβολταϊκών συστημάτων προσόψεων και μπαλκονιών, εντοπίζεται ακόμη ένας σημαντικός περιορισμός ο οποίος αφορά στο μηχανισμό με τον οποίο θα μπορεί να κατανέμεται η παραγόμενη πράσινη στο σύνολο των συνιδιοκτητών των φωτοβολταϊκών συστημάτων (Xiang & Matusiak, 2022).

Επιπλέον, μια σημαντική πρόκληση αφορά στην κοινωνική αποδοχή των φωτοβολταϊκών σε ρυθμό όταν μπαλκονιών ή προσόψεων. Παρά τα σημαντικά οφέλη σε όρους ενεργειακής απόδοσης και μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος στο αστικό πεδίο, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στις προσόψεις και στα μπαλκόνια πολυώροφων κτηρίων οδηγεί σε σημαντική αλλαγή της όψης των κτηρίων η οποία μπορεί να μην είναι αποδεκτή από τις τοπικές κοινωνίες. Στο πλαίσιο αυτό, οι Xiang και Matusiak (2022) διεξήγαγαν έρευνα με τη συμμετοχή κατοίκων του Τροντχάιμ, προκειμένου να διαπιστωθεί η αντίληψή τους σε ότι αφορά την αισθητική των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών και προσόψεων. Μολονότι τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής ήταν ενθαρρυντικά, είναι σαφές ότι η αισθητική αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσόψεων και μπαλκονιών είναι καθαρά υποκειμενική και μπορεί να είναι διαφορετικοί σε διαφορετικές πόλεις με διαφορετική κουλτούρα. Μάλιστα αν πρόκειται για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε προσόψεις και μπαλκόνια σε πόλεις με ιδιαίτερες αρχιτεκτονικές τάσεις, π.χ. σε πόλεις με παραδοσιακά και διατηρητέα κτίρια ενδέχεται τα συστήματα αυτά να μην είναι

αποδεκτά καθώς μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά την αισθητική του αστικού τοπίου. Στην κατεύθυνση διαχείρισης αυτής της σημαντικής πρόκλησης, οι Xiang και Matusiak (2022) προτείνουν οποίοι τα οποία φωτοβολταϊκά συστήματα θα πρέπει να ενσωματώνονται με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο στα κτίρια έτσι ώστε να γίνονται κατά το λιγότερο δυνατόν αντιληπτά και να μεταβάλλουν κατά το λιγότερο δυνατόν την αισθητική της εξωτερικής όψης των κτηρίων, για παράδειγμα μέσα από την επιλογή χρωματιστών φωτοβολταϊκών πάνελ και μέσα από τη διαβάθμιση τις αποχρώσεις τους από τους χαμηλότερους προς τους υψηλότερους ορόφους των κτηρίων. Σε κάθε περίπτωση, σε οικισμούς με ιδιαίτερα θετικά χαρακτηριστικά ενδέχεται να ισχύουν περιορισμοί οι οποίοι να μην επιτρέπουν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε προσόψεις και μπαλκόνια ακόμα και σε νεότερα παρακείμενα κτίρια.

Οι Freitas και Brito (2016) πρότειναν ότι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών δεν αποτελεί πανάκεια, καθώς μολονότι μπορεί να μειώνεται το ανθρακικό αποτύπωμα των κατοικιών στο αστικό πεδίο, εντούτοις μπορεί να υποβαθμίζεται ο φυσικός φωτισμός στο εσωτερικό των κατοικιών και να υποβαθμίζεται αισθητικά η εξωτερική όψη των κτηρίων. Στο πλαίσιο αυτό πρότειναν την ανάγκη για έναν ολιστικό σχεδιασμό για την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε πολυώροφα κτίρια ειδικά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές με πολλά πολυώροφα κτίρια.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που καταδεικνύεται από το άρθρο των Seme et al. (2024) είναι ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών plug and play μπορούν να εγκαθίστανται εύκολα σε πολυκατοικίες δεδομένου ότι αυτό προβλέπεται από τους ισχύοντες κανονισμούς των πολυκατοικιών, δεδομένου ότι υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος στα μπαλκόνια των πολυκατοικιών και ότι τηρούνται σχετικές τεχνικές προδιαγραφές. Το γεγονός ότι δεν απαιτούνται εκτενείς παρεμβάσεις στην εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση και στον πίνακα των κατοικιών, το γεγονός ότι δεν απαιτείται διασύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών με το μετρητικό σύστημα του διαχειριστή του δικτύου και το γεγονός ότι αυτά τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών είναι plug and play, καθιστά τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών ελκυστικά, ειδικά σε κατοίκους πολυώροφων κτηρίων όπου οι διαθέσιμοι κοινόχρηστοι

χώροι στο δώμα ή τη στέγη του κτιρίου δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης για όλους τους συνιδιοκτήτες.

Επιπρόσθετα στο ίδιο άρθρο προτείνεται ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορεί να συνεισφέρουν σημαντικά στην αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμμετέχοντας σε μοντέλα διεσπαρμένες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ταυτόχρονα να δίνεται στους καταναλωτές την δυνατότητα συμμετοχής στην ενεργειακή πράσινη μετάβαση με ένα σημαντικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης, απουσία χρονοβόρων και πολύπλοκων διαδικασιών αδειοδότησης και εγκατάστασης. Οι Seme et al. (2024) προτείνουν ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορεί να λειτουργήσουν ως εργαλείο εκδημοκρατισμού της πρόσβασης στην ηλεκτρική, καταπολέμησης της ενεργειακής φτώχειας, και άμεσες και ουσιαστικής μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών στα αστικά κέντρα, χωρίς να αλλάζει σημαντικά η δομή και η όψη των κτηρίων και χωρίς να απαιτούνται μεγάλες επενδύσεις.

Επιπρόσθετα, οι Seme et al. (2024) προτείνουν ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να λειτουργήσουν ως ενδιάμεσο βήμα για την καλλιέργεια περιβαλλοντικά υπεύθυνων πολιτών στα ευρύτερα πλαίσια της πράσινης ενεργειακής μετάβασης. Από μόνο του, το γεγονός ότι οι ίδιοι οι καταναλωτές μπορούν να εγκαταστήσουν από μόνο του στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών, μπορούν να παρακολουθούν ζωντανά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και να παρακολουθούν ζωντανά την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας και την μείωση του κόστους προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από τη μείωση του ύψους των λογαριασμών ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να οδηγήσει την άμεση συνειδητοποίηση της αξίας της στροφής στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνεισφέροντας συνολικά στις προσπάθειες για την πράσινη ενεργειακή μετάβαση. Στο πλαίσιο αυτό τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορεί να ενισχύσουν την αποδοχή των τοπικών κοινωνιών για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ειδικά σε περιοχές όπου οι κοινωνίες είναι αρνητικά προσκείμενες στους σταθμούς ανανεώσιμων

πηγών ενέργειας, ειδικά έλλειψη γνώσης για τα οφέλη από την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Seme, et al., 2024).

Το ίδιο το κόστος κτήσης του εξοπλισμού για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορεί να έχει άμεση επίδραση στην ταχύτητα διείσδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, ειδικά σε περιοχές με νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος. Ακόμη και το αναφερόμενο στην παράγραφο 4.2 κόστος ενός τυπικού φωτοβολταϊκού σύστημα του μπαλκονιών στη Σλοβενία το οποίο κυμαίνεται από 600€ έως 1.000€ είναι ένα ποσό το οποίο μπορεί να είναι υψηλό για ένα νοικοκυριό χαμηλού εισοδήματος. Ως εκ τούτου και προκειμένου να επιταχυνθεί η διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, ιδιαίτερα στα ευρύτερα πλαίσια της πράσινης ενεργειακής μετάβασης προτείνεται ότι ο περιορισμός του κόστους κτήσης του απαραίτητου εξοπλισμού μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσα από την ενίσχυση της εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων μέσα από προγράμματα κρατικών επιδοτήσεων, φορολογικών ελαφρύνσεων, οι γενικότερες επιδοτήσεις της ενεργειακής αναβάθμισης των κατοικιών σε πολυκατοικίες σε αστικά κέντρα, όπως γίνεται στην Ελλάδα με τα προγράμματα εξοικονομώ ανακαινίζω και εξοικονομώ κατ' οίκον, στα οποία ωστόσο δεν εμπίπτουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών επί τις παρούσης. Τυχόν υιοθέτηση τέτοιων μέτρων ενίσχυσης των νοικοκυριών θα μπορούσε όχι μόνον να επιταχύνει τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών αλλά και να οδηγήσει σε ταχύτερη βελτίωση της κοινωνικής αποδοχής των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών.

Από τεχνικής σκοπιάς, οι Seme et al. (2024) προτείνουν ότι η τυποποιημένη φύση του εξοπλισμού των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών και η χρήση και διαθεσιμότητα ενσωματωμένων λύσεων με τη δυνατότητα παρακολούθησης της παραγωγής και της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος σε πραγματικό χρόνο καθιστά τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών ιδανικά για εγκατάσταση και χρήση σε αστικά περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχει διαθέσιμος πολύς χώρος για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης και όπου η συντήρηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών μπορεί να γίνεται από τους ίδιους τους ιδιοκτήτες.

Επιπρόσθετα, οι Seme et al. (2024) εντοπίζουν και σημαντικούς περιορισμούς στην ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Όπως αναφέρεται παραπάνω στα ευρήματα των Gerber et al. (2025), οι Seme et al. (2024) προτείνουν ότι εξαιτίας της σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε ρευματοδότες στα μπαλκόνια των κατοικιών ενδέχεται να μην λειτουργούν οι διακόπτες διαφορικής προστασίας λόγω της εγχεόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην ηλεκτρική γραμμή των ρευματοδοτών μπορεί οι διακόπτες διαφορικής προστασίας να ενεργοποιούνται χωρίς λόγο εξαιτίας αυτής της συνδεσμολογίας (Seme, et al., 2024; Gerber, et al., 2025).

Επιπλέον, οι Seme et al. (2024) καταγράφουν την ανάγκη για ρύθμιση των κανονιστικών και θεσμικών πλαισίων προκειμένου να επιταχυνθεί η διείσδυση τέτοιων φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών ειδικά για πολυώροφα κτίρια. Πέραν των ρυθμιστικών πλαισίων, τα οποία στη Σλοβενία όπου διεξήχθη η έρευνα των Seme et al. (2024), καταγράφεται ότι ενδέχεται να υπάρχουν φυσικοί περιορισμοί όπως σκιάσεις από τα μπαλκόνια των επάνω ορόφων ή από παρακείμενα κτίρια, δέντρα, κολώνες και άλλες κατασκευές οι οποίες μπορεί να υποβαθμίζουν την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε βαθμό τέτοιο ώστε να μην είναι οικονομικά βιώσιμη η εγκατάστασή τους. Μολονότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών όταν διατίθενται ως πακέτο εξοπλισμό διαθέτουν τυποποιημένες βάσεις στήριξης για την τοποθέτησή τους στα κιγκλιδώματα των μπαλκονιών ή στην κάθετη πρόσοψη των πολυκατοικιών, εντούτοις η δυνατότητα ρύθμισης του προσανατολισμού και της κλίσης τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ μπορεί να επιδράσει σημαντικά στην ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών.

Επιπρόσθετα ένας σημαντικός περιορισμός ο οποίος προτείνεται από τους Seme et al. (2024), είναι ότι στο κανονιστικό πλαίσιο της Σλοβενίας δεν προβλέπεται χρηματική αποζημίωση για τυχόν περίσσειες παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών οι οποίες μπορεί να εγχέονται στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός αυτό περιορίζει την ελκυστικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών ειδικά για νοικοκυριά με σημαντικές διακυμάνσεις στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για νοικοκυριά με

σημαντικά χαμηλές καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής της ηλιακής ακτινοβολίας δηλαδή από τις πρωινές μέχρι και τις τελευταίες μεσημεριανές ώρες. Ως εκ τούτου, οι Seme et al. (2024), προτείνονται η ανάγκη για αναθεώρηση του κανονιστικού πλαισίου της Σλοβενίας, το οποίο μπορεί να αποτελέσει οδηγό για το κανονιστικό πλαίσιο και σε άλλες χώρες όπως η Ελλάδα, προκειμένου τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών να μπορούν να εντάσσονται σε καθεστώς ενεργειακός ευσεβισμού οι πωλήσεις των εγχεόμενων περισειών ηλεκτρικής ενέργειας (Seme, et al., 2024).

Οι Demirel et al. (2024) εξέτασαν διεξοδικά για λοιπές προκλήσεις οι οποίες εγείρονται από τη διαρκώς αυξανόμενη διείσδυση των φωτοβολταϊκών μπαλκονιών (Demirel, et al., 2024). Ενδεικτικά εντοπίζουν τεχνικές κυρίως προκλήσεις για τα συστήματα διανομής οι οποίες μεγεθύνονται όταν σε ένα αστικό κέντρο εγκαθίσταται μεγάλος αριθμός φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Η υπερσυγκέντρωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των επιπέδων της τάσης στο δίκτυο διανομής, μπορεί να διαταράξει την εξισορρόπηση του φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της ποιότητας της ισχύος. Ωστόσο η αξιοποίηση έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης τέτοιου τύπου φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να επιλύσει τις περισσότερες από αυτές τις προκλήσεις (Demirel, et al., 2024). Όπως συμβαίνει με όλους τους τύπους φωτοβολταϊκών συστημάτων, έτσι και με τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αποκεντρώνεται και διασπείρεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα δίκτυα στα αστικά κέντρα, τα οποία πριν την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων διένειμαν μόνον ενέργεια στους καταναλωτές πλέον λειτουργούν ως αποδέκτες της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να εγχέουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα, ειδικά κατά τις μεσημεριανές ώρες, όποτε και μεγιστοποιείται η παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η διπλή αυτή ροή ενέργειας αυξάνει τις απαιτήσεις των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τόσο σε ό,τι αφορά στη θερμική χωρητικότητά τους όσο και σε ό,τι αφορά στη διαθέσιμη ισχύ βραχυκύκλωσης. Ως εκ τούτου, αν μάλιστα εγκαθίστανται φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας χωρίς να υπάρχει διαδικασία αδειοδότησης

ή έστω χωρίς να υπάρχει διαδικασία γνωστοποίησης των εγκαταστάσεων στο διαχειριστή του δικτύου, τότε ενδέχεται ο σχεδιασμός των δικτύων να είναι ανεπαρκής, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος για διακοπές της ηλεκτροδότησης και να μειώνεται η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Ωστόσο, στον αντίποδα, σύμφωνα με το άρθρο αυτό, εκτιμάται ότι στο τέλος του 2024 θα λειτουργούσαν στη Γερμανία μόνον περί τα 250.000 φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, με την πλειονότητα αυτών να είναι φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών, οδηγώντας σε μία δυνητική εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως των 100MWh ετησίως (Demirel, et al., 2024).

Στο ίδιο άρθρο υπολογίστηκε μέσω προσομοίωσης ότι αν σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, το 30% των καταναλωτών λειτουργεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μικρής κλίμακας αναμένεται υπέρταση της τάξεως του 10% κατά τις μεσημεριανές ώρες (Demirel, et al., 2024).

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτήρια οδηγεί τη βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης, καθώς μέρος της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία προέρχεται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να υποκατασταθεί από την πράσινη ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτήρια, συμπεριλαμβανομένης και της ενσωμάτωσής τους στα μπαλκόνια των κτηρίων, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου από την οικιακή κατανάλωση και εν γένει να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των κτηρίων, καθώς μειώνεται η ηλεκτρική ενέργεια που απορροφάται από το δίκτυο, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων.

Επιπρόσθετα, εντοπίζονται σωρευτικά οφέλη από την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία ενσωματώνονται στους υαλοπίνακες των κτηρίων ή σε συστήματα σκίασης, όπως σκέπαστρα και τέντες, καθώς όχι μόνον μπορεί να παράγεται πράσινη ενέργεια, αλλά επιπρόσθετα μπορεί να επιτευχθεί παθητική ηλιακή σκίαση με

αποτέλεσμα τη μείωση των ενεργειακών αναγκών για το δροσισμό του εσωτερικού των κτηρίων, ειδικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Mavromatakis, et al., 2018).

4.4. Στατιστικά στοιχεία

Η υιοθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών γνωρίζει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια ειδικά στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, απόρροια της ανάγκης για αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της ενεργειακής κρίσης αλλά και της συντεταγμένης στροφής προς την πράσινη ενεργειακή μετάβαση.

Ιστορικά τα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών καταγράφονται κυρίως στη Γερμανία, όπου υπάρχει μέριμνα για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στο θεσμικό πλαίσιο της χώρας ήδη από το 2015. Μάλιστα το θεσμικό πλαίσιο στη Γερμανία δεν προβλέπει καμία αδειοδοτική διαδικασία αλλά μόνο τη γνωστοποίηση της εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιών στο διαχειριστή του δικτύου.

Μέχρι το τέλος του 2024 στη Γερμανία είχαν γνωστοποιηθεί επίσημα περισσότερα από 780.000 εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών, με εκτιμήσεις να αναφέρουν ότι ο πραγματικός αριθμός τώρα εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών να υπερβαίνει ακόμη και τα 4 εκατομμύρια. Η ταχύτητα διείσδυσης αυτών των συστημάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι σημαντική καθώς ενδεικτικά μόνο το 2023 ο αριθμός αυξήθηκε περισσότερο από 300% σε σχέση με το 2022. Τη ραγδαία εξάπλωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών συνδέεται άρρηκτα με μια σειρά από κοινωνικούς οικονομικούς και πολιτικούς παράγοντες. Αρχικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση ειδικά κατά την περίοδο 2021 έως 2023 καταγράφεται σημαντική κλιμάκωση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας απόρροια της ενεργειακής κρίσης η οποία ακολούθησε τον πόλεμο στην Ουκρανία. Η κλιμάκωση αυτή των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας έστρεψε ακόμη περισσότερους καταναλωτές στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών χάρη στο χαμηλό τους κόστος και την ευκολία εγκατάστασης. Σύμφωνα με την εφημερίδα The Guardian, το διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών οφείλεται στην απλή τους εγκατάσταση και στη

δυνατότητα των ιδιοκτητών τους να μπορούν να τα φέρουν και να τα μεταφέρουν σε μια νέα κατοικία ειδικά αν πρόκειται για ενοικιαστές (Connolly, 2024).

Εκτός από τη Γερμανία όπου υπάρχει ήδη θεσμοθετημένο πλαίσιο με σαφείς κανόνες για τη χρήση και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών από το 2015, με το ανώτατο όριο εγκατεστημένης ισχύος να περιορίζεται στα 800W, αντίστοιχες προσπάθειες καταγράφονται και σε άλλες χώρες στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Για παράδειγμα στην Αυστρία, στην Ολλανδία, και πρόσφατα στην Ιταλία και στην Ισπανία, υιοθετήθηκαν κανονισμοί στα εκεί θεσμικά πλαίσια για την υποστήριξη της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών και άλλων μικρής κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων από καταναλωτές.

Το κοινό χαρακτηριστικό των χωρών οι οποίες έχουν πρωτοστατήσει στην ενσωμάτωση κανόνων για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών στα θεσμικά τους πλαίσια είναι ότι οι πολίτες στις χώρες αυτές συμμετέχουν ενεργά στην παραγωγή ενέργειας, με την συνειδητοποίηση και την ευαισθητοποίηση γύρω από το προφίλ του παραγωγού - καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας να αυξάνεται διαρκώς τόσο λόγω της κουλτούρας στις χώρες αυτές όσο και λόγω προσπαθειών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και τυχόν κρατικών φορέων. Χαρακτηριστικά στα πλαίσια της ευρωπαϊκής στρατηγικής για την ενεργειακή μετάβαση και συγκεκριμένα στην πράσινη συμφωνία (Green Deal), τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αναφέρονται ξεχωριστά ως βασικό εργαλείο για την επιτάχυνση της επίτευξης των στόχων απανθρακοποίησης και προκρίνονται ως λύσεις χαμηλού κόστους και υψηλής κοινωνικής αποδοχής.

Σύμφωνα με στοιχεία της SolarPower Europe, αναμένεται να συνεχιστεί η ανοδική πορεία των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στην Ευρωπαϊκή Ένωση με τον ετήσιο ρυθμό αύξησης της αγοράς να ξεπερνά το 20% μέχρι το 2030. Σε χώρες όπως η Ολλανδία, το Βέλγιο και η Τσεχία καταγράφεται ραγδαία αύξηση στις πωλήσεις τυποποιημένων και η φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών (SolarPower Europe , 2024).

Έξω από τα όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης καταγράφονται σημαντικές ενδείξεις ότι το ενδιαφέρον για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών είναι παγκόσμιο. Ενδεικτικά στην Κίνα, αν και δεν υπάρχουν επίσημα δημόσια διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών καταγράφεται αυξημένο ενδιαφέρον για φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας για κατοικίες χάρη και σε κίνητρα τα οποία παρέχονται από το κράτος αλλά και στο χαμηλό κόστος κτήσης του εξοπλισμού το μεγαλύτερο μέρος του οποίου κατασκευάζεται στην Κίνα και σε άλλες χώρες της Ασίας.

Η αγορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων με ενσωματωμένες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, στην οποία εμπίπτουν και φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, αναμένεται να καταγράψει ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξεως του 25% από το 2025 και μέχρι το 2031. Η πρόβλεψη αυτή βασίζεται στο παγκόσμιο ενδιαφέρον γύρω από τη στροφή προς την αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στην ένταση της ενεργειακής κρίσης και των γεωπολιτικών κρίσεων (Lucintel, 2024).

Σε χώρες όπως η Ιαπωνία και η Νότια Κορέα, καταγράφεται σημαντική ενσωμάτωση μικρής κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πολυώροφα κτίρια όπου ο διαθέσιμος χώρος για φωτοβολταϊκά στέγης είναι εξαιρετικά περιορισμένος. Παράλληλα σημαντική είναι και η συνεισφορά των εταιρειών κατασκευής εξοπλισμού για φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου ολοένα και περισσότεροι κατασκευαστές διαθέτουν φωτοβολταϊκά πάνελ με ενσωματωμένους μικροαντιστροφείς και πακέτα εξοπλισμού για plug and play φωτοβολταϊκά συστήματα.

Ειδικότερα σε ότι αφορά στον κλάδο των plug and play φωτοβολταϊκών συστημάτων καταγράφεται αύξηση των πωλήσεων το 2023 με τον αριθμό των συστημάτων που πωλήθηκαν να ξεπερνά τα 1,3 εκατομμύρια μονάδες. Στη Γερμανία περίπου το 10% των νέων εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων γίνεται σε κατοικίες, με προβλέψεις να δείχνουν ότι σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορεί να ξεπεράσουν τις 10 εκατομμύρια μονάδες μέχρι το 2030 (SolarPower Europe , 2024).

5. Μελέτη Περίπτωσης: Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού Συστήματος Μπαλκονιού σε Οικιακή Κατοικία στη Λάρισα

5.1 Η έλλειψη θεσμικού πλαισίου στην Ελλάδα

Παρά την αυξανόμενη ανάγκη για ενεργειακή αυτονομία και την ώθηση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η Ελλάδα εξακολουθεί να μην διαθέτει σαφές θεσμικό πλαίσιο για τα φωτοβολταϊκά μπαλκονιών. Σε αντίθεση με χώρες όπως η Γερμανία και η Αυστρία, όπου τέτοιες εγκαταστάσεις επιτρέπονται υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, στη χώρα μας ούτε απαγορεύονται ρητά ούτε επιτρέπονται με σαφείς τεχνικές οδηγίες. Αυτό δημιουργεί σύγχυση σε τεχνικούς, καταναλωτές και διαχειριστές κτηρίων, περιορίζοντας τις δυνατότητες εφαρμογής αυτής της εξαιρετικά προσιτής και βιώσιμης λύσης. Ενδεικτικά, με την εγκατάσταση ενός συστήματος ισχύος 800 Wp σε μπαλκόνι νοτίου προσανατολισμού, ένα αστικό νοικοκυριό μπορεί να εξοικονομήσει έως και 864 kWh ετησίως, που μεταφράζεται σε περίπου 130 € οικονομικό όφελος και μείωση εκπομπών κατά 354 kg CO₂.

5.2 Περιγραφή περίπτωσης – Διαμέρισμα στο κέντρο της Λάρισας

Τοποθεσία: Κέντρο Λάρισας

Οικογένεια: 4 μέλη

Κατανάλωση ρεύματος (καλοκαίρι): 350–400 kWh/μήνα

Προσανατολισμός μπαλκονιού: Νότιος

Εγκατεστημένος εξοπλισμός:

Στοιχείο	Περιγραφή
Πάνελ	2 πολυκρυσταλλικά πάνελ, 400 Wp το καθένα
Συνολική ισχύς	800 Wp
Απόδοση	30% (πραγματική εκμετάλλευση)
Μηνιαία παραγωγή	60–72 kWh
Αντιστροφέας (Inverter)	Μονοφασικός με MPPT

Η μελέτη αφορά εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιού σε οροφодιαμέρισμα τετραμελούς οικογένειας στο κέντρο της Λάρισας. Η κατοικία διαθέτει μπαλκόνι με νότιο προσανατολισμό, εξασφαλίζοντας υψηλό επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες. Η μέση κατανάλωση ρεύματος του νοικοκυριού φτάνει τις 350–400 kWh μηνιαίως, με τις ανάγκες να αυξάνονται λόγω χρήσης κλιματιστικών, ψυγείων, φωτισμού και μικροσυσκευών. Η οικογένεια αναζητά τρόπους περιορισμού των εξόδων ενέργειας και του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος.

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από δύο πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύος 400 Wp το καθένα, συνδεδεμένα σε inverter μονοφασικής εξόδου. Με εκτιμώμενη απόδοση λειτουργίας 30%, το σύστημα μπορεί να αποδώσει 60–72 kWh τον μήνα, μειώνοντας αισθητά την εξάρτηση του νοικοκυριού από το ηλεκτρικό δίκτυο και επιτρέποντας την κάλυψη περίπου του 18–20% των αναγκών τους.

5.3 Ανάλυση εξοικονόμησης και ανθρακικού αποτυπώματος

Με βάση τον μέσο συντελεστή εκπομπών του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου (0,41 kg CO₂/kWh), η παραγωγή 864 kWh σε ετήσια βάση συνεπάγεται εξοικονόμηση περίπου 354 kg ισοδυνάμου CO₂. Αντίστοιχα, με μέση τιμή ρεύματος 0,15 €/kWh, η οικονομική εξοικονόμηση για το νοικοκυριό ανέρχεται σε 129,6 € ετησίως. Αυτό το ποσό ισοδυναμεί με εξοικονόμηση περίπου 10,8 € τον μήνα, καλύπτοντας βασικές συσκευές όπως φωτισμός, ψυγείο, router και ανεμιστήρες.

Η επένδυση του συστήματος εκτιμάται στα 950 €, με αναμενόμενο χρόνο απόσβεσης τα 7–8 έτη. Εάν ληφθεί υπόψη μελλοντική αύξηση του κόστους ενέργειας ή κρατική επιδότηση, ο χρόνος αυτός μειώνεται σημαντικά.

5.4 Παρατηρήσεις

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος αναδεικνύει πολλαπλά πλεονεκτήματα:

- Η εγκατάσταση γίνεται εύκολα, χωρίς τροποποιήσεις στην κατασκευή.
- Το κόστος παραμένει χαμηλό, καθιστώντας την επένδυση προσβάσιμη για νοικοκυριά χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος.
- Η ενεργειακή αυτονομία ενισχύεται, και η σταδιακή μετάβαση προς την απανθρακοποίηση επιταχύνεται.
- Δεν απαιτείται μεγάλη επιφάνεια – μόλις 2–3 τετραγωνικά μέτρα στο κάγκελο ή σε κάθετη στήριξη επαρκούν.
- Η εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους καθιστά το σύστημα βιώσιμο μακροπρόθεσμα.

Ωστόσο, υφίστανται και περιορισμοί:

- Η νομοθεσία στην Ελλάδα είναι ασαφής σχετικά με τη σύνδεση τέτοιων συστημάτων στο οικιακό δίκτυο.
- Πιθανές νομικές ή διαχειριστικές ενστάσεις σε πολυκατοικίες μπορεί να αποτρέψουν την υλοποίηση.
- Η απόδοση μειώνεται όταν υπάρχει σκίαση ή μη ιδανικός προσανατολισμός.

- Το σύστημα δεν μπορεί να καλύψει βαριές καταναλώσεις (π.χ. κουζίνα, θερμοσίφωνα), αλλά λειτουργεί επικουρικά.

5.5 Ερωτηματολόγιο

1. Γνωρίζετε την έννοια των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιού;(Ναι/Όχι)
2. Θα σας ενδιέφερε η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος στο μπαλκόνι σας;
(Ναι/Όχι)
3. Ποια είναι, κατά τη γνώμη σας, τα κυριότερα εμπόδια για μια τέτοια εγκατάσταση; (Νομικά/Οικονομικά/Αισθητικά/Τεχνικά)
4. Γνωρίζετε αν η πολυκατοικία σας επιτρέπει τέτοιες επεμβάσεις (βάσει κανονισμού); (Ναι/Όχι)
5. Θα ήσασταν πρόθυμος/η να επενδύσετε έως 1.000 € για ένα τέτοιο σύστημα;
(Ναι/Όχι)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ

Το ερωτηματολόγιο που δημιουργήθηκε διανεμήθηκε σε 20 τετραμελείς οικογένειες με σκοπό τη διερεύνηση της στάσης και των προθέσεων τους σχετικά με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος μπαλκονιού.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

1. Γνώση της τεχνολογίας: Οι περισσότεροι συμμετέχοντες γνώριζαν τι είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιού, αν και αρκετοί δήλωσαν ότι χρειάζονται επιπλέον πληροφόρηση για τεχνικά ή θεσμικά ζητήματα.
2. Ενδιαφέρον για εγκατάσταση: Το ενδιαφέρον για υιοθέτηση του συστήματος ήταν ιδιαίτερα έντονο, με τη μεγάλη πλειονότητα να δηλώνει πρόθυμη να προχωρήσει, ιδίως για λόγους μείωσης κόστους και περιβαλλοντικής συνείδησης.
3. Κύρια εμπόδια: Αναφέρθηκαν κυρίως τα νομικά/κανονιστικά (π.χ. έλλειψη θεσμικού πλαισίου, άγνοια κανονισμών πολυκατοικιών) και οικονομικά εμπόδια. Λιγότερο συχνά εμφανίστηκαν οι τεχνικοί ή αισθητικοί περιορισμοί.

4. Κανονισμοί πολυκατοικιών: Περίπου οι μισοί ερωτηθέντες δήλωσαν ότι δεν γνωρίζουν τι προβλέπει ο κανονισμός της πολυκατοικίας τους, κάτι που λειτουργεί αποτρεπτικά στην απόφαση εγκατάστασης.
5. Διάθεση επένδυσης: Η πλειονότητα εμφανίστηκε θετική στην επένδυση ποσού έως 1.000 €, ειδικά αν διασφαλίζεται ουσιαστική εξοικονόμηση ή/και υπάρχει κρατική ενίσχυση.

Συμπερασματικά, η έρευνα υπογραμμίζει την ανάγκη για θεσμική αποσαφήνιση, ενίσχυση της ενημέρωσης του κοινού και παροχή κινήτρων ώστε να αυξηθεί η διείσδυση των φωτοβολταϊκών μπαλκονιού στα ελληνικά αστικά νοικοκυριά.

6.Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία πραγματεύτηκε το ερευνητικό θέμα των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών ως λύση για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της οικιακής κατανάλωσης. Μέσα από την ενδελεχή εξέταση θεωρητικών, τεχνικών, κανονιστικών και άλλων παραμέτρων αξιολογήθηκε η οικονομική και τεχνική βιωσιμότητα και σκοπιμότητα φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Επιπρόσθετα αξιολογήθηκε ο ρόλος ο οποίος μπορούν να διαδραματίσουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών στα πλαίσια της πράσινης ενεργειακής μετάβασης, του εκδημοκρατισμού της πρόσβασης στην ηλεκτρική ενέργεια και γενικότερα στην επιτάχυνση της μετάβασης σε μοντέλα βιώσιμης ανάπτυξης.

Στην εισαγωγή της παρούσης εξετάζεται το ευρύτερο πλαίσιο της ενεργειακής και περιβαλλοντικής κρίσης, μέσα στο οποίο καθίσταται επιτακτική και αδήριτη ανάγκη για αποκέντρωση και διασπορά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ειδικά στα αστικά κέντρα στα πλαίσια μετάβασης σε βιώσιμα ενεργειακά μοντέλα.

Οι εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών CO₂, από τον οικιστικό τομέα εμ αποτελεί σημαντικό ποσοστό του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος και η συμβολή των φωτοβολταϊκών συστημάτων πάρκων μπορεί να συνεισφέρει δραστικά στην σημαντική μείωση της συμβολής του οικιστικού τομέα στην κλιματική αλλαγή. Η διαρκής αύξηση του ενδιαφέροντος για αυτοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η σταδιακή μείωση των τιμών του εξοπλισμού των φωτοβολταϊκών συστημάτων να παρατηρείται τα τελευταία χρόνια αλλά και η ανάγκη για ενεργειακή αυτάρκεια έχουν δημιουργήσει ένα έδαφος πρόσφορο για την αξιοποίηση οποιασδήποτε διαθέσιμης επιφάνειας στα αστικά κέντρα προκειμένου να εγκατασταθούν μικρής κλίμακας φωτοβολταϊκά συστήματα όπως είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών.

Στην παρούσα εργασία τεκμηριώνονται τα συστήματα αυτά μπορώ να λειτουργήσουν συμπληρωματικά στην κατεύθυνση επίτευξης ενεργειακής αυτάρκειας μαζί με άλλα

συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ όταν λειτουργούν μεμονωμένα μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση περίπου 20-30% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Το κύριο πρόβλημα στο οποίο απαντούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών είναι η ανεπάρκεια επιφάνειας τους κοινόχρηστος χώρος των πολυκατοικιών προκειμένου όλοι οι ιδιοκτήτες διαμερισμάτων να έχουν τη δυνατότητα να εγκαταστήσουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στέγης. Επιπρόσθετα με την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών παρακάμπτονται περιορισμοί οι οποίοι αφορούν στην αποδοχή των συστημάτων αυτών από όλους τους συνιδιοκτήτες όπως συνήθως απαιτείται για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσης αναδείχθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο της ηλιακής ενέργειας και πραγματοποιήθηκε μία συνοπτική ανασκόπηση των διαθέσιμων τεχνολογιών για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια. Στο πλαίσιο αυτό, τονίστηκε η σημασία της ηλιακής ακτινοβολίας ως μίας ανεξάντλητης και καθαρής πηγής ενέργειας, ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου η ηλιακή προσπίπτουσα ενέργεια υπερβαίνει τα 1400 kWh/m² ετησίως σε πολλές περιοχές.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί μία ώριμη και αποδοτική λύση για την παραγωγή πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε προσόψεις και μπαλκόνια πολυκατοικιών, όπως συμβαίνει με τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορεί να εμπίπτει ακόμη και στα πλαίσια του βιοκλιματικού σχεδιασμού, καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να έχουν θετικά οφέλη μέσω της λειτουργίας τους ως παθητικά συστήματα σκίασης, ενώ αν συνδυάζονται και με κάθετες πράσινες προσόψεις τότε παρατηρούνται σωρευτικά οφέλη. Στα πλαίσια αυτά, μπορεί να μεγιστοποιείται η εξοικονόμηση ενέργειας και δη η μείωση κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας.

Παράλληλα, αναδεικνύεται ο ρόλος των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών στη μείωση της ενεργειακής φτώχειας, καθώς παρέχεται μέσω αυτών η δυνατότητα σε

καταναλωτές που δεν έχουν ιδιοκτησία στέγης ή πρόσβαση σε δώμα καθώς και σε νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος, να συμμετάσχουν ενεργά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για ιδιοκατανάλωση ή ακόμη και, υπό προϋποθέσεις να συμμετέχουν σε ενεργειακές κοινότητες πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός αυτό ενισχύει συνολικά τον εκδημοκρατισμό της πρόσβασης στην ηλεκτρική ενέργεια.

Επιπρόσθετα, η σύνδεση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών με τον ορισμό του «βιώσιμου κτιρίου» είναι άμεση, καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών συμβάλλουν στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων, ενισχύουν τη λειτουργική τους αποδοτικότητα και μπορούν να ενσωματώνονται στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό χωρίς να αλλοιώνεται σημαντικά η όψη των κτηρίων και χωρίς να απαιτούνται ριζικές δοκιμές επεμβάσεις στα κτήρια.

Στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσης εξετάστηκαν αναλυτικά οι τεχνικές πτυχές των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς παρουσιάστηκε συνοπτικά ο τρόπος λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πάνελ και παρουσιάστηκαν διάφοροι τύποι και διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πάνελ. Η κατανόηση των αρχών λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πάνελ και εν συνεχεία η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την ορθή αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών και για τη σύνδεσή τους με το ανθρακικό αποτύπωμα της οικιακής κατανάλωσης.

Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφεται ότι τα μονοκρυσταλλικά πάνελ εμφανίζουν τις υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ, (έως 22–24% σε εργαστηριακές συνθήκες), γεγονός το οποίο τα καθιστά τα πλέον κατάλληλα για εγκατάσταση σε περίπτωση διαθεσιμότητας μικρών επιφανειών όπως συμβαίνει στα μπαλκόνια αλλά και στις προσόψεις των πολυώροφων κτηρίων.

Από την άλλη πλευρά, τα πολυκρυσταλλικά πάνελ παρέχουν χαμηλότερη απόδοση (περίπου 13–17%) αλλά έχουν και σημαντικά μικρότερο κόστος κτήσης, προσφέροντας μία οικονομικά βιώσιμη επιλογή σε περίπτωση όπου δεν τίθενται περιορισμοί χώρου για την εγκατάσταση των πάνελ. Τα δε πάνελ άμορφου πυριτίου, παρόλο που παρουσιάζουν

αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις (6–8%), αποτελούν εναλλακτική λύση λόγω της ευκολίας τοποθέτησης σε μη συμβατικές επιφάνειες, όπου μπορεί να απαιτείται η εγκατάσταση εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε επίσης ο ρόλος των φωτοβολταϊκών αντιστροφέων (inverters), με έμφαση στους μικροαντιστροφείς (microinverters), οι οποίοι απαντώνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών. Αμφότερες οι κατηγορίες διαθέτουν ένα ή περισσότερα MPPT προκειμένου να διασφαλίζεται η υψηλή ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων ακόμη και σε συνθήκες μερικής σκίασης, βλάβης ή απόκλισης από τον ιδανικό προσανατολισμό και από την ιδανική κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ. Μάλιστα, στο σημείο αυτό τονίστηκε η σημασία επιλογής μικροαντιστροφέων με περισσότερα από ένα MPPT προκειμένου να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων αυτών, δεδομένου ότι τοποθετούνται κάθετα και σε προσανατολισμό που υπαγορεύεται από τον προσανατολισμό του μπαλκονιών. Επιπλέον, στο σημείο αυτό επισημάνθηκε η σημασία της δυνατότητας απομακρυσμένης ή και τοπικής, σε πραγματικό χρόνο, παρακολούθησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων προκειμένου να είναι εφικτή η βελτιστοποίηση του ταυτοχρονισμού παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η έγχυση περίσσειας ενέργειας στο δίκτυο. Η τεχνολογική ωριμότητα των επιμέρους εξαρτημάτων και η εμπορική διαθεσιμότητα αποτελούν ισχυρές ενδείξεις ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να εφαρμοστούν ευρέως χωρίς σημαντικούς τεχνικούς περιορισμούς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσης αναλύθηκε ενδελεχώς το θέμα των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Καταγράφηκαν τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά, τα λειτουργικά πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί, καθώς και οι προκλήσεις ενσωμάτωσης τους στα οικιστικά κτήρια.

Καταγράφηκε ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών χαρακτηρίζονται από περιορισμένη εγκατεστημένη ισχύ (συνήθως 300–600 Wp ανά σύστημα), χαμηλό βάρος και διαστάσεις, καθώς και ευκολία στην εγκατάσταση και αποσυναρμολόγηση, ακόμη και

από τους ίδιους τους χρήστες των κατοικιών. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών συνδέονται απευθείας με την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση της κατοικίας μέσω ενός ή περισσότερων ρευματοδοτών στο μπαλκόνι των κατοικιών και δεν απαιτείται η εκτέλεση πολύπλοκων τεχνικών και ηλεκτρολογικών εργασιών. Η τυπική απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών αρκεί για την κάλυψη περίπου 20–30% της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας ενός μέσου αστικού νοικοκυριού.

Από την αξιολόγηση των ευρημάτων από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας προέκυψαν σημαντικά οφέλη:

- Μείωση του ενεργειακού κόστους των νοικοκυριών, ειδικά σε συνθήκες αυξημένων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας – ενεργειακής κρίσης
- Βελτίωση της ενεργειακής αυτάρκειας και μερική απεξάρτηση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας
- Ενεργειακή αυτάρκεια αν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών συνδυάζονται και με άλλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Ενίσχυση της αποκεντρωμένης - διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Παράκαμψη της ανεπάρκειας χώρου στις κοινόχρηστες ταράτσες
- Δυνατότητα συμμετοχής και των ενοικιαστών στην πράσινη μετάβαση
- Συμβολή στη μείωση εκπομπών CO₂ κατά 300–500 κιλά ετησίως ανά νοικοκυριό

Ωστόσο, από την αξιολόγηση των ευρημάτων από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας προέκυψαν και σημαντικές προκλήσεις και περιορισμοί:

- Η έλλειψη ξεκάθαρα κανονιστικού πλαισίου στην Ελλάδα, και σε άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το οποίο να έχει ειδική μέριμνα για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών
- Τεχνικοί περιορισμοί και περιορισμοί ασφάλειας
 - Λόγω της αμφίδρομης ροής ηλεκτρικής ενέργειας στη κεντρική γραμμή των κατοικιών και στην ηλεκτρική γραμμή του ρευματοδότη όπου συνδέεται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπαλκονιών

- Λόγω των διαθέσιμων προστασιών αντί νησιδοποίησης των μικροαντιστροφέων των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών
- Λόγω της τυχόν υπερφόρτισης του δικτύου, ειδικά κατά τις μεσημεριανές ώρες
- Περιορισμοί που σχετίζονται με την κοινωνική αποδοχή των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών

Η σύγκριση του ελληνικού θεσμικού πλαισίου με το θεσμικό πλαίσιο άλλων ευρωπαϊκών χωρών ανέδειξε σημαντικές διαφορές σε ό,τι αφορά στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών. Ειδικότερα, σε χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστρία και η Ολλανδία, έχει θεσπιστεί σαφές κανονιστικό πλαίσιο το οποίο επιτρέπει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών χωρίς να απαιτείται κάποια διαδικασία αδειοδότησης, εφόσον τηρούνται όρια ισχύος (συνήθως έως 600Wp) και πληρούνται βασικές προδιαγραφές ασφαλείας.

Αντίθετα, στην Ελλάδα, εντοπίζεται θεσμική ασάφεια: δεν υφίσταται ρητή απαγόρευση αλλά ούτε και θεσμική πρόβλεψη των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, με αποτέλεσμα η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων να βασίζεται κυρίως στην πρωτοβουλία των τελικών χρηστών, χωρίς να υπάρχει κεντρική καθοδήγηση, τυποποίηση ή υποστήριξη από το διαχειριστή του δικτύου. Η έλλειψη πρόβλεψης για ζητήματα όπως η συμμόρφωση με πρότυπα ασφαλείας, η διαδικασία σύνδεσης με την εγκατάσταση και η ευθύνη σε περίπτωση βλάβης ή αστοχίας, λειτουργεί αποτρεπτικά για την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας στην Ελλάδα.

Επιπρόσθετα, εντοπίστηκαν και πρακτικοί περιορισμοί και εμπόδια για την ευρεία ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών:

- Η ύπαρξη σκιάσεων στο αστικό περιβάλλον που επηρεάζουν την απόδοση
- Η δυσκολία επίτευξης ιδανικής κλίσης και προσανατολισμού των φωτοβολταϊκών πάνελ σε κάθετες επιφάνειες
- Η έλλειψη τυποποιημένων βάσεων στήριξης για ασφαλή και αισθητικά αποδεκτή τοποθέτηση στα κιγκλιδώματα μπαλκονιών

Παρόλα αυτά, μέσα από την ανάλυση και συζήτηση των ευρημάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης καταδείχθηκε ότι τα όποια τεχνικά προβλήματα είναι διαχειρίσιμα μέσω της εξέλιξης των μικροαντιστροφών, μέσα από την επιλογή των πλέον κατάλληλων τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψης και μέσω της σταδιακής ωρίμανσης του απαραίτητου εξοπλισμού. Συνεπώς, η βασική προϋπόθεση για την ενίσχυση της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών δεν είναι να αντιμετωπιστούν οι τεχνικοί περιορισμοί αλλά να υπάρξει θεσμική βούληση και προσαρμογή του κανονιστικού πλαισίου ώστε να υπάρχει ειδική μέριμνα για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών.

Επιπλέον, η παρούσα ανέδειξε τη σημασία των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών ως εργαλείο εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης των πολιτών απέναντι σε ζητήματα βιωσιμότητας και πράσινης ενεργειακής μετάβασης. Λόγω του χαμηλού κόστους κτήσης και της ευκολίας εγκατάστασης, ακόμα και από τους ίδιους τους χρήστες των κατοικιών, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών δύνανται να αποτελέσουν το πρώτο βήμα για την επαφή του μέσου καταναλωτή με την αυτοπαραγωγή ενέργειας και τις αρχές της βιώσιμης ή πράσινης οικονομίας.

Το χαμηλό αρχικό κόστος επένδυσης –που συχνά κυμαίνεται κάτω από τα 1.000 ευρώ– σε συνδυασμό με τη δυνατότητα τοποθέτησης χωρίς εκτενείς επεμβάσεις, καθιστά τα τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών ιδιαίτερα κατάλληλα για νέους καταναλωτές, ενοικιαστές και νοικοκυριά με χαμηλό εισόδημα. Επομένως, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να επιτελέσουν και κοινωνικό ρόλο, ενισχύοντας την ισότητα στην πρόσβαση στην πράσινη ενέργεια και εν γένει στην ηλεκτρική ενέργεια και περιορίζοντας τον κίνδυνο ενεργειακής φτώχειας.

Παράλληλα, σε ένα γενικότερο πλαίσιο εξέτασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, αυτά μπορούν να ενσωματώνονται στον σχεδιασμό των κτιρίων είτε ως μέρος ενός ευρύτερου συστήματος ενεργειακής αναβάθμισης είτε ως αυτόνομες παρεμβάσεις. Στην παρούσα εργασία επισημαίνεται ότι η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών σε συνδυασμό με άλλες πράσινες τεχνολογίες (όπως οι κάθετες

πράσινες προσόψεις, τα συστήματα φυσικού αερισμού και ο φυσικός φωτισμός) μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση του μικροκλίματος εντός των κτηρίων και εν γένει να ενισχύσει τον βιοκλιματικό χαρακτήρα του κτιρίου.

Καθίσταται σαφές από τα ευρήματα της παρούσης ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος στην οικιακή κατανάλωση και ακόμη και σε ενεργειακή αυτάρκεια όταν λειτουργούν συμπληρωματικά άλλων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών αποτελούν μία βιώσιμη, λειτουργική και κοινωνικά συμπεριληπτική λύση για τη μείωση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατοικιών, ιδιαίτερα στο αστικό πεδίο.

Στην Ελλάδα, παρότι διατίθενται ιδανικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και παρότι η ανάγκη για διασπορά της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγάλη καταγράφεται ένα θολό τοπίο και μία αργή διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών. Η έλλειψη σαφούς κανονιστικού πλαισίου, η αβεβαιότητα της συμμόρφωσης με τα πρότυπα ασφαλείας, καθώς δε γίνεται μνεία στα φωτοβολταϊκά συστήματα μπαλκονιών και η απουσία οικονομικών κινήτρων δημιουργούν ένα περιβάλλον στο οποίο η διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

Προκειμένου να επιταχυνθεί η πράσινη μετάβαση μέσα από τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών απαιτείται να τυποποιηθεί η διαδικασία γνωστοποίησης και να αποφευχθεί τυχόν διαδικασία αδειοδότησης, να θεσπιστούν όρια για τη μέγιστη ισχύ των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών, αλλά και να δοθούν οικονομικά ή φορολογικά ή άλλα αντίστοιχα κίνητρα ώστε ακόμη και νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος να αποκτήσουν τη δυνατότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων μπαλκονιών και να απολαύσουν χαμηλότερου κόστους ενέργειας.

Βιβλιογραφία

Alharbi, H. & Kais, S., 2015. Theoretical limits of photovoltaics efficiency and possible improvements by intuitive approaches learned from photosynthesis and quantum coherence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 43, p. 1073–1089.

Balaji, K., Iniyan, S. & Goic, R., 2018. Thermal performance of solar water heater using velocity enhancer. *Renewable Energy*, Τόμος 115, p. 887–895.

Battisti, A., 2020. Bioclimatic Architecture and Urban Morphology. *Energies*, 13(5819), pp. 1-20.

Bianchini, A., Gambuti, M., Pellegrini, M. & Sacconi, C., 2016. Performance analysis and economic assessment of different photovoltaic technologies based on experimental measurements. *Renewable Energy*, Τόμος 85, pp. 1-11.

Brus, L. E., 1984. Electron–electron and electronhole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. *American Institute of Physics*, 80(9), pp. 4403-4409.

Cañete, C., Carretero, J. & Sidrach-de-Cardona, M., 2014. Energy performance of different photovoltaic module technologies. *Energy*, 65(1), pp. 295-302.

Carr, A. & Pryor, T., 2004. A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates. *Solar Energy*, 76(1-3), pp. 285-294.

Chitra, K., Ahmed, K., Das, A. & Shailendra, B., 2021. A Hybrid Wind-Solar Standalone Renewable Energy System. *2021 Smart Technologies, Communication and Robotics (STCR)*, pp. 1-5.

Cillari, G., Fantozzi, F. & Franco, A., 2021. Passive Solar Solutions for Buildings: Criteria and Guidelines for a Synergistic Design. *Applied Sciences*, 11(1), p. 376.

Connolly, K., 2024. *If a million Germans have them, there must be something in it": How balcony solar is taking off.* [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2024/dec/18/if-a-million-germans-have-them-there-must-be-something-in-it-how-balcony-solar-is-taking-off>
[Πρόσβαση 5 May 2025].

Daemei, A. B., Khotbehsara, E. M. & Eghbali, S. R., 2019. Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. *Journal of Building Engineering*, Τόμος 25, pp. 1-17.

Demirel, G., Grafenhorst, S., Förderer, K. & Hagenmeyer, V., 2024. Impact and Integration of Mini Photovoltaic Systems on Electric Power Distribution Grids. *Energy Informatics Academy Conference Cham: Springer Nature*, October, pp. 247-265.

Ehringer, H. & Zito, U., 1984. Bioclimatic Design for Building Systems and Components. Στο: E. H. & Z. U., επιμ. *Energy Saving in Buildings*. Dordrecht: Springer.

Elaouzy, Y. & El Fadar, A., 2022. A multi-level evaluation of bioclimatic design in Mediterranean climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Τόμος 52, p. 102124.

EnergySage, 2020. *Monocrystalline and polycrystalline solar panels: what you need to know*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>
[Πρόσβαση 25 Οκτώβριος 2020].

EUPD Research & Anker SOLIX, 2025. *Joint study shows storage solutions significantly increase the economic efficiency of balcony power plants*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.anker.com/eu-en/blogs/news/joint-study-by-eupd-research-and-anker-solix-shows>
[Πρόσβαση 2 May 2025].

EUPD Research & Anker SOLIX, 2025. *Joint study shows storage solutions significantly increase the economic efficiency of balcony power plants*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.anker.com/eu-en/blogs/news/joint-study-by-eupd-research->

and-anker-solix-shows-storage-solutions-significantly-increase-the-economic-efficiency-of-balcony-power-plants

[Πρόσβαση 11 Μάρτιος 2025].

Flores-Larsen, S., Filippín, C. & Barea, G., 2019. Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy and Buildings*, Τόμος 184, pp. 216-229.

Freitas, S. & Brito, M., 2016. *Bifacial PV integrated on building balconies*. Munich, Germany, 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.

Gerber, D. και συν., 2025. Barriers to Balcony Solar and Plug-In Distributed Energy Resources in the United States. *Energies*, 18(8), p. 2132.

Goodmen Energy, 2023. *Vertical photovoltaic (PV) systems on facades, balconies and fences*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.goodmen-energy.de/en/blog/details/vertical-photovoltaic-pv-systems>

[Πρόσβαση 11 Μάρτιος 2025].

Green, M. και συν., 2021. Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in photovoltaics: research and applications*, 29(1), pp. 3-15.

Hady, A. R., 2017. Modeling and simulation of a micro grid-connected solar PV system. *Water Science*, pp. 1-10.

International Energy Agency, 2018. *Renewables 2018*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.iea.org/renewables2018/>

Izadian, A., Pourtaherian, A. & Motahari, S., 2012. Basic Model and Governing Equation of Solar Cells used in Power and Control Applications. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*, pp. 1483-1487.

Jayawardena, K. και συν., 2013. Inorganics-in-organics': recent developments and outlook for 4G polymer solar cells. *Nanoscale*, 5(18), p. 8411–8427.

Kannan, N. & Vakeesan, D., 2016. Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 62, pp. 1092-1105.

Kazmerski, L. L., 1997. Photovoltaics: A review of cell and module technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1(1-2), pp. 71-170.

Krauter, S. & Bendfeld, J., 2024. Efficiency Ranking of Photovoltaic Microinverters and Energy Yield Estimations for Photovoltaic Balcony Power Plants. *Energies*, 17(22), p. 5551.

Lamnatou, C. & Chemisana, D., 2017. Photovoltaic/thermal (PVT) systems: A review with emphasis on environmental issues. *Renewable energy*, Τόμος 105, pp. 270-287.

Loumakis, S., Giannini, E. & Maroulis, Z., 2019. Renewable Energy Sources Penetration in Greece: Characteristics and Seasonal Variation of the Electricity Demand Share Covering. *Energies*, 12(12), p. 2441.

Lucintel, 2024. *Balcony Photovoltaic System with Battery Market: Trends, Forecast and Competitive Analysis 2025–2031*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.lucintel.com/balcony-photovoltaic-system-with-battery-market.aspx>

[Πρόσβαση 5 May 2025].

Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F., Sabio-Ortega, A. & García-Cruz, A., 2015. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 49, pp. 736-755.

Maurer, C., Cappel, C. & Kuhn, T., 2017. Progress in building-integrated solar thermal systems. *Solar Energy*, Τόμος 154, pp. 158-186.

Mavromatakis, F., Viskadourous, G., Haritaki, H. & Xanthos, G., 2018. Photovoltaic Systems and Net Metering in Greece. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(4), pp. 3168-3171.

Michael, J., Iniyar, S. & Goic, R., 2015. Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: a reference guide. *Renewable and sustainable energy reviews*, Τόμος 51, pp. 62-88.

Naeimi, Y., Zamanian, F. & Rostami, R., 2020. Calculation of the Optimal Installation Angle for Seasonal Adjusting of PV Panels Based on Solar Radiation Prediction. *arXiv preprint arXiv:2004.12252*, 2004(12252).

Ozarisoy, B. & Altan, H., 2021. Systematic literature review of bioclimatic design elements: Theories, methodologies and cases in the South-eastern Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, Τόμος 111281, p. 250.

Ritson, S. & Elkhateb, A., 2020. An Overview of Microinverter Design Characteristics and MPPT Control. *arXiv preprint arXiv:2009.06055*, Τόμος 06055, p. 2009.

Rodrigues, A., Oliveira, A. & Palmero-Marrero, A., 2024. Integration of PV Systems into the Urban Environment: A Review of Their Effects and Energy Models. *Urban Science*, 8(4), p. 215.

Sachin, V. T., Jain, V. R. & Thakkar, K., 2014. A Review: Solar Water Heating Systems. *National Conference on Emerging Vista of Technology in 21st Century*, pp. 1-8.

Salas, V. O. E., Barrado, A. & Lazaro, A., 2006. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells* , Τόμος 90, pp. 1555-1578.

Seme, S., Strojanšek, L., Simonič, E. & Sredenšek, K., 2024. Balcony solar photovoltaic plug-and-play systems. *22nd International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'24) Bilbao (Spain)*, 26-28 June .

Sharma, A., Sharma, C., Mullick, S. & Kandpal, T., 2015. Potential of Solar Energy Utilization for Process Heating in Paper Industry in India: A Preliminary Assessment. *Energy Procedia*, Τόμος 79, pp. 284-289.

Si, P. και συν., 2016. An Optimization Model Applied to Active Solar Energy System for Buildings in Cold Plateau Area. *Energy Procedia*, Τόμος 88, pp. 443-449.

Solar Business Hub, 2020. *Monocrystalline silicon wafers market share expected to reach nearly 75 percent in 2020 and continue to grow, ITRPV report finds*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://solarbusinesshub.com/2020/05/08/monocrystalline-silicon-wafers-market-share-expected-to-reach-nearly-75-percent-in-2020-and-continue-to-grow-itrpv-report-finds/>

[Πρόσβαση 25 Οκτώβριος 2020].

Solargis, 2019. *Solar resource maps of Europe*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe>

[Πρόσβαση 3 Ιανουάριος 2022].

SolarPower Europe , 2024. *A deep dive on plug-in solar PV: A fast-emerging solar segment*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/new-report-a-deep-dive-on-plug-in-solar-pv-a-fast-emerging-solar-segment>

[Πρόσβαση 5 May 2025].

SolarPower Europe , 2024. *Global Market Outlook 2024 SolarPower Europe (2024). Global Market Outlook for Solar Power 2024–2028*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.solarpowereurope.org/insights/global-market-outlook>

[Πρόσβαση 5 May 2025].

Stellbogen, D., Dalkowski, L. & Bettzieche, J., 2024. Efficiency Ranking of Photovoltaic Microinverters and Energy Yield Estimations for Photovoltaic Balcony Power Plants. *Energies*, 17(22), p. 5551.

Tian, Y. & Zhao, C., 2013. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied energy*, Τόμος 104, pp. 538-553.

Tsilingiridis, G. & Martinopoulos, G., 2010. Thirty years of domestic solar hot water systems use in Greece - energy and environmental benefits - future perspectives. *Renewable Energy*, Τόμος 35, pp. 490-497.

Vassiliades, C., Kalogirou, S., Michael, A. & Savvides, A., 2019. A Roadmap for the Integration of Active Solar Systems into Buildings. *Applied Sciences*, 9(12), p. 2462.

Wurfel, P., 1982. The chemical potential of radiation. *Solid States Physics*, 15(18), pp. 3967-3985.

Wu, Z. & Chul-Soo, K., 2023. A preliminary study understanding the possibility and benefits of solar photovoltaic collector integration with vertical green balconies in building facade reconstruction. *Frontiers in Energy Research*, Τόμος 10, p. 1025564.

Xiang, C. & Matusiak, B., 2022. Façade Integrated Photovoltaics design for high-rise buildings with balconies, balancing daylight, aesthetic and energy productivity performance. *Journal of Building Engineering*, Τόμος 57, p. 104950.

Zhang, X. και συν., 2015. Active Solar Thermal Facades (ASTFs): from concept, application to research questions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 50, pp. 32-63.

Zuhairy, A. & Sayigh, A., 1993. The development of the bioclimatic concept in building design. *Renewable energy*, Τόμος 3, pp. 521-533.