



# ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Βιώσιμος Σχεδιασμός Εσωτερικού Περιβάλλοντος Κτιρίων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Ανάπτυξη Υπολογιστικού Εργαλείου Ανάλυσης Ενεργειακής  
Αυτάρκειας και Αυτοκατανάλωσης σε Κτίρια με Φωτοβολταϊκά:  
Μελέτη Περίπτωσης και Σενάρια Ενσωμάτωσης»

«Τζιράκης Εμμανουήλ»

Επιβλέπων καθηγητής: «Σκάνδαλος Νικόλαος»

Πάτρα, «Ιούνιος» «2025»

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Ανάπτυξη Υπολογιστικού Εργαλείου Ανάλυσης Ενεργειακής  
Αυτάρκειας και Αυτοκατανάλωσης σε Κτίρια με Φωτοβολταϊκά:  
Μελέτη Περίπτωσης και Σενάρια Ενσωμάτωσης»

«Τζιράκης Εμμανουήλ»

Επιτροπή Επίβλεψης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

«Σκάνδαλος Νικόλαος»

«Καθηγητής Σύμβουλος Ε.Α.Π.»

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

«Τσόκα Στέλλα»

«Καθηγήτρια Σύμβουλος Ε.Α.Π.»

Πάτρα, «Ιούνιος» «2025»

*«Στο Χαρουλιώ και στη Βασιλικούλα για την υπομονή τους»*

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου για την ενεργειακή ανάλυση κτιρίων με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, με έμφαση σε βασικούς δείκτες απόδοσης, όπως η αυτοκατανάλωση (Self-Consumption - SC) και η ενεργειακή αυτάρκεια (Self-Sufficiency - SS). Μέσω μελέτης περίπτωσης σε υφιστάμενο κτίριο, αξιολογείται η επίδραση διαφορετικών σεναρίων ενσωμάτωσης Φ/Β στην ενεργειακή του απόδοση.

Αρχικά, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αναδεικνύονται οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπως η γεωγραφική θέση, ο προσανατολισμός, οι σκιάσεις και η θέση τοποθέτησης ή/και ενσωμάτωσης στο κτίριο. Ακολουθεί μελέτη περίπτωσης, στην οποία εφαρμόζεται η ανεπτυγμένη μεθοδολογία για την αποτίμηση των υφιστάμενων ενεργειακών καταναλώσεων και την πρόβλεψη της απόδοσης από διαφορετικά σενάρια ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών.

Το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε επιτρέπει τη δυναμική ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου, την σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων τοποθέτησης και λειτουργίας συστημάτων όχι μόνον φωτοβολταϊκών αλλά γενικώς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή/και συμβατικών. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη τόσο σε επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο, με βελτίωση της ενεργειακής αυτάρκειας και μείωση της εξάρτησης από το δίκτυο.

Συνολικά, η εργασία καταδεικνύει τη σημασία της αξιολόγησης πολλαπλών παραμέτρων για τη βέλτιστη ενσωμάτωση φωτοβολταϊκής τεχνολογίας σε κτίρια και προσφέρει ένα χρήσιμο εργαλείο υποστήριξης για μελετητές, μηχανικούς και ενεργειακούς συμβούλους στον τομέα της βιώσιμης ενέργειας.

### Λέξεις – Κλειδιά

Ενεργειακή ανάλυση, φωτοβολταϊκά, ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών, τοποθέτηση φωτοβολταϊκών.

# « Development of a Computational Tool for the Analysis of Energy Self-Sufficiency and Self-Consumption in Buildings with Photovoltaics: Case Study and Integration Scenarios »

«TZIRAKIS EMMANOUIL»

## **Abstract**

This thesis focuses on the development of a computational tool aimed at the energy analysis of buildings by calculating key indicators such as Self-Consumption (SC) and Self-Sufficiency (SS) in buildings where photovoltaic systems are installed or integrated. Through a case study, the thesis examines the feasibility of installing or integrating photovoltaics into an existing building, investigating the impacts on its energy performance.

Initially, a literature review highlights the main factors affecting the performance of photovoltaic systems, such as geographic location, orientation, shading, and their placement or integration within the building envelope. This is followed by a case study in which the developed methodology is applied to assess the building's existing energy consumption and to predict the performance under different photovoltaic integration scenarios.

The application is based on a computational model that allows the analysis of alternative installation and operation scenarios for both renewable and conventional energy systems. The results indicate that PV integration can offer significant benefits both in terms of energy savings and environmental impact, improving energy self-sufficiency and reducing dependence on the grid.

In conclusion, the thesis demonstrates the importance of evaluating multiple parameters for the optimal integration of photovoltaic technology in buildings and provides a practical tool for researchers and engineers in the field of sustainable energy

## **Keywords**

BAPV, BIPV, photovoltaic, BIMsolar.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Περιεχόμενα .....	7
Κατάλογος Εικόνων .....	9
Κατάλογος Πινάκων .....	11
Εισαγωγή.....	12
1. Τρόποι ενσωμάτωσης-Υλικά και νέες τεχνολογίες .....	15
1.1 Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στις οροφές και στο κέλυφος των κτιρίων.....	15
1.1.1 Βασικές αρχές .....	15
1.1.2 Ενσωμάτωση στην οροφή .....	15
1.1.3 Ενσωμάτωση στην πρόσοψη.....	16
1.1.4 Ενσωμάτωση στα συστήματα σκίασης .....	17
1.1.5 Ενσωμάτωση σε διαφανείς επιφάνειες.....	18
1.1.6 Προσαρμοσμένη ενσωμάτωση.....	18
1.2 Σκιάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	19
1.3 Τεχνολογίες-προϊόντα, υλικά και αισθητική φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	20
1.3.1 Τεχνολογίες .....	20
1.3.2 Υλικά.....	22
1.3.1 Αισθητική .....	23
2. Συνεισφορά Φ/Β συστημάτων στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.....	24
2.1 Κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης .....	24
2.1.1 Τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας .....	24
2.1.2 Φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων (thin films) και διπλής όψης (bifacial) .....	25
2.2 Φωτοβολταϊκά/Θερμικά συστήματα (PV/T) .....	27
2.3 Περιβαλλοντικά-Οφέλη και προκλήσεις-Προοπτικές .....	29
2.3.1 Περιβαλλοντικά.....	29
2.3.2 Οφέλη και προκλήσεις .....	31
2.3.3 Προοπτικές .....	32
3. Προηγούμενη βιβλιογραφία.....	34
3.1 Βιβλιογραφικές βάσεις-Λέξεις κλειδιά .....	34
3.1.1 Βιβλιογραφικές βάσεις .....	34
3.1.2 Λέξεις κλειδιά .....	34
3.2 Διαλογή βιβλιογραφικών αναφορών.....	35
3.3 Οργάνωση βιβλιογραφικών πηγών .....	37
3.3.1 Mendeley.....	37
3.3.2 VOSviewer.....	38
4. Ερευνητικά ερωτήματα-Μεθοδολογία-Βασικά συμπεράσματα .....	40
4.1 Ερευνητικά ερωτήματα .....	40
4.1.1 Ερευνητικό Θέμα .....	40
4.1.2 Ερευνητικό Πρόβλημα .....	40
4.1.3 Σκοπός της Εργασίας .....	40
4.1.4 Ερευνητικά Ερωτήματα .....	40
4.1.5 Συγκλίσεις/αποκλίσεις των βιβλιογραφικών πηγών .....	41
4.1.5 Ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση .....	41

4.2 Μεθοδολογική προσέγγιση- flow chart .....	42
4.2.1 Μεθοδολογική προσέγγιση .....	42
4.2.2 Flow chart.....	42
4.3 Βασικά συμπεράσματα (SWOT ανάλυση) .....	44
4.3.1 Swot ανάλυση .....	44
4.3.2 Βασικά Συμπεράσματα .....	44
5. Μελέτη περίπτωσης και σενάρια ενσωμάτωσης.....	47
5.1 Το κτίριο.....	47
5.1.1 Τοποθεσία .....	47
5.1.2 Κάτοψη.....	48
5.1.3 Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατοικία .....	49
5.2 Λογισμικά και Σενάρια ενσωμάτωσης.....	49
5.2.1 BIMsolar .....	49
5.2.2 Δημιουργία 3D μοντέλου κατοικίας .....	51
5.2.3 Σενάρια τοποθέτησης και ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων στην κατοικία.....	52
5.2.1 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	52
5.2.2 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	52
5.2.3 3 <sup>ο</sup> σενάριο .....	52
5.3.3 Σχολιασμός των ενεργειακών και οικονομοτεχνικών αποτελεσμάτων των τριών σεναρίων.....	71
5.3.4 Επιπλέον σενάρια .....	74
6. Ανάπτυξη και χρήση υπολογιστικού εργαλείου ενεργειακής ανάλυσης .....	80
6.1 Ανάλυση ενεργειακής ισορροπίας .....	80
6.2 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας.....	82
6.2.1 Εισαγωγή δεδομένων .....	82
6.2.2 Τρόπος υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας .....	83
6.3 Εισαγωγή παραγωγής ενέργειας .....	84
6.3.1 Εισαγωγή δεδομένων .....	84
6.4 Υπολογισμοί.....	85
6.4.1 Εισαγωγή.....	85
6.4.2 Ενδεικτικό Υπολογιστικό Παράδειγμα .....	88
6.5 Χρήση της εφαρμογής στη μελέτη περίπτωσης.....	90
7. Συμπεράσματα .....	94
7.1 Βασικά συμπεράσματα.....	94
7.2 Επιστημονική συμβολή .....	96
7.3 Περιορισμοί της έρευνας.....	96
7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	96
Βιβλιογραφία.....	97



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Φωτοβολταϊκά συστήματα στη στέγη .....	16
Εικόνα 2 Φωτοβολταϊκά συστήματα στην πρόσοψη .....	17
Εικόνα 3 Φωτοβολταϊκά συστήματα στα συστήματα σκίασης.....	17
Εικόνα 4 Φωτοβολταϊκά συστήματα στις διαφανείς επιφάνειες .....	18
Εικόνα 5 Φωτοβολταϊκά συστήματα σε parking .....	18
Εικόνα 6 Μερική σκίαση από δέντρα .....	19
Εικόνα 7 Φωτοβολταϊκά πλαίσια με αντιστατική επίδραση .....	21
Εικόνα 8 Φωτοβολταϊκά σε καμπύλη επιφάνεια .....	23
Εικόνα 9 Εύκαμπτα φωτοβολταϊκά .....	26
Εικόνα 10 Ανάπτυξη και τάση της τεχνολογίας bPV.....	27
Εικόνα 11 Τυπικός Φωτοβολταϊκός/Θερμικός συλλέκτης (PV/T) .....	29
Εικόνα 12 Mendeley.....	37
Εικόνα 13 VOSviewer .....	38
Εικόνα 14 Ερευνητικά πεδία .....	38
Εικόνα 15 Συγγραφείς .....	39
Εικόνα 16 Flow chart.....	43
Εικόνα 17 SWOT ανάλυση .....	44
Εικόνα 18 Τοποθεσία κτιρίου .....	47
Εικόνα 19 Κάτοψη κατοικίας .....	48
Εικόνα 20 3D μοντέλο κατοικίας .....	51
Εικόνα 21 Προσδιορισμός τοποθεσίας για την εισαγωγή κλιματικών δεδομένων .....	52
Εικόνα 22 Καρτέλα Building and Environment .....	53
Εικόνα 23 Καρτέλα 3D Irradiation.....	54
Εικόνα 24 Καρτέλα Solar Layouts.....	56
Εικόνα 25 Soltech STH -230Wp.....	57
Εικόνα 26 Καρτέλα Inverters.....	58
Εικόνα 27 Fronius International GmbH-SUNRISE MAXI.....	59
Εικόνα 28 Καρτέλα για τα αποτελέσματα των φωτοβολταϊκών πάνελ .....	60
Εικόνα 29 Καρτέλα για τα αποτελέσματα των inverters.....	60
Εικόνα 30 Ενεργειακά αποτελέσματα για φωτοβολταϊκά πάνελ 1ο σενάριο .....	61
Εικόνα 31 Ενεργειακά αποτελέσματα του inverter 1ο σενάριο.....	62
Εικόνα 32 Καρτέλα οικονομοτεχνικής ανάλυσης .....	62
Εικόνα 33 Φωτοβολταϊκά σε πρόσοψη και κουφώματα .....	65
Εικόνα 34 BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono_si .....	65
Εικόνα 35 FLIMSOL-X1a Custom .....	66
Εικόνα 36 AEG Power Solutions GmbH-Protect PV .....	66
Εικόνα 37 Phillips Lighting B.V.-EVO 300 .....	67
Εικόνα 38 Ενεργειακά αποτελέσματα για φωτοβολταϊκά πάνελ 2ο σενάριο .....	67
Εικόνα 39 Ενεργειακά αποτελέσματα των inverters 2ο σενάριο.....	67
Εικόνα 40 Φωτοβολταϊκά σε δώμα, σε πρόσοψη και κουφώματα .....	69
Εικόνα 41 Ενεργειακά αποτελέσματα για φωτοβολταϊκά πάνελ 3ο σενάριο .....	70
Εικόνα 42 Ενεργειακά αποτελέσματα των inverters 3ο σενάριο.....	70
Εικόνα 43 1ο επιπλέον σενάριο.....	74
Εικόνα 44 2ο επιπλέον σενάριο.....	75
Εικόνα 45 3ο επιπλέον σενάριο.....	76

Εικόνα 46 Οπτικό περιβάλλον της εφαρμογής «Ενεργειακή Ανάλυση» .....	80
Εικόνα 47 Υπολογιζόμενοι δείκτες από το εργαλείο .....	81
Εικόνα 48 Απόσπασμα από το παραγόμενο αρχείο .csv.....	82
Εικόνα 49 Εισαγωγή κατανάλωσης ενέργειας.....	82
Εικόνα 50 Πίνακας εισαγωγής συντελεστών .....	83
Εικόνα 51 Εισαγωγή περιόδου ενεργειακής ανάλυσης .....	83
Εικόνα 52 Κουμπί «Υπολογισμός Κατανάλωσης» .....	83
Εικόνα 53 Κουμπί «Εισαγωγή Παραγωγής» .....	84
Εικόνα 54 Αρχείο csv εισαγωγής στην εφαρμογή .....	85
Εικόνα 55 Κοινά δεδομένα .....	90

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Παραδείγματα θερμικής αγωγιμότητας υλικών .....	24
Πίνακας 2 Accurate υπολογισμοί .....	55
Πίνακας 3 Τιμές παραδείγματος .....	88
Πίνακας 4 Αποτελέσματα σεναρίων .....	95

## Εισαγωγή

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών δεν είναι καινούρια, αναπτύχθηκε ήδη από τη δεκαετία του '50 όταν ομάδες επιστημόνων πέτυχαν τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική (Τσαλίδης, 1985). Οι άνθρωποι δηλαδή αναζητούν εδώ και δεκαετίες, τρόπους απεξάρτησης από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, οι οποίες είναι αφενός πεπερασμένες και αφετέρου επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον. Η κατανάλωση ενέργειας από κτίρια ανέρχεται περίπου στο 30% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο (Yu, Yang, Yan & Ansah, 2021). Λαμβάνοντας αυτά υπόψη, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σ' ένα κτίριο αναδεικνύεται ως μια πιθανή λύση. Πόσο μπορεί όμως αυτή η λύση να βελτιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας ενός κτιρίου και κατά συνέπεια τη μείωση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος;

Μέσα από τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε για την παρούσα διπλωματική προκύπτει, ότι αρκετές έρευνες συγκλίνουν στο ότι η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια αποτελεί βιώσιμη λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, ορισμένες έρευνες αναδεικνύουν παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας όπως, η γεωγραφική θέση των κτιρίων, η θέση τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτίρια, ο προσανατολισμός τους και οι πιθανές σκιάσεις .

Ωστόσο, υπάρχουν και ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης όπως, το ποσοστό κάλυψης της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, όταν συνδυαστούν όλοι οι τρόποι ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών στα κτίρια. Ένα επιπλέον ζήτημα αφορά τις προτάσεις αναβάθμισης των πηγών ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων με τη βοήθεια της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει το κατά πόσο η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε υπάρχον κτίριο μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή του απόδοση και να μειώσει το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα. Αυτό πραγματοποιείται μέσω μιας μελέτης περίπτωσης όπου αξιολογείται η ενεργειακή απόδοση, εντοπίζονται περιοχές που επιδέχονται ενεργειακή αναβάθμιση και προτείνονται λύσεις μέσω της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, με στόχο την βελτιστοποίηση της κατανάλωσης και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος .

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται και αναφέρεται αναλυτικότερα στο τέταρτο κεφάλαιο βασίζεται στο υπολογιστικό μοντέλο. Αρχικά, πραγματοποιείται ανάλυση της υφιστάμενης κατανάλωσης του κτιρίου. Στη συνέχεια, εξετάζεται η παραγωγή

από φωτοβολταϊκά συστημάτων και τέλος πραγματοποιείται ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου και υπολογισμός δεικτών απόδοσης (KPIs) μέσω της ανάπτυξης ενός εξειδικευμένου υπολογιστικού εργαλείου. Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα αφορούν, την αξιολόγηση της απόδοσης των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτίρια, τη δυνατότητα μετατροπής των κτιρίων σε κτίρια μηδενικής κατανάλωσης μέσω της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών και τη συμβολή των φωτοβολταϊκών συστημάτων στη μείωση επιβλαβών αερίων για το περιβάλλον.

Η συνεισφορά της διπλωματικής, έγκειται στο να προσφέρει πολύτιμες ερευνητικές εισηγήσεις για την πρακτική εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων σε υφιστάμενα κτίρια, συμβάλλοντας έτσι στην προώθηση βιώσιμων κτιριακών και ενεργειακών πρακτικών.

Στα κεφάλαια της βιβλιογραφικής επισκόπησης παρουσιάζονται συνοπτικά τα παρακάτω:

Το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρεται αρχικά στις βασικές αρχές των φωτοβολταϊκών. Έπειτα στους τρόπους ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων τόσο στην οροφή των κτιρίων όσο και στα κελύφη αυτών. Στη συνέχεια εξετάζεται πώς οι σκιάσεις, που μπορεί να εμφανιστούν, επηρεάζουν την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών. Έπειτα, παρουσιάζονται νέες τεχνολογίες και καινοτόμα υλικά που αφορούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα και την ενσωμάτωση τους στα κτίρια. Το κεφάλαιο κλείνει με την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης που αφορά τη μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με τη μικρότερη επιρροή στην αισθητική των κτιρίων.

Το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρεται αρχικά στις τεχνικές εκείνες που σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων συμβάλλει στην προσπάθεια επίτευξης κτιρίων μηδενικής κατανάλωσης (nZEB). Στη συνέχεια, παρουσιάζει το πώς η ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών/Θερμικών συστημάτων συμβάλλει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Έπειτα, γίνεται αναφορά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που επιτυγχάνεται με τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στα οικονομικά οφέλη, στις προκλήσεις και στις προοπτικές που υπάρχουν και αφορούν την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτίρια.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές βάσεις και οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της βιβλιογραφίας, τα κριτήρια επιλογής των βιβλιογραφικών αυτών πηγών και γίνεται αναφορά στον τρόπο οργάνωσης των

βιβλιογραφικών αυτών πηγών, καθώς και παρουσίαση αποτελεσμάτων προηγούμενων μελετών που αφορούν την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια.

Στο 4<sup>ο</sup> και τελευταίο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης, αρχικά παρουσιάζονται τα ερευνητικά ερωτήματα που καλείται να απαντήσει η διπλωματική εργασία και πώς αυτά προέκυψαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται για την απάντηση αυτών των ερευνητικών ερωτημάτων και ένα flow chart διάγραμμα με τα βασικά βήματα αυτής της προσέγγισης. Στο τελευταίο μέρος αυτού του κεφαλαίου πραγματοποιείται μια SWOT ανάλυση που αφορά στη μεθοδολογική προσέγγιση και μέσα από την ανάλυση αυτή πραγματοποιείται η εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων.

# **1. Τρόποι ενσωμάτωσης-Υλικά και νέες τεχνολογίες**

## **1.1 Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στις οροφές και στο κέλυφος των κτιρίων**

### **1.1.1 Βασικές αρχές**

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα για να μπορέσουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια στηρίζονται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Σύμφωνα με τον Φραγκιαδάκη, (2004), φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι όταν μια διάταξη υλικών (τα υλικά αυτά είναι συνήθως ημιαγωγοί π.χ. πυρίτιο) που βρίσκονται σε επαφή μπορούν να μετατρέψουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η διάταξη αυτή ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο ή φωτοβολταϊκή κυψέλη.

Η σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά που τοποθετούνται σε διάφανο υλικό υψηλής διαφάνειας προσαρμοσμένη σε μεταλλικό πλαίσιο, με το πίσω μέρος καλυπτόμενο για προστασία από την υγρασία αποτελούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και η σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων είτε σε σειρά, είτε παράλληλα ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία (Φραγκιαδάκης, 2004).

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εκτός από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή συστοιχίες, μπορεί να περιέχει ορισμένες συσκευές όπως, μετατροπείς για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγουν τα πλαίσια σε εναλλασσόμενο, μπορεί να περιέχει επίσης ρυθμιστές φόρτισης και μπαταρίες για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας (Φραγκιαδάκης, 2004).

Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου προκύπτει από την διαίρεση της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου (Φραγκιαδάκης, 2004). Οι σημερινές αποδόσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων κυμαίνονται γύρω στο 20%, αυτό όμως πρόκειται να αυξηθεί όσο εξελίσσεται η τεχνολογία.

### **1.1.2 Ενσωμάτωση στην οροφή**

Αν και τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον για ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας μία τεχνολογία των οποίων είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζεται αυξημένο, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια ξεκινάει αρκετές δεκαετίες πριν. Σύμφωνα με τους Shukla, Sudhakar και Baredar (2016), η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτίρια ξεκίνησε από τη δεκαετία του '70 για κτίρια σε απομακρυσμένες περιοχές που δεν είχαν πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, τη

δεκαετία του '80 άρχισαν να εγκαθίστανται τα πρώτα φωτοβολταϊκά στις οροφές και τη δεκαετία του '90 ξεκίνησε η εμπορική διάθεση για τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά κτιρίων [Building-Integrated-Photovoltaics (BIPV)].

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να τοποθετηθούν με διάφορους τρόπους στην οροφή ενός κτιρίου, αλλά και να ενσωματωθούν στο κέλυφός του. Η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων στις στέγες των κτιρίων (Εικόνα 1), αποτελεί και την πλειοψηφία της τωρινής εγκατεστημένης ισχύος (Tian & Ooka, 2024). Οι Li, Zhang, Edwards και Hosseini (2020), αναφέρουν πέντε τυπικούς σχεδιασμούς οροφής πάνω στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά συστήματα, την επίπεδη ή δώμα, την στέγη με μία κλίση, την αμφικλινής στέγη (δύο κλίσεις), την στέγη με τέσσερις κλίσεις και την στέγη πεταλούδα. Από αυτές, η στέγη με τη μία κλίση να παρουσιάζεται αυτή με τη μεγαλύτερη δυναμική για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνει είτε με την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων που αποτελούν μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος στην επιφάνεια της στέγης ή του δώματος που είναι σχετικά εύκολη διαδικασία, είτε με την ενσωμάτωση στην κατασκευή του δώματος ή της στέγης αντικαθιστώντας παραδοσιακά υλικά κατασκευής (Shukla κ.α., 2016· Attoye Tabet, Aoul & Hassan, 2017· Kuhn, 2021).



**Εικόνα 1 Φωτοβολταϊκά συστήματα στη στέγη**

(Πηγή: [https://www.freepik.com/free-photo/aerial-view-private-house-with-solar-panels-roof\\_10292215.htm#fromView=search&page=1&position=1&uuid=a4a155a1-ab1e-4829-828b-82375a7fb0f3](https://www.freepik.com/free-photo/aerial-view-private-house-with-solar-panels-roof_10292215.htm#fromView=search&page=1&position=1&uuid=a4a155a1-ab1e-4829-828b-82375a7fb0f3))

### **1.1.3 Ενσωμάτωση στην πρόσοψη**

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων στο κέλυφος του κτιρίου, μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Η τοποθέτησή τους στην πρόσοψη του κτιρίου αποτελεί δημοφιλή πρακτική. Στην Εικόνα 2, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ενσωματώνονται



στην εξωτερική πλευρά του κτιρίου επιτρέποντας έτσι τη συλλογή ηλιακής ενέργειας (Shukla κ.α., 2016· Attoye κ.α., 2017· Yu κ.α., 2021). Επιπλέον, με την ύπαρξη κενού αέρος πίσω από τα πάνελ, διευκολύνεται η ψύξη τους που οδηγεί σε αύξηση της απόδοσής τους (Yu κ.α., 2021).



**Εικόνα 2 Φωτοβολταϊκά συστήματα στην πρόσοψη**  
(Πηγή: <https://www.peakpx.com/399650/gray-and-yellow-concrete-building>)

#### **1.1.4 Ενσωμάτωση στα συστήματα σκίασης**

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε συστήματα σκίασης αποτελεί έναν επιπλέον τρόπο ενσωμάτωσης στο κέλυφος του κτιρίου (Εικόνα 3). Ο τρόπος αυτός πέρα από την παραγωγή ενέργειας προσφέρει και σκίαση, περιορίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτίριο, μειώνοντας τα ηλιακά κέρδη και κατά συνέπεια τα φορτία ψύξης (Shukla κ.α., 2016· Attoye κ.α., 2017· Yu κ.α., 2021· Kirimtat, Tasgetiren, Brida & Krejcar, 2022).



**Εικόνα 3 Φωτοβολταϊκά συστήματα στα συστήματα σκίασης**  
(Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/25802865@N08/4794370861>)

### 1.1.5 Ενσωμάτωση σε διαφανείς επιφάνειες

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διαφανείς επιφάνειες όπως τα παράθυρα, υαλοπετάσματα, είναι ένας καινοτόμος τρόπος που επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας, αφήνοντας παράλληλα το φυσικό φως να εισέλθει στο εσωτερικό του κτιρίου (Εικόνα 4). Η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με αυτόν τον τρόπο, δηλαδή ως στοιχεία τόσο για παραγωγή ενέργειας αλλά και ως αισθητικά στοιχεία, φαίνεται να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εμπορικά κτίρια και κτίρια γραφείων (Shukla κ.α., 2016· Attoye κ.α., 2017· Kuhn, 2021· Yu κ.α., 2021).



Εικόνα 4 Φωτοβολταϊκά συστήματα στις διαφανείς επιφάνειες  
(Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BAPV\\_solar-facade.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BAPV_solar-facade.JPG))

### 1.1.6 Προσαρμοσμένη ενσωμάτωση

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν επίσης να προσαρμοστούν στις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις ενός κτιρίου. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους όπως π.χ. την ειδική σχεδίαση των ηλιακών συλλεκτών ή την επιλογή των κατάλληλων υλικών (Kuhn, 2021· Tian & Ooka, 2024). Η χρήση ειδικών κατασκευών π.χ. διπλό κέλυφος ή πέργκολας για χώρους στάθμευσης (Εικόνα 5) μπορεί επίσης να αποτελεί λύση για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων (Attoye κ.α., 2017').



Εικόνα 5 Φωτοβολταϊκά συστήματα σε parking  
(Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/nrel/35306806326/in/photostream/>)

## 1.2 Σκιάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων

Οι σκιάσεις προκαλούν μείωση της παραγωγής των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς εμποδίζουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Σε τι ποσοστό όμως η σκίαση επηρεάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας; Η συντριπτική πλειοψηφία των βιβλιογραφικών πηγών που αναφέρονται σε αυτή τη διπλωματική εργασία συμφωνεί ότι οι σκιάσεις μπορεί να μειώσουν σημαντικά την παραγωγή. Οι Li κ.α. (2020), αναφέρουν ότι οι σκιάσεις από τα γύρω εμπόδια μπορεί να μειώσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως και 24%. Αντίθετα, οι Li και Han (2022), θεωρούν ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή που προκαλεί την μεγαλύτερη διακύμανση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα εγκατεστημένα στην οροφή του κτιρίου, με τις σκιάσεις από τα γύρω κτίρια να έχουν συνολικά μικρή επίδραση. Σε σύγκριση με τις στέγες, οι προσόψεις σκιάζονται πολύ πιο εύκολα από τα περιφερειακά κτίρια (Yu κ.α. 2021).

Οι σκιάσεις που μπορεί να εμφανιστούν στην επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών του κτιρίου μπορεί να είναι ολικές (να σκιάζουν δηλ. όλη την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων ή συστοιχιών), μερικές (να σκιάζουν ένα τμήμα των φωτοβολταϊκών πλαισίων ή συστοιχιών) και να προέρχονται είτε από εμπόδια (κυρίως από γειτονικά κτίρια, δέντρα (Εικόνα 6) κ.τ.λ.) είτε όμως και από τα σύννεφα. (Li κ.α., 2020· Sailor, Anand & King, 2021· Satpathy, Babu, Shanmugam, Popavath & Alhelou, 2021).



Εικόνα 6 Μερική σκίαση από δέντρα

(Πηγή: <https://www.rawpixel.com/image/3322377/free-photo-image-solar-panels-energy>)

Υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα σκίασης, η τοποθεσία (περιοχή με συχνή συννεφιά) είναι ένας, το ύψος των κτιρίων είναι ένας επιπλέον (πρόβλημα στα χαμηλά κτίρια), ένας άλλος είναι η πυκνότητα δόμησης της περιοχής (πυκνότερη δόμηση, περισσότερη πιθανότητα σκίασης), η διαμόρφωση του περιβάλλοντα χώρου και η παρουσία φυσικών στοιχείων (π.χ. δέντρα), είναι επίσης παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα σκίασης (Li & Han, 2022· Tian & Ooka, 2024).

Η σωστή τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών όσο το δυνατόν σε σημεία που δεν υπάρχουν εμπόδια που προκαλούν σκιάσεις καθώς και ο σωστός προσανατολισμός, είναι παράγοντες που βοηθούν στην ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας (Li κ.α., 2020· Sailor κ.α., 2021· Yu κ.α., 2021).

Επιπλέον, υπάρχουν τεχνολογικές λύσεις για την αυτόματη προσαρμογή της κλίσης ή του προσανατολισμού των πλαισίων, με στόχο την αποφυγή σκιάσεων (Sailor κ.α., 2021). Ο τρόπος σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων παίζει επίσης ρόλο για την ελαχιστοποίηση των απωλειών σε συνθήκες μερικής σκίασης (Satpathy κ.α., 2021).

### **1.3 Τεχνολογίες-προϊόντα, υλικά και αισθητική φωτοβολταϊκών συστημάτων**

#### **1.3.1 Τεχνολογίες**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εκτός του ότι χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν στις οροφές των κτιρίων και στις προσόψεις τους, μπορούν επίσης να ενσωματωθούν και απευθείας στα δομικά στοιχεία ενός κτιρίου (Shukla κ.α., 2016· Biyik κ.α., 2017· Kuhn κ.α., 2021· Sailor κ.α., 2021).

Τα BIPVs προϊόντα αλουμινίου είναι ένα παράδειγμα. Λόγω του ότι είναι ελαφριά και εύκαμπτα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου υπάρχει περιορισμός για το βάρος (Shukla κ.α., 2016). Φωτοβολταϊκές κυψέλες μπορούν να ενσωματωθούν στα παράθυρα και σε άλλα διαφανή και ημιδιαφανή δομικά στοιχεία του κτιρίου, σε ποικιλία χρωμάτων, διαφανειών και ημιδιαφανειών. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των παραθύρων επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός και την προστασία από τη βροχή ενώ ταυτόχρονα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, με το επίπεδο διαφάνειας να κυμαίνεται από 16% έως 41% (Shukla κ.α., 2016).

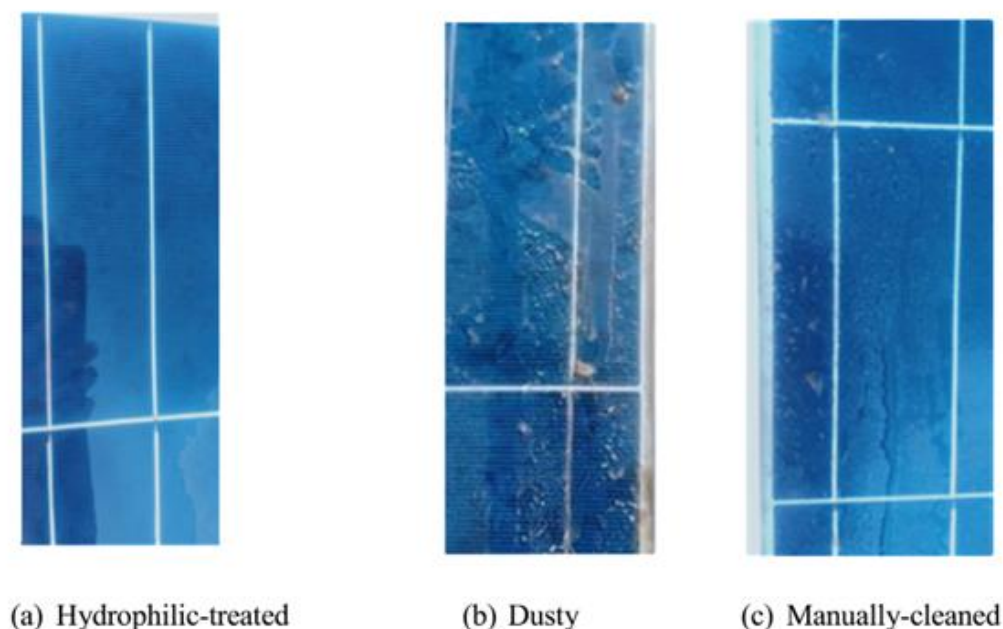
Στη στέγη του κτιρίου, τα φωτοβολταϊκά πλακίδια μπορούν να αντικαταστήσουν το σύνολο των κλασικών κεραμιδιών ή μέρος αυτών. Το σχήμα και ο τύπος της φωτοβολταϊκής κυψέλης στα πλακίδια αυτά ποικίλλει. Επίσης, φωτοβολταϊκά πλαίσια τα



οποία κατασκευάζονται για προστασία και από τα καιρικά φαινόμενα μπορούν να αντικαταστήσουν ορισμένους τύπους στέγης (Shukla κ.α., 2016).

Η τεχνολογία των νανοϋλικών υπόσχεται βελτιώσεις στην αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών, η ενσωμάτωση νανοϋλικών μπορεί να συμβάλλει στη διατήρηση της ηλεκτρικής ακεραιότητας ακόμη και όταν εμφανίζονται ρωγμές στις φωτοβολταϊκές κυψέλες (Wilson κ.α., 2020). Τα υδροφιλικά νανοϋλικά χρησιμοποιούνται για την επίστρωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, αυτά τα υλικά βοηθούν στη μείωση της επίδρασης της σκόνης και άλλων ρύπων στην επιφάνεια των πλαισίων, επιτρέποντας την καλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια, την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας έως και 18% σε σχέση με ένα πλαίσιο που έχει καθαριστεί χειροκίνητα. (Elnozahy, Abd-Elbary & Abo-Elyousr, 2024). Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται οι επιφάνειες των πλαισίων μετά τον καθαρισμό με ελεύθερη ροή νερού, το (α) είναι με την υδροφιλική επίστρωση, το (b) σκονισμένο και το (c) χειροκίνητα καθαρισμένο.

Επίσης, υπάρχει η τεχνολογία των PV/T (φωτοβολταϊκών/Θερμικών), η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών διπλής όψης (bifacial) και η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων (thin films) οι οποίες αναφέρονται στο δεύτερο κεφάλαιο.



**Εικόνα 7 Φωτοβολταϊκά πλαίσια με αντιστατική επίδραση**

(Πηγή: Elnozahy, A., Abd-Elbary, H., & Abo-Elyousr, F. K. (2024). Efficient energy harvesting from PV Panel with reinforced hydrophilic nano-materials for eco-buildings. *Energy and Built Environment*, 5(3), 393-403.)

### 1.3.2 Υλικά

Το πυρίτιο είναι το υλικό που δείχνει να κυριαρχεί στις μέρες μας για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών (Shukla κ.α., 2016· Biyik κ.α., 2017· Wilson κ.α., 2020· Kuhn κ.α., 2021· Sailor κ.α., 2021· Zhong κ.α., 2023· Kapsalis κ.α., 2024). Οι Sailor κ.α. (2021) μάλιστα χωρίζουν τα υλικά σε δύο υποκατηγορίες σε αυτά με βάση το πυρίτιο και σε αυτά που δεν έχουν βάση το πυρίτιο.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με βάση το πυρίτιο μπορεί να είναι μονοκρυσταλλικά (αποτελείται από ένα κρύσταλλο πυριτίου), ή πολυκρυσταλλικά (αποτελείται από περισσότερους κρυστάλλους), ή από άμορφο πυρίτιο. Ο βαθμός απόδοσης που παρέχουν είναι καλός και κυμαίνεται γύρω στο 20% (Wilson κ.α., 2020· Kuhn κ.α., 2021· Kapsalis κ.α., 2024). Το άμορφο πυρίτιο είναι υλικό κατασκευής και των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων (thin films), που χαρακτηρίζονται από ευκαμψία (Shukla κ.α., 2016).

Για προηγμένες φωτοβολταϊκές εφαρμογές επίγειες και διαστημικές έχουν αναπτυχθεί φωτοβολταϊκές κυψέλες από τις ομάδες III και V του περιοδικού πίνακα που περιέχουν σπάνια και ακριβά υλικά, ο βαθμός απόδοσής τους είναι ο μεγαλύτερος με 29,1% (Kuhn κ.α., 2021).

Τα δισελενίδια ινδίου χαλκού και γαλλίου φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου (CIGS), αντιπροσωπεύουν τη δεύτερη πιο σχετική τεχνολογία. Ο βαθμός απόδοσης των κυψελών αυτών κυμαίνεται επί του παρόντος στο 22–23% έχοντας αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, η αποδοτικότητα και οι τιμές ευνοούν την τεχνολογία c-Si, λόγω της πολύ υψηλότερης διείσδυσης στην αγορά (Kuhn κ.α., 2021).

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV), έχουν ταχεία ανάπτυξη, ο βαθμός απόδοσής τους επί του παρόντος είναι χαμηλός και το κόστος λίγο υψηλό λόγω του ότι δεν υπάρχουν πολλοί κατασκευαστές, επίσης μπορούν να καμφθούν πολύ και πολλές φορές χωρίς σημαντικά προβλήματα και έχουν χαμηλή εξάρτηση από την ακτινοβολία και την θερμοκρασία σε σχέση με τα άλλα υλικά (Kuhn κ.α., 2021).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με βάση τον περοβσκήτη είναι μια επερχόμενη νέα τεχνολογία που βρίσκεται ακόμα σε στάδιο ερευνητικό. Έχουν παρατηρηθεί αποδόσεις μεγαλύτερες από τις προηγούμενες τεχνολογίες και οι δυνατότητες για μείωση του κόστους είναι ελπιδοφόρες. Ωστόσο, μελετάται και ο συνδυασμός περοβσκήτη με πυρίτιο με τις δοκιμές να έχουν δείξει απόδοση 28%, με τη σταθερότητα όμως στην απόδοση να είναι

χαμηλότερη λόγω του περοβσκήτη και την εξάρτηση από την θερμοκρασία και την ακτινοβολία να είναι παρόμοια με αυτή των πυριτίων (Kuhn κ.α., 2021).

### 1.3.1 Αισθητική

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εναρμονίζονται με την αισθητική των κτιρίων. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω του ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να ενσωματωθούν με πολλούς τρόπους στο κτίριο καθώς προσφέρονται σε ποικιλίες χρωμάτων, μεγεθών και σχημάτων (Attoye κ.α., 2017). Για παράδειγμα, η Εικόνα 8 δείχνει πώς οι καμπύλες επιφάνειες μπορούν να ενσωματώσουν φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου (Kuhn κ.α., 2021). Το στοίχημα της ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών όσον αφορά την αισθητική συνοψίζεται στο ότι πρέπει να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή παραγωγή ενέργειας, χωρίς όμως να υπάρχει σημαντική επιβάρυνση στην αισθητική του κτιρίου.



Εικόνα 8 Φωτοβολταϊκά σε καμπύλη επιφάνεια

(Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PV\\_external\\_shading\\_device\\_in\\_zero\\_energy\\_building\\_of\\_Singapore.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PV_external_shading_device_in_zero_energy_building_of_Singapore.jpg))

## 2. Συνεισφορά Φ/Β συστημάτων στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος

### 2.1 Κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης

Τα κτίρια αντιπροσωπεύουν το 30-40% του συνόλου της καταναλισκόμενης ενέργειας, με την υφιστάμενη κατάσταση των κτιρίων να χαρακτηρίζεται από κακή μόνωση, ενεργειακή ανεπάρκεια και ξεπερασμένες τεχνολογίες (Kapsalis κ.α., 2024). Ως εκ τούτου η ανάγκη για δημιουργία κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης (NZEBs) είναι επιτακτική.

#### 2.1.1 Τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας

Για να μπορέσει να επιτευχθεί ο στόχος των κτιρίων NZEBs, αρχικά θα πρέπει να εξεταστούν τρόποι για την εξοικονόμηση ενέργειας. Θα πρέπει δηλαδή να εντοπιστούν εκείνες οι περιοχές του κτιρίου που θα πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες βελτιώσεις ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Η κατάλληλη μόνωση του κτιρίου αποτελεί προϋπόθεση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Ειδικότερα στο μεσογειακό κλίμα προτείνεται ο συνδυασμός μόνωσης και παθητικών μεθόδων ψύξης ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική εξοικονόμηση ενέργειας (Faranda, Fumagalli & Oliva, 2023· Kapsalis κ.α., 2024). Η μόνωση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμβατικά μονωτικά υλικά όπως είναι ο ορυκτοβάμβακας ή ο φελλός, μπορεί επίσης να είναι υπερσύγχρονη μόνωση με υλικά όπως τα πάνελ μόνωσης κενού και οι φυσικοί μονωτήρες που προέρχονται από αγροτικά και δασικά υπολείμματα (Faranda κ.α., 2023). Τα υλικά για μόνωση χαρακτηρίζονται από τη θερμική αγωγιμότητά τους, όσο πιο χαμηλή είναι τόσο καλύτερος μονωτής είναι, στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η θερμική αγωγιμότητα ορισμένων υλικών

Πίνακας 1 Παραδείγματα θερμικής αγωγιμότητας υλικών

Material	Thermal Conductivity [W/mK]
Mineral Wool	0.030–0.040
Polystyrene	0.030–0.080
Cellulose	0.040–0.050
Cork	0.040–0.050
Aerogel	0.017–0.040
Vacuum Insulation Panels	As low as 0.004
Nature and Textile Waste	0.030–0.205
Leather and Other Waste	0.030–0.100

(Πηγή: Faranda, R. S., Fumagalli, K., & Oliva, F. (2023). Tips for Buildings Energy Saving: Results of Some Research. *Energies*, 16(3), 1284.)



Ένας επιπλέον τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας αφορά στο φωτισμό. Σύμφωνα με τους Faranda κ.α. (2023), η εκτιμώμενη μέση κατανάλωση για φωτισμό για μια «τυπική οικογένεια» τεσσάρων ατόμων κυμαίνεται 8 με 10% της συνολικής τους κατανάλωσης ενέργειας. Η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων του φυσικού φωτισμού θα μπορούσε να αποκλείσει την χρήση τεχνικού φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας εξοικονομώντας έτσι ενέργεια ενώ ταυτόχρονα το φως του ήλιου, λόγω του ότι είναι πιο ευχάριστο από το τεχνικό, παρέχει συνθήκες που ευνοούν την ευημερία και την αυξημένη απόδοση στην εργασία (Faranda κ.α., 2023). Επίσης, η αντικατάσταση των λαμπτήρων πυρακτώσεως και φθορίου με λαμπτήρες τύπου LED μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια, για παράδειγμα, στη χώρα της Φινλανδίας, η εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί έως το έτος 2050 αντικαθιστώντας τους παραδοσιακούς λαμπτήρες με λαμπτήρες LED ανέρχεται στο 70% (Faranda κ.α., 2023).

Οι αυτοματισμοί που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα κτίριο ώστε να ελέγχονται οι ηλεκτρικές συσκευές του, μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα παρακολουθεί με αισθητήρες συνεχώς το περιβάλλον ρυθμίζοντας κατάλληλα τη θερμοκρασία, ή με αισθητήρες κίνησης για τον έλεγχο του φωτισμού (Faranda κ.α., 2023).

### **2.1.2 Φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων (thin films) και διπλής όψης (bifacial)**

Τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων (thin films), κατασκευάζονται συνήθως από λεπτό στρώμα πυριτίου πάχους 1μm που εναποτίθεται σε ένα υπόστρωμα, όπως γυαλί ή μέταλλο, ή υπό ειδικές συνθήκες (πολύ χαμηλή θερμοκρασία) σε πλαστικό, ωστόσο για καλύτερη απορρόφηση του ηλιακού φωτός, οι βιομηχανίες εναποθέτουν έως και τρεις στρώσεις Shukla κ.α., (2016). Η κατασκευή thin films από τελλουριούχο κάδμιο είναι γρήγορη παρέχοντας μια εναλλακτική λύση χαμηλότερου κόστους σε σχέση με το πυρίτιο. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου που κατασκευάζονται από δισελενιδίου χαλκού, ινδίου, γαλλίου έχουν την υψηλότερη παραγωγή ενέργειας από οποιαδήποτε φωτοβολταϊκή ηλιακή τεχνολογία λεπτού υμενίου. Shukla κ.α., (2016). Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες τρίτης γενιάς έχουν στόχο την επίτευξη συσκευών υψηλής απόδοσης, αλλά προς το παρόν χρησιμοποιούν μεθόδους εναπόθεσης λεπτού υμενίου δεύτερης γενιάς Shukla κ.α., (2016).

Τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τα μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, ωστόσο είναι ελαφριά και εύκαμπτα. Εικόνα 9, κάτι που είναι εξαιρετικά βοηθητικό για την ενσωμάτωση-τοποθέτησή τους σε δομικά υλικά και ιδιαίτερα σε καμπύλες επιφάνειες Shukla κ.α., (2016).



**Εικόνα 9 Εύκαμπτα φωτοβολταϊκά**

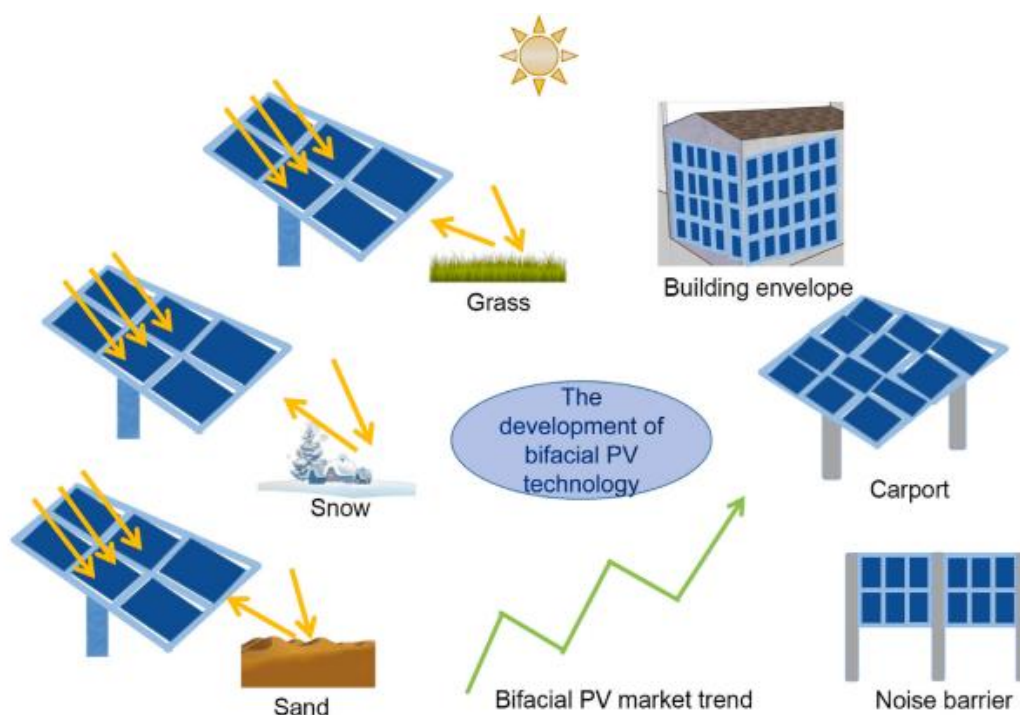
(Πηγή: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cigsep.jpg>)

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών διπλής όψης (bPV) παρόλο που έχει εισαχθεί εμπορικά για περισσότερες από τρεις δεκαετίες, τα τελευταία χρόνια έχει κάνει μια αξιοσημείωτη επιστροφή (Wilson, κ.α., 2020· Zhong κ.α., 2023), αυτό συμβαίνει διότι μεταξύ άλλων έχει επέλθει περιορισμός στην ανάπτυξη τεχνολογιών όπως τα φωτοβολταϊκά μονής όψης (mPV), τα συγκεντρωτικά (CPV) και τα Φωτοβολταϊκά/Θερμικά, με τους τρεις κύριους λόγους για τον περιορισμό της ανάπτυξης αυτής να είναι η χαμηλή απόδοση, αυξημένες απαιτήσεις χώρου και υψηλό κόστος (Zhong κ.α., 2023). Η διαφορά των bPV σε σχέση με τα mPV βρίσκεται στο ότι τα bPV μπορούν να απορροφήσουν ηλιακή ακτινοβολία και από την μπροστινή πλευρά και από την πίσω πλευρά τους, αυξάνοντας έτσι την παραγωγή ενέργειας που μπορεί να φτάσει στο 50% σε σχέση με τα mPV (Zhong κ.α., 2023).

Η απόδοση της πίσω πλευράς των bPV εξαρτάται από παράγοντες όπως ο βαθμός αντανάκλαστικότητας του εδάφους, η σκίαση του πίσω μέρους, η απόσταση μεταξύ των σειρών, η βρομιά κ.τ.λ., όσο μεγαλύτερη είναι η αντανάκλαστικότητα του εδάφους τόσο αυξάνεται και η παραγωγή ενέργειας (Zhong κ.α., 2023). Τα bPV παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως ότι παράγουν και από τις δύο πλευρές ενέργεια, η πίσω πλευρά μπορεί να λάβει ενέργεια από την αντανάκλαση πάνω στο χιόνι αποκτώντας ισχύ και θερμότητα που επιταχύνει την τήξη του χιονιού, ευέλικτη εγκατάσταση. Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα όπως το ότι η πιθανή σκίαση της πίσω πλευράς μειώνει σημαντικά όχι μόνο την παραγωγή της πίσω πλευράς αλλά της συνολικής παραγωγής (Zhong κ.α., 2023).

Τα bPV φωτοβολταϊκά μπορούν να εφαρμοστούν στις προσόψεις κτιρίων, όπως τοίχος Trombe με bPV, ενσωμάτωση σε διαφανείς επιφάνειες, τοποθέτηση στην οροφή, ενσωμάτωση σε φράχτη κ.τ.λ. Με αυτόν τον τρόπο, εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα κτίρια, τα bPV μπορούν να παρέχουν και θερμομόνωση για τη μείωση της

κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη των κτιρίων, ενώ όταν εφαρμόζονται σε προσόψεις και οροφές μπορούν να παρέχουν σκίαση, να πληρούν τις απαιτήσεις φωτισμού ως παράθυρα και να παρέχουν προστασία και απομόνωση ως φράχτες (Zhong κ.α., 2023). Το κέρδος από την ενσωμάτωση bPV σε κτίρια, μπορεί να δημιουργήσει ένα αμφίπλευρο κέρδος της τάξεως 15%-37% υψηλότερο σε σχέση με τα mPV (Zhong κ.α., 2023). Η ανάπτυξη και η τάση της τεχνολογίας bPV παρουσιάζονται στην Εικόνα 10.



**Εικόνα 10 Ανάπτυξη και τάση της τεχνολογίας bPV**

(Πηγή: Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2016). A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. *Energy and Buildings*, 128, 99-110.)

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για να μπορέσει να επιτευχθεί ο στόχος του κτιρίου μηδενικής κατανάλωσης πρέπει, να πραγματοποιηθεί ένας συνδυασμός των μέτρων εκείνων που είναι απαραίτητα για την εξοικονόμηση ενέργειας και την παραγωγή ενέργειας από τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών όπως είναι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

## 2.2 Φωτοβολταϊκά/Θερμικά συστήματα (PV/T)

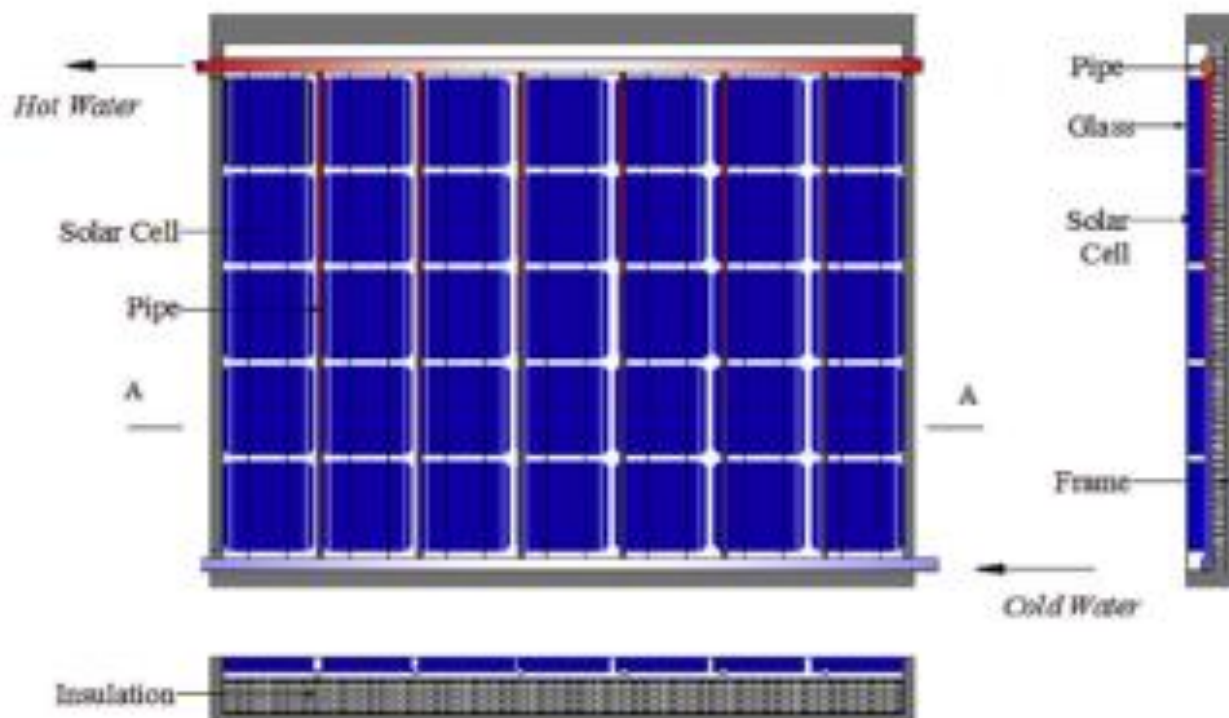
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, κατά τη διάρκεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, απελευθερώνουν και μεγάλες ποσότητες θερμότητας, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία τους και μειώνει την απόδοσή τους. Επομένως αυτή η θερμότητα πρέπει να αφαιρεθεί για να μπορέσει να διατηρηθεί η υψηλή απόδοση και να αποφευχθεί υπερθέρμανση (Yu κ.α., 2021).

Cao κ.α., 2023). Τα φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα PV/T είναι μια τεχνολογία που συνδυάζει φωτοβολταϊκά και ηλιακούς συλλέκτες, με αυτόν τον τρόπο γίνεται ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας η οποία όχι μόνο αποτρέπει την υπερθέρμανση των πλαισίων, αλλά και συμβάλλει στη μείωση των φορτίων θέρμανσης των κτιρίων, προσφέροντας συνολικά υψηλότερη ενεργειακή απόδοση (Yu κ.α.,2021· Cao κ.α., 2023· Wang, Ji, Song & Ke, 2024).

Οι συλλέκτες PVT μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορα δομικά στοιχεία, όπως οροφές, προσόψεις, παράθυρα και συσκευές σκίασης. Ένα ενσωματωμένο σύστημα PV/T χαρακτηρίζεται από τρία βασικά στοιχεία: (α) αποτελεί οργανικό μέρος του κτιρίου, (β) μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και (γ) αξιοποιεί τη θερμότητα που παράγεται για θέρμανση ή/και βελτίωση του μικροκλίματος στο εσωτερικό του κτιρίου (Yu κ.α.,2021· Cao κ.α., 2023). Τα πιο συνηθισμένα συστήματα PV/T είναι αυτά που χρησιμοποιούν σαν μέσο αφαίρεσης της θερμότητας των φωτοβολταϊκών κυψελών τον αέρα και αυτά που χρησιμοποιούν σαν μέσο αφαίρεσης της θερμότητας υγρό (Yu κ.α.,2021· Cao κ.α., 2023).

Στα συστήματα PV/T με ψυκτικό μέσο τον αέρα, ο αέρας ρέει μέσω της φωτοβολταϊκής/θερμικής μονάδας αφαιρώντας έτσι τη θερμότητα μπορούν να ενσωματωθούν στις προσόψεις των κτιρίων, μπορούν να εγκατασταθούν στις προσόψεις των κτιρίων (σε μη διαφανείς και διαφανείς επιφάνειες), στις οροφές των κτιρίων όπου επαληθευμένα είναι αποτελεσματικά στην αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας τον χειμώνα (Cao κ.α., 2023). Τα συστήματα PV/T που χρησιμοποιούν υγρό (με κυριότερο το νερό) ως ψυκτικό μέσο αποδίδουν την θερμική ενέργεια που απορροφούν, μπορούν να την χρησιμοποιήσουν για τις ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου και για ζεστό νερό χρήσης, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να αυξήσει την ηλεκτρική απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου (Cao κ.α., 2023).

Στην Εικόνα 11, παρουσιάζεται ένας τυπικός φωτοβολταϊκός/θερμικός συλλέκτης, που αποτελείται από το γυάλινο κάλυμμα, τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, τις σωληνώσεις για το νερό και το θερμομονωτικό στρώμα.



**Εικόνα 11 Τυπικός Φωτοβολταϊκός/Θερμικός συλλέκτης (PV/T)**

(Πηγή: Yu, G., Yang, H., Yan, Z., & Ansah, M. K. (2021). A review of designs and performance of façade-based building integrated photovoltaic-thermal (BIPVT) systems. *Applied thermal engineering*, 182, 116081.)

Τα συστήματα PV/T θεωρούνται μία εξαιρετική λύση για τον έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας, υγρασίας και ποιότητας εσωτερικού αέρα (Cao κ.α., 2023). Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα ελαττώματα στην πρακτική εφαρμογή των συστημάτων αυτών, σύμφωνα με τους Cao κ.α. (2023). Στα συστήματα PV/T με βάση τον αέρα η απόδοση μεταφοράς θερμότητας είναι χαμηλή αν και η δομή είναι απλή, επιπλέον αυτού όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεπεράσει τους 20 °C, η απόδοση παραγωγής ενέργειας της φωτοβολταϊκής κυψέλης επηρεάζεται σημαντικά. Στα συστήματα PV/T με βάση το νερό υπάρχουν προβλήματα όπως η διαρροή του νερού και της ψύξης των αγωγών κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Ως εκ τούτου, η διάδοση των συστημάτων PV/T είναι ακόμα μικρή.

## **2.3 Περιβαλλοντικά-Οφέλη και προκλήσεις-Προοπτικές**

### **2.3.1 Περιβαλλοντικά**

Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα φαίνεται πως επηρεάζουν την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα τελευταία 50 χρόνια η θερμοκρασία έχει αυξηθεί έως και 1,5°C οδηγώντας σε τήξη τους παγετώνες με αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης της θάλασσας (Faranda κ.α., 2023). Λόγω της κλιμακούμενης αυτής απειλής,

έχει δοθεί έμφαση στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η συμφωνία που υπογράφηκε στο Παρίσι το 2015, αποσκοπεί στον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από τους 2°C έως το τέλος του 21ου αιώνα. Ο κατασκευαστικός τομέας έχει σημαντική συμβολή στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 50% των συνολικών εκπομπών, με τα κτίρια να ευθύνονται για το 27% αυτού (Wang κ.α., 2024).

Αν και ένα μέρος των ανθρώπων θεωρούν ότι οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι αμελητέες σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, υπάρχουν σημαντικές έμμεσες επιπτώσεις οι οποίες δεν εξαρτώνται από το είδος της παροχής ενέργειας και προέρχονται από την κατασκευή, τη μεταφορά και τη διαχείριση των υλικών (Elnozahy κ.α., 2024). Ωστόσο, τα περιβαλλοντικά οφέλη από την χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πολλά, ο Kumar (όπως αναφέρεται στο Li & Han, 2022), αναφέρει ότι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θα παράγει μόνο το ένα έκτο εκπομπών CO<sub>2</sub> σε σχέση με το φυσικό αέριο και το ένα δέκατο σε σχέση με τον άνθρακα κατά την στιγμή της παραγωγής του φωτοβολταϊκού σταθμού. Οι te Heesen, Herbolt και Rumpfer (2019), στη δική τους έρευνα αναλύουν τα ημερήσια δεδομένα από 23944 εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά στις στέγες στην επικράτεια της Γερμανίας, από το 2012 έως 2018, αναφέρουν ότι όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων τόσο αυξάνεται και η ετήσια εξοικονόμηση CO<sub>2</sub>, από 8,5 Mt CO<sub>2</sub> eq το 2012 σε 9,7 Mt CO<sub>2</sub> eq το 2018.

Η βελτίωση στην παραγωγή και ανακύκλωση υλικών πυριτίου, φωτοβολταϊκών κυψελών και πλαισίων συμβάλει στη μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>, μέσω της μείωσης της χρήσης ενέργειας (Wilson κ.α., 2020). Επίσης, τεχνολογίες όπως η νανο-επίστρωση σε φωτοβολταϊκά συστήματα μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα κατά 11% σε σχέση με σκονισμένα πάνελ (Elnozahy κ.α., 2024).

Οι Attoye κ.α. (2017), αναφέρουν τρία περιβαλλοντικά οφέλη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας:

- Μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα
- Το όφελος της ηλιακής ενέργειας π.χ. εξοικονόμηση φυσικών πόρων
- Μείωση του κόστους άνθρακα (SCC), δηλαδή μείωση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων από την εκπομπή επιπλέον CO<sub>2</sub>.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (π.χ. άνθρακα), μειώνοντας ταυτόχρονα και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, επιβεβαιώνοντας έτσι τη χρησιμότητά τους (Rodríguez κ.α., 2017).

### 2.3.2 Οφέλη και προκλήσεις

Οι ανησυχίες των χρηστών των φωτοβολταϊκών συστημάτων επικεντρώνονται κυρίως σε οικονομικούς παράγοντες και στην αξιοπιστία του συστήματος (Wang κ.α., 2024). Τα κύρια εμπόδια για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτίρια, είναι το υψηλό κόστος του αρχικού κεφαλαίου και η μεγάλη περίοδος απόσβεσης (Kapsalis κ.α., 2024).

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα οικονομικά οφέλη και προκλήσεις από την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε κτίρια (Attoye κ.α., 2017· Kapsalis κ.α., 2024).

Οφέλη:

- Παύει να υπάρχει η ανάγκη μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μείωση των δαπανών για υποδομές και συντήρηση.
- Δεν υπάρχει η ανάγκη για γη, ώστε να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά συστήματα.
- Μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας.

Προκλήσεις:

- Πολιτικές από τις κυβερνήσεις που αφορούν την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Διεθνής ή τραπεζική υποστήριξη.

Τεχνολογίες όπως η νανο-επίστρωση σε φωτοβολταϊκά συστήματα αυξάνουν τις αποδόσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων έως και 11% σε σχέση με τον χειροκίνητο καθαρισμό και σκονισμένα πλαίσια, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της εγκατεστημένης ισχύος, άρα και του αρχικού κόστους, ενώ μπορεί να μειώσει και την περίοδο που γίνεται η απόσβεση (Elnozahy κ.α., 2024).

Ο απώτερος στόχος είναι το κόστος ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων να είναι ανταγωνιστικό με τα δομικά υλικά που αντικαθιστά (π.χ. κεραμίδι, γυάλινη επιφάνεια κ.τ.λ.), αυτό επιτυγχάνεται μόνο όταν η ανάκτηση του ενεργειακού κόστους κατά τη διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού δομικού προϊόντος υπερβαίνει το

επιπλέον αρχικό κόστος του φωτοβολταϊκού δομικού προϊόντος (Shukla κ.α., 2016). Επίσης, παράγοντες όπως το πόσο καταναλώνει ο χρήστης από την παραγόμενη ενέργεια των φωτοβολταϊκών συστημάτων και πόση διαχέεται στο δίκτυο ή αποθηκεύεται επηρεάζουν την οικονομική σκοπιμότητα (Faranda κ.α., 2023).

Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα επηρεάζεται από τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής που βρίσκονται. Σε περιοχές με υψηλή συχνότητα φυσικών καταστροφών είναι καλύτερη η υιοθέτηση ενός μοντέλου συνεργατικής οικονομίας από ότι αυτόνομα συστήματα ώστε να αμβλυνθεί ο κίνδυνος αυτός. Πιθανός κίνδυνος υπάρχει και για τα δίκτυα διανομής που μπορεί να αντιμετωπίσουν αστάθειες, απαιτώντας ειδικά μετρά, όπως τοπική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (Kapsalis κ.α., 2024). Η σκίαση των φωτοβολταϊκών παραμένει μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τη διατήρηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπου ακόμα και μερική σκίαση από δέντρα ή κτίρια μπορεί να επηρεάσει σημαντικά, οπότε ο σωστός σχεδιασμός λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα και μελλοντική σκίαση είναι σημαντικός για την αποφυγή του προβλήματος (Sailor κ.α., 2021). Η μη ύπαρξη επικυρωμένων προσομοιώσεων πρόβλεψης παραγωγής των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών σε κτίρια που απαιτούνται για τη λήψη οικονομικών αποφάσεων, αποτρέπει την ευρεία χρήση τους (Biyik κ.α., 2017).

### **2.3.3 Προοπτικές**

Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτίρια βρίσκεται ακόμα σε φάση τεχνολογικής ανάπτυξης, αυτό από μόνο του δείχνει ότι δεν έχουν εμφανιστεί ακόμα οι πλήρεις δυνατότητές τους (Attoye κ.α., 2017). Η βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι μια συνεχής προσπάθεια, της οποίας τα αποτελέσματα, είναι η μείωση του κόστους του φωτοβολταϊκού πλαισίου στο συνολικό κόστος. Επίσης, η αναζήτηση για παραγωγή φωτοβολταϊκών από υλικά όπως το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) αντί του πυριτίου οδηγούν σε χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Wilson κ.α., 2020).

Δεν αρκεί, όμως, μόνο η τεχνολογική έρευνα και εξέλιξη για την ευρεία διάδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Χρειάζεται, επίσης, χρηματοδοτική στήριξη, εύκολες διαδικασίες δανειοδότησης, προτεραιότητα στην ιδιοκατανάλωση ώστε να μην επιβαρύνονται τα ηλεκτρικά δίκτυα, προσεκτική εξέταση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος, αξιόπιστη ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τα κίνητρα για την εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων, όλα αυτά για να μπορέσουν να



υλοποιηθούν χρειάζεται να υιοθετηθούν κατάλληλες πολιτικές που θα ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των συστημάτων αυτών (Kapsalis κ.α., 2024). Επίσης, το χάσμα που υπάρχει μεταξύ της φωτοβολταϊκής βιομηχανίας και την οικοδομική βιομηχανία λόγω έλλειψης προθυμίας υιοθέτησής του φρενάρει τη διάδοση των συστημάτων αυτών (Attoye κ.α., 2017).

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε ένα κτίριο μπορεί να διαδραματίσει ουσιαστικό ρόλο σε μία νέα εποχή κατανεμημένης ενέργειας, παρόλες τις προκλήσεις που υπάρχουν, η αξία της παραγωγής ενέργειας απευθείας εκεί που χρησιμοποιείται και η αισθητική ενσωμάτωση είναι ακόμα σε εξέλιξη, γεγονός που μπορεί να αμβλύνει εν καιρώ τα όποια εμπόδια που υπάρχουν για την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε ένα κτίριο (Shukla κ.α., 2016).

### 3. Προηγούμενη βιβλιογραφία

#### 3.1 Βιβλιογραφικές βάσεις-Λέξεις κλειδιά

##### 3.1.1 Βιβλιογραφικές βάσεις

Για τη σύνταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκαν επιστημονικές βιβλιογραφικές βάσεις, με αναζητήσεις που πραγματοποιήθηκαν βάσει στοχευμένων λέξεων-κλειδιών. Πιο συγκεκριμένα οι βιβλιογραφικές βάσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι το Scopus και το Google Scholar.

##### 3.1.2 Λέξεις κλειδιά

Για την βιβλιογραφική βάση scopus (με search within:keyword): χρησιμοποιήθηκαν λέξεις κλειδιά όπως:

PV technology και βρέθηκαν 2945 βιβλιογραφικές πηγές.

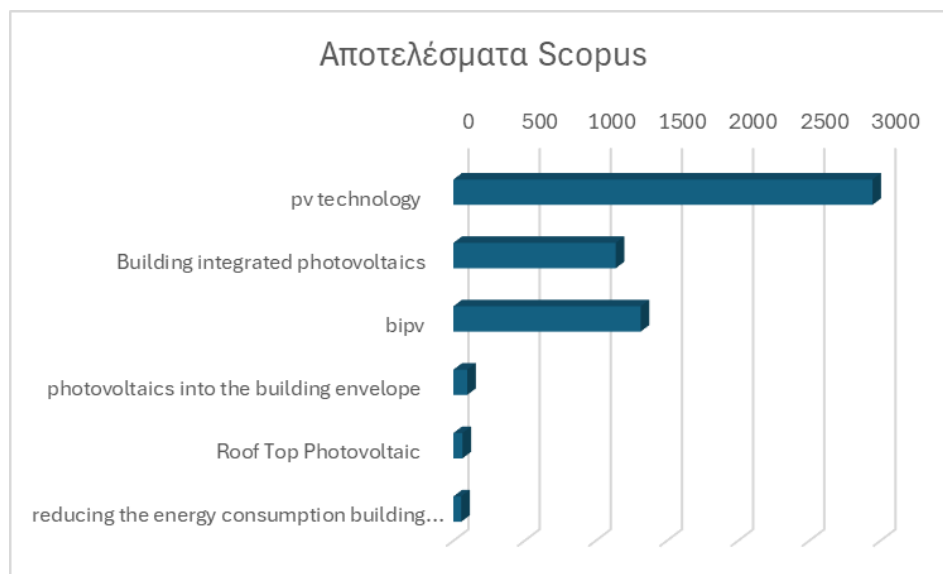
Building integrated photovoltaics και βρέθηκαν 1141 βιβλιογραφικές πηγές.

bipv και βρέθηκαν 1316 βιβλιογραφικές πηγές.

photovoltaics into the building envelope και βρέθηκαν 97 βιβλιογραφικές πηγές.

Roof Top Photovoltaic και βρέθηκαν 64 βιβλιογραφικές πηγές.

reducing the energy consumption building renewable και βρέθηκαν 55 βιβλιογραφικές πηγές. Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζονται τα παραπάνω.



Διάγραμμα 1 Αποτελέσματα Scopus

Για την βιβλιογραφική βάση Google Scholar χρησιμοποιήθηκαν λέξεις κλειδιά όπως:

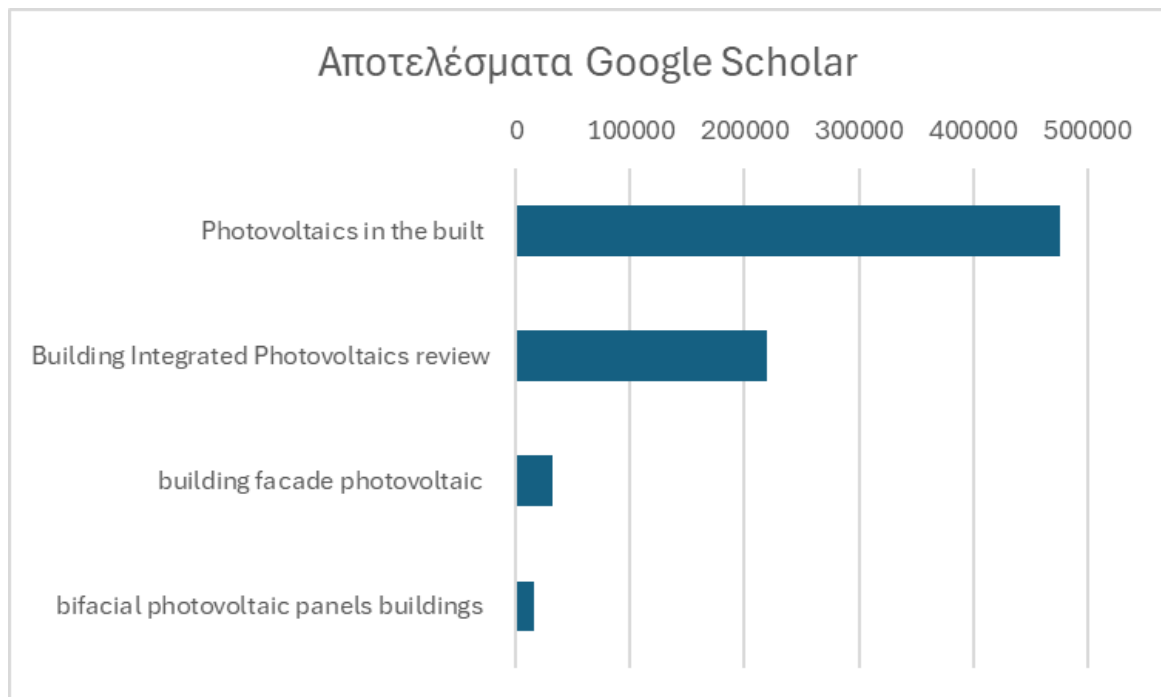
bifacial photovoltaic panels buildings και βρέθηκαν 15.500 βιβλιογραφικές πηγές.

Photovoltaics in the built και βρέθηκαν 476.000 βιβλιογραφικές πηγές.

building facade photovoltaic και βρέθηκαν 32.200 βιβλιογραφικές πηγές.

Building Integrated Photovoltaics review και βρέθηκαν 220.000 βιβλιογραφικές πηγές.

Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζονται τα παραπάνω.



**Διάγραμμα 2 Αποτελέσματα Google Scholar**

Για τον περιορισμό των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα όπως αναζήτηση μόνο σε articles και reviews, πηγές με τις περισσότερες ετεροαναφορές, και πιο πρόσφατες πηγές (λιγότερο από δεκαετία). Με παράδειγμα στη βάση δεδομένων scopus, η αναζήτηση bipv δίνει 876 (αντί για 1316) αποτελέσματα με την εφαρμογή φίλτρου για εμφάνιση μόνο articles και reviews.

### **3.2 Διαλογή βιβλιογραφικών αναφορών**

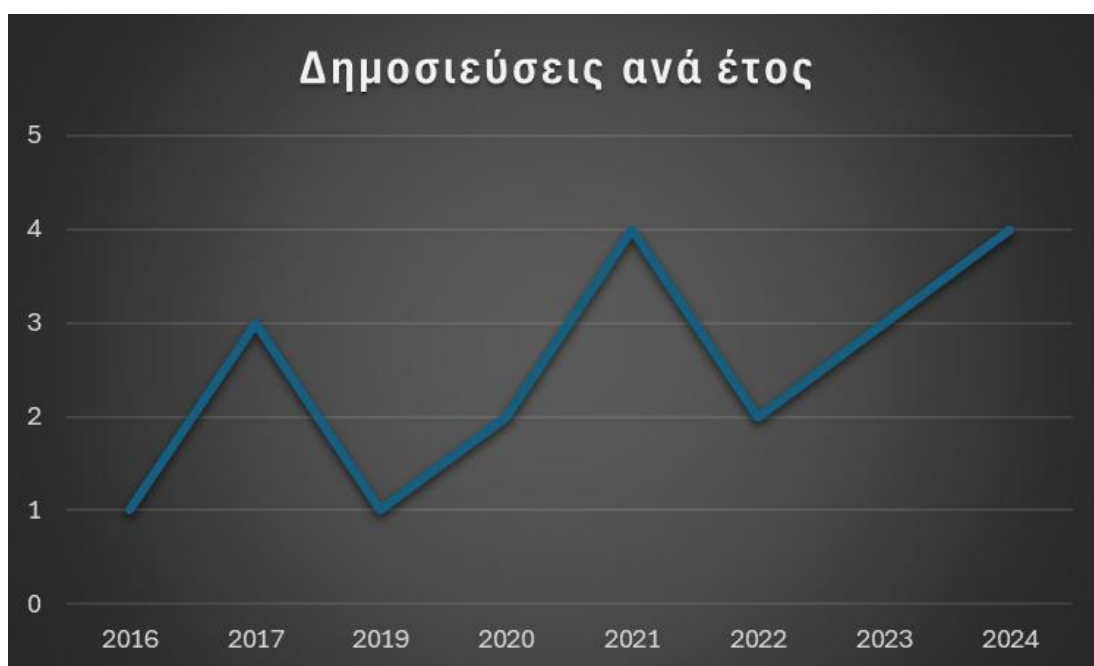
Η επιλογή των συγκεκριμένων βιβλιογραφικών πηγών πραγματοποιήθηκε με 2 κριτήρια. Το πρώτο αφορά την ημερομηνία δημοσίευσης, επιλέχτηκαν δηλαδή πηγές, εντός της τελευταίας δεκαετίας, ώστε να εξεταστούν οι πιο πρόσφατες εξελίξεις πάνω στο θέμα.

Το δεύτερο κριτήριο αφορά στο πλήθος των ετεροαναφορών της κάθε πηγής με επιλογή πηγών με αρκετό αριθμό ετεροαναφορών (εκτός των πολύ προσφάτων).

Λόγος αποκλεισμού βιβλιογραφικών πηγών είναι η μη κατάταξη ή κατάταξη κάτω από Q2 του επιστημονικού περιοδικού στην ιστοσελίδα [www.scimagojr.com](http://www.scimagojr.com) που προσφέρει αξιολόγηση σε επιστημονικά περιοδικά. Επίσης, αποκλείστηκαν πηγές των οποίων τα επιστημονικά περιοδικά δεν διέθεταν CiteScore ή Impact Factor, ένδειξη της επιστημονικής τους επιρροής.

Για το πρώτο screening των βιβλιογραφικών πηγών χρησιμοποιήθηκαν κριτήρια που αφορούν την φωτοβολταϊκή τεχνολογία και το πώς αυτή μπορεί να ενσωματωθεί στο περιβάλλον του κτιρίου (π.χ. οροφή, κέλυφος) για την εξοικονόμηση ενέργειας.

Βρέθηκαν 20 βιβλιογραφικές πηγές, στο διάγραμμα 3 παρουσιάζεται το πλήθος των βιβλιογραφικών αναφορών ανά έτος.



**Διάγραμμα 3 Δημοσιεύσεις ανά έτος**

Στο διάγραμμα 4 παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές πηγών χωρισμένες σε δύο κατηγορίες, αυτή των Articles με 9 βιβλιογραφικές πηγές και αυτή των Reviews με 11 βιβλιογραφικές αναφορές.



**Διάγραμμα 4 Articles-Reviews**

Τα παραπάνω τεκμηριώνουν την αυξημένη ερευνητική εστίαση στο BIPV την τελευταία δεκαετία, υποστηρίζοντας την επικαιρότητα της παρούσας εργασίας.

### 3.3 Οργάνωση βιβλιογραφικών πηγών

#### 3.3.1 Mendeley

Για την οργάνωση των βιβλιογραφικών πηγών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Mendeley (Εικόνα 12). Το λογισμικό αυτό δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να διαχειριστεί τις βιβλιογραφικές αναφορές του. Όπως τη δημιουργία της προσωπικής του βιβλιοθήκης όπου θα μπορεί να οργανώσει, αναζητήσει και διαβάσει τις αναφορές που έχει συγκεντρώσει, στο σημειωματάριο του Mendeley μπορεί να συγκρίνει τις επισημάνσεις ή τις σημειώσεις από πολλά pdf. Επίσης, διαθέτει και σαν πρόσθετο παραπομπών στο word για πιο γρήγορη αναφορά (<https://www.mendeley.com/reference-management/reference-manager>)

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των βιβλιογραφικών αναφορών και στη συνέχεια η εξαγωγή αυτών σε αρχείο με κατάληξη .ris



**Εικόνα 12 Mendeley**

(Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/mendeley/7603612464>)

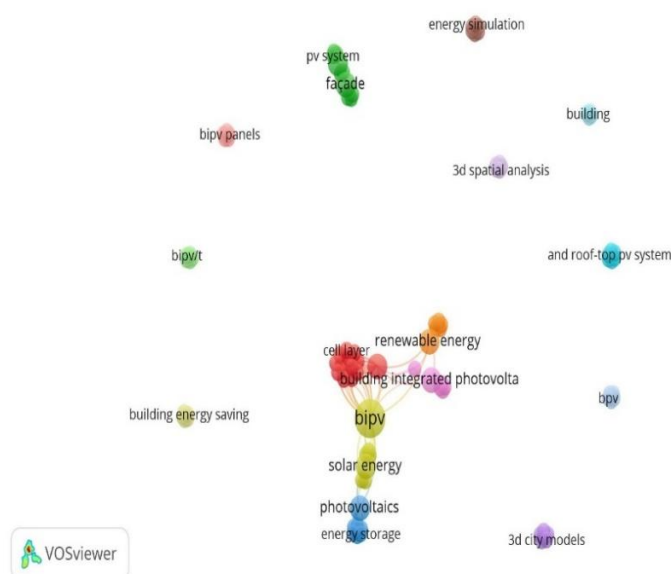
### 3.3.2 VOSviewer

Η οπτικοποίηση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του VOSviewer (Εικόνα 13). Το VOSviewer είναι ένα λογισμικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή και την οπτικοποίηση βιβλιομετρικών δικτύων, όπως επιστημονικά περιοδικά, ερευνητικά έγγραφα, συγγραφείς, ερευνητικά ιδρύματα και άλλα αντικείμενα που σχετίζονται με την επιστημονική δραστηριότητα, παρέχει δυνατότητες όπως η δημιουργία χαρτών βιβλιομετρικών δικτύων, που βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων (<https://www.vosviewer.com/>).



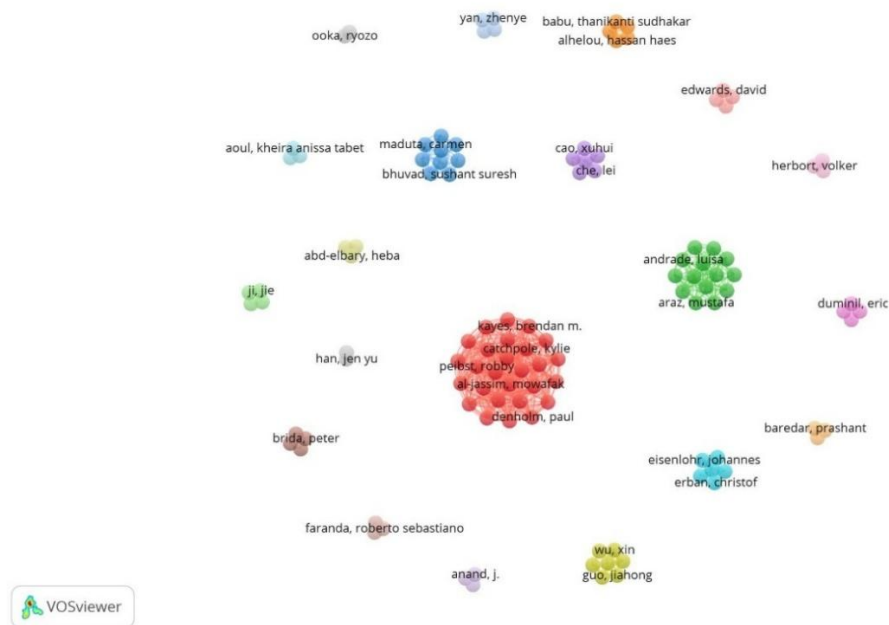
**Εικόνα 13 VOSviewer**  
(Πηγή: <https://www.vosviewer.com/>)

Σύμφωνα με τον χάρτη του VOSviewer (εικόνα 14) για τις βιβλιογραφικές πηγές που εισήχθησαν, εντοπίζονται ορισμένα ερευνητικά πεδία με κύριο αυτό της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών στα κτίρια, επίσης, αυτό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που εφαρμόζονται στα κτίρια, την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στις προσόψεις των κτιρίων, τη μείωση και την αποθήκευση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια, τα φωτοβολταϊκά στις στέγες των κτιρίων. Από τον χάρτη του VOSviewer προκύπτει ότι το πεδίο της τοποθέτησης φωτοβολταϊκών στις στέγες των κτιρίων, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια καθώς και η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών κυρίως στις προσόψεις των κτιρίων είναι πεδία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.



**Εικόνα 14 Ερευνητικά πεδία**

Σύμφωνα με τον χάρτη του VOSviewer (εικόνα 15) για τις βιβλιογραφικές πηγές που εισήχθησαν, όλοι οι συγγραφείς εμφανίζονται να έχουν από μία δημοσίευση. Οι συγγραφείς με τις ισχυρότερες συνεργασίες σύμφωνα με το VOSviewer είναι: al-jassim mowafak, berry joseph j., catchpole kylie, deceglie michael g., denholm paul, dimroth frank, freeman janine m., glunz stefan w., jordan dirk c., kayes brendan m., klinga christopher s., mansfield lorelle m., metzger wyatt k., mikofski mark a., morjaria mahesh, peibst robby, ptak aaron j., reese matthew o., stanbery billy j., sulas-kern dana b., tamboli adele c., tamizhmani govindasamy, wilson gregory m., xiong gang, yan yanfa, zhu kai, με 26 total link strength έκαστος.



**Εικόνα 15 Συγγραφείς**

## **4. Ερευνητικά ερωτήματα-Μεθοδολογία-Βασικά συμπεράσματα**

### **4.1 Ερευνητικά ερωτήματα**

Για να προκύψουν τα ερευνητικά ερωτήματα αρχικά θα πρέπει να διατυπωθεί το ευρύτερο ερευνητικό θέμα στο οποίο εντάσσεται η διπλωματική εργασία. Στη συνέχεια διατυπώνεται το ερευνητικό πρόβλημα που θα εξετάσει, έπειτα ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και τελικά τα ερευνητικά ερωτήματα που καλείται να απαντήσει.

#### **4.1.1 Ερευνητικό Θέμα**

Το ερευνητικό θέμα στο οποίο εντάσσεται η διπλωματική εργασία αφορά την αξιολόγηση της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίριο, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

#### **4.1.2 Ερευνητικό Πρόβλημα**

Το ερευνητικό πρόβλημα που θα εξετάσει η Διπλωματική εργασία αφορά το πως μπορεί να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου μέσω της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς και τις βέλτιστες πρακτικές και προτάσεις αναβάθμισης που μπορούν να εφαρμοστούν.

#### **4.1.3 Σκοπός της Εργασίας**

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να προσφέρει τεκμηριωμένες ερευνητικές εισηγήσεις για την πρακτική εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων σε υφιστάμενα κτίρια, συμβάλλοντας έτσι στην προώθηση βιώσιμων πρακτικών ενεργειακής αναβάθμισης στον κτιριακό τομέα.

#### **4.1.4 Ερευνητικά Ερωτήματα**

Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάζονται παρακάτω τα δύο ερευνητικά ερωτήματα που θα προσπαθήσει να απαντήσει η παρούσα Διπλωματική εργασία.



1) Σε ποιο βαθμό η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διαφορετικά σημεία του κελύφους ενός υφιστάμενου κτιρίου επηρεάζει τους δείκτες Self-Consumption (SC), Self-Sufficiency (SS) και Load Matching;

2) Πώς διαφοροποιούνται οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης και η ωριαία κάλυψη φορτίου μεταξύ διαφορετικών σεναρίων εγκατάστασης Φ/Β, και ποιες βέλτιστες στρατηγικές προκύπτουν για μελλοντικές εφαρμογές;

#### **4.1.5 Συγκλίσεις/αποκλίσεις των βιβλιογραφικών πηγών**

Αρκετές βιβλιογραφικές πηγές από αυτές που επιλέχθηκαν για αυτήν τη διπλωματική εργασία φαίνεται να συγκλίνουν στο ότι η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίριο αποτελεί βιώσιμη και αποδοτική λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κτιρίου πλησιάζοντας έτσι σε κτίρια μηδενικής σχεδόν κατανάλωσης ενέργειας.

Επίσης, σύμφωνα με τις εργασίες, παράγοντες όπως το πού θα τοποθετηθούν τα συστήματα αυτά (γεωγραφικά και αν είναι σε οροφή, κέλυφος κ.ά.), ο προσανατολισμός τους και η κλίση που θα έχουν, είναι σημαντικοί για το πόση ενέργεια μπορούν να παράγουν. Ορισμένες εργασίες παρουσιάζουν μια απόκλιση στο κατά πόσο η πιθανή σκίαση (αυτό βέβαια εξαρτάται και αν είναι μερική ή ολική σκίαση, ποιες ώρες και πόση διάρκεια) των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες ή όχι στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

#### **4.1.5 Ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση**

Μέσα από τη μελέτη των συγκεκριμένων βιβλιογραφικών πηγών εντοπίστηκαν ορισμένα ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση. Ένα τέτοιο ζήτημα αφορά σε τι ποσοστό μπορεί να καλυφθεί η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου, εάν υπάρχει συμπαραγωγή φωτοβολταϊκών που τοποθετούνται στην οροφή και αυτών που ενσωματώνονται στο κέλυφος του κτιρίου.

Ένα επιπλέον ζήτημα που χρήζει περαιτέρω διερεύνηση αφορά στις προτάσεις αναβάθμισης των πηγών ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου με τη βοήθεια της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

## **4.2 Μεθοδολογική προσέγγιση- flow chart**

### **4.2.1 Μεθοδολογική προσέγγιση**

Η εργασία ακολουθεί μια bottom-up προσέγγιση, ξεκινώντας από την αποτύπωση πραγματικών δεδομένων κατανάλωσης και παραγωγής ανά ώρα, και φτάνοντας στην αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης με βάση κρίσιμους δείκτες απόδοσης. Η μεθοδολογική προσέγγιση που θα ακολουθηθεί προκειμένου να απαντηθούν τα παραπάνω ερευνητικά ερωτήματα έχει ως εξής.

Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί η απαραίτητη ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, ώστε με τη συλλογή δεδομένων (όπως κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ύπαρξη ή μη μόνωσης) να αξιολογηθεί η υφιστάμενη κατάσταση που αφορά στην τρέχουσα κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου και ο εντοπισμός των περιοχών με τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας του κτιρίου. Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει η αξιολόγηση του δυναμικού των φωτοβολταϊκών συστημάτων με βάση τη θέση και τον προσανατολισμό του κτιρίου για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του. Με ποιο τρόπο τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα ενσωματωθούν στο κτίριο, πόση θα είναι η εγκατεστημένη ισχύς αυτών των Φ/Β συστημάτων και πόση η απόδοσή τους, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση της παραγωγής ενέργειας των Φ/Β συστημάτων.

Η συνέχεια αφορά στην ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου για την ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου του κτιρίου, της συνολικής δηλαδή ενεργειακής ζήτησης του κτιρίου και της συνολικής παραγωγής ενέργειας από την ενσωμάτωση των Φ/Β συστημάτων. Η εστίαση θα γίνει σε βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs), όπως το ποσοστό από την συνολική κατανάλωση ενέργειας θα καλύπτεται από Φ/Β συστήματα και το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας από αυτά που θα καταναλώνει το ίδιο το κτίριο χωρίς να χρειάζεται να αποθηκευτεί ή να πηγαίνει στο δίκτυο. Μέσω της παραπάνω προσέγγισης επιδιώκεται μία ολοκληρωμένη ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου του κτιρίου, προτάσεις βελτίωσης με τη χρήση Φ/Β συστημάτων και προσδιορισμός των βέλτιστων πρακτικών για τη βιώσιμη λειτουργία των κτιρίων.

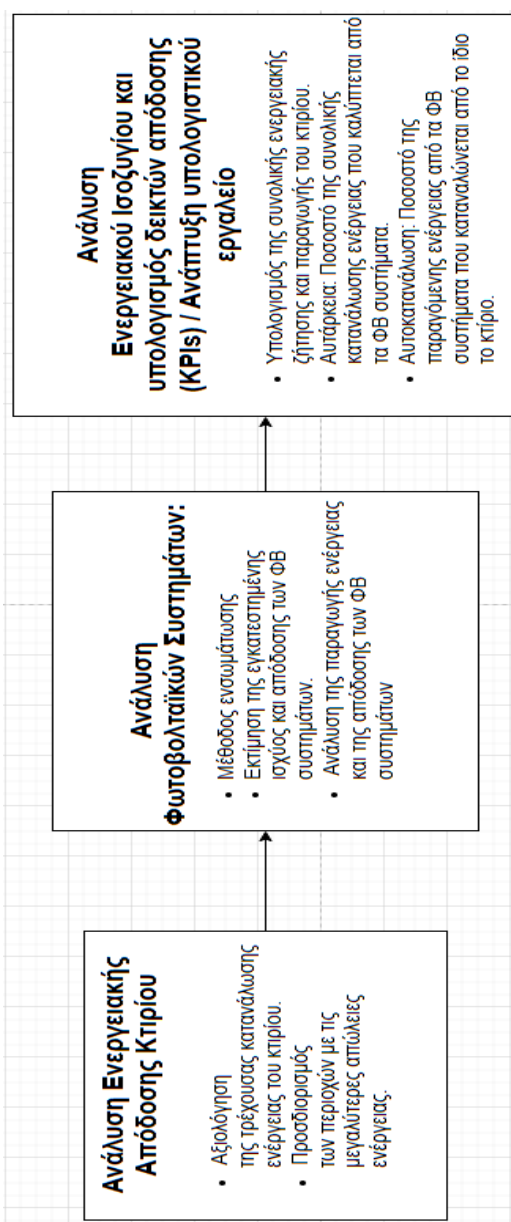
### **4.2.2 Flow chart**

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται το flow chart με τα βασικά βήματα της μεθοδολογικής προσέγγισης που θα ακολουθηθεί ώστε να απαντηθούν τα παραπάνω

ερευνητικά ερωτήματα. Κάθε στάδιο περιλαμβάνει βασικές ενέργειες, οι οποίες συνδέονται λογικά και χρονικά. Η δομή ακολουθεί την εξής λογική:

1. Αποτύπωση ενεργειακής κατανάλωσης.
2. Συλλογή δεδομένων παραγωγής Φ/Β.
3. Υπολογισμός KPIs με χρήση του εργαλείου.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου, επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης διαφορετικών σεναρίων ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών στην ενεργειακή αυτάρκεια και κατανάλωση ενός υφιστάμενου κτιρίου.



Εικόνα 16 Flow chart

## 4.3 Βασικά συμπεράσματα (SWOT ανάλυση)

### 4.3.1 Swot ανάλυση

Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται μία swot ανάλυση όπου αξιολογεί την παραπάνω μεθοδολογική προσέγγιση. Παρουσιάζει δηλ. τα δυνατά και τα αδύναμα σημεία της μεθοδολογικής προσέγγισης για την απάντηση των ερευνητικών ερωτημάτων καθώς και τις ευκαιρίες και απειλές της ίδιας προσέγγισης.



Εικόνα 17 SWOT ανάλυση

### 4.3.2 Βασικά Συμπεράσματα

Όπως παρουσιάζεται και στην παραπάνω SWOT ανάλυση, η διπλωματική εργασία έχει ορισμένα δυνατά και αδύναμα σημεία καθώς και ορισμένες ευκαιρίες αλλά και απειλές. Ένα πρώτο δυνατό σημείο της εν λόγω διπλωματικής, είναι ότι δίνεται η ευκαιρία για μία

ολοκληρωμένη ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου του συγκεκριμένου κτιρίου. Αυτό επιδιώκεται να επιτευχθεί με τη συλλογή των δεδομένων που είναι απαραίτητα ώστε να ευρεθεί η τρέχουσα ζήτηση ενέργειας του κτιρίου και να εντοπιστούν εκείνες οι περιοχές που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας και της συνολικής παραγωγής ενέργειας από την ενσωμάτωση των Φ/Β συστημάτων είτε στην οροφή-δώμα, είτε στο κέλυφος του κτιρίου. Ένα δεύτερο δυνατό σημείο της διπλωματικής εργασίας είναι ότι δίνεται η ευκαιρία για αξιολόγηση του δυναμικού των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, θα εξεταστεί δηλαδή πόση από την απαιτούμενη ενεργειακή ζήτηση του κτιρίου μπορούν να καλύψουν τα Φ/Β συστήματα μέσω της ενσωμάτωσης στο κέλυφος του κτιρίου σε συνδυασμό και με την τοποθέτησή τους στο δώμα του κτιρίου. Το τρίτο δυνατό σημείο είναι η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου που θα είναι ικανό να πραγματοποιεί ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου του κτιρίου βασιζόμενο σε κύριους δείκτες απόδοσης (KPIs) όπως η αυτάρκεια, το ποσοστό δηλ. κάλυψης της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από Φ/Β συστήματα και της αυτοκατανάλωσης, δηλαδή το πόσο από την παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται χωρίς να αποθηκεύεται ή διοχετεύεται στο δίκτυο.

Σαν πρώτο αδύναμο σημείο της εν λόγω διπλωματικής, είναι ότι για να μπορέσει να αναλυθεί σωστά η ενεργειακή ζήτηση του κτιρίου καθώς και ο εντοπισμός των περιοχών με τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας, θα πρέπει η συλλογή των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν να πραγματοποιηθεί με σχετική ακρίβεια, κάτι που μπορεί να μην είναι εφικτό. Ένα δεύτερο αδύναμο σημείο, είναι ότι ο υπολογισμός της απόδοσης Φ/Β συστημάτων ενδεχομένως αποτελεί περίπλοκη διαδικασία κυρίως λόγω της θέσης τοποθέτησής του και των ενδεχόμενων σκιάσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το τρίτο αδύναμο σημείο που εντοπίζεται αφορά στην εγκατάσταση των Φ/Β συστημάτων. Υπάρχει αρκετός χώρος στην οροφή ή στο κέλυφος για την εγκατάστασή τους; Αν αυτοί οι χώροι σκιάζονται πλήρως, τότε δεν μπορούν να τοποθετηθούν Φ/Β συστήματα. Αν όχι, ποιες ώρες της ημέρας και για πόσο; Όστε να μπορεί να εξετασθεί αν η τοποθέτηση τους πρέπει να πραγματοποιηθεί.

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζει και ορισμένες ευκαιρίες. Μια πρώτη ευκαιρία αφορά την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου που έχει αντίκτυπο σε τομείς όπως το λειτουργικό κόστος που θα παρουσιάσει μείωση. Μια δεύτερη ευκαιρία αφορά στην αύξηση της ενεργειακής ανεξαρτησίας του κτιρίου. Αυτό που

επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στο κτίριο είναι ότι αυτό παύει να είναι απολύτως εξαρτημένο από συμβατικές πηγές ενέργειας αυξάνοντας έτσι την ενεργειακή του ασφάλεια (θα μπορούσε σε μεγαλύτερο βαθμό εάν αποθηκευόταν και ένα κομμάτι της παραγόμενης ενέργειας). Η τρίτη και πολύ σημαντική ευκαιρία αφορά στη βιώσιμη λειτουργία των κτιρίων. Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων (ή και άλλων Α.Π.Ε.) στο κτίριο, όχι μόνο επιδιώκει τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής του, αλλά μειώνει και το περιβαλλοντικό αποτύπωμά του. Αυτό επιτυγχάνεται διότι η ηλιακή ενέργεια που εκμεταλλεύονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα, ώστε να μπορέσουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, είναι μία ήπια μορφή ενέργειας που δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με επικίνδυνους ρύπους.

Υπάρχουν όμως και ορισμένες απειλές. Μία πρώτη απειλή είναι η αδυναμία χρηματοδότησης των αναγκαίων αλλαγών που πρέπει να γίνουν ώστε να επιτευχθεί η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου. Αυτό μπορεί να οφείλεται ή στο ενδεχόμενο μεγάλο αρχικό κόστος των αλλαγών αυτών ή στην μεταβολή του αρχικού κόστους προς τα πάνω λόγω της αύξησης των υλικών και των υπηρεσιών για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μία δεύτερη απειλή, δύσκολα προβλέψιμη, αποτελεί η μεταβολή της τιμής της ενέργειας στην αγορά που μπορεί να οφείλεται π.χ. σε αλλαγές στη νομοθεσία που αφορά στην ενέργεια. Αυτή η απειλή σε συνδυασμό και με την πρώτη που αφορά στο κόστος της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στο αν τελικά το εγχείρημα είναι οικονομικά συμφέρον. Η τρίτη και τελευταία απειλή που και αυτή είναι δύσκολο σε πολλές περιπτώσεις να προβλεφθεί αφορά στη μεταβολή στο βαθμό σκίασης των εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων. Για παράδειγμα, αν για οποιοδήποτε λόγο ανεγερθούν καινούρια ψηλά κτίρια ή παραπάνω όροφοι σε ήδη υφιστάμενα κτίρια από την μεριά του κτιρίου που έχουν τοποθετηθεί Φ/Β συστήματα, προκαλώντας την επιπλέον ή πλήρη σκίαση τους, αυτό θα έχει και την ανάλογη μείωση στην συνολική παραγωγή ενέργειας των Φ/Β συστημάτων, οπότε και την μείωση της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου.

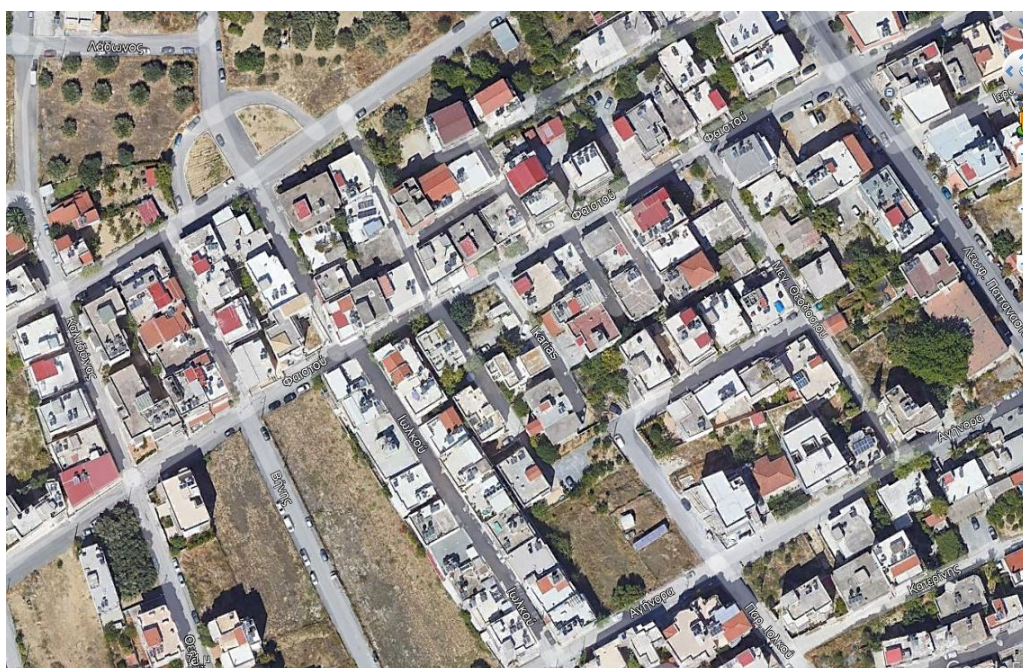


## 5. Μελέτη περίπτωσης και σενάρια ενσωμάτωσης

### 5.1 Το κτίριο

#### 5.1.1 Τοποθεσία

Το κτίριο που πρόκειται να μελετηθεί είναι μια κατοικία και βρίσκεται στην πόλη του Ηρακλείου στην Κρήτη. Πιο συγκεκριμένα βρίσκεται στις Μεσαμπελίες, ένα προάστιο του Ηρακλείου, σε περιοχή με σχετικά αραιή δόμηση (Εικόνα18). Το κλίμα στην πόλη του Ηράκλειου είναι μεσογειακό με ήπιους χειμώνες και θερμά και ξηρά καλοκαίρια, χαρακτηριστικό είναι επίσης οι πολλές ηλιόλουστες μέρες το χρόνο.

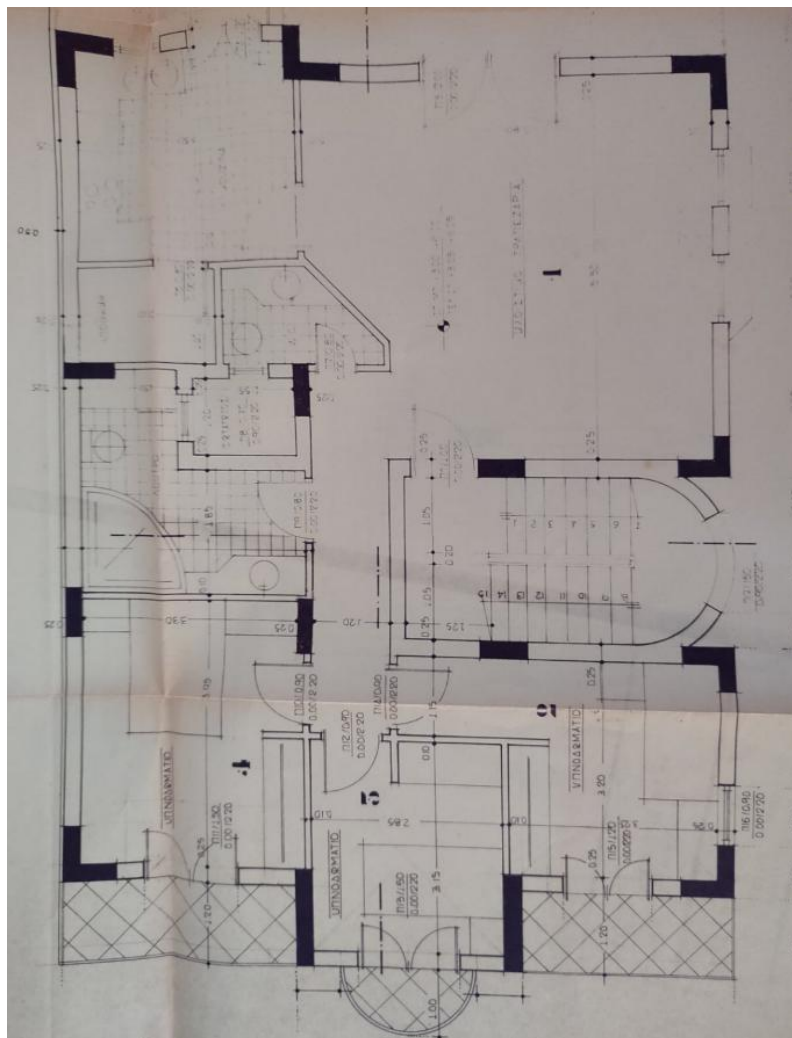


Εικόνα 18 Τοποθεσία κτιρίου

Η κατοικία αποτελεί τυπική περίπτωση της συγκεκριμένης ημιαστικής περιοχής και έχει έκταση περίπου 120 τ.μ., είναι κατασκευασμένη τη δεκαετία του '90 και κατοικείται συνεχώς από τότε. Οι εξωτερικοί τοίχοι αποτελούνται από διπλή τοιχοποιία με τούβλο και με διάκενο, χωρίς θερμομόνωση. Διαθέτει δώμα και όχι επικλινή στέγη. Στη δυτική πλευρά και σε απόσταση περίπου 4,5μ. υπάρχει διπλοκατοικία με ύψος περίπου 6μ. Η κατοικία διαθέτει 8 ανοίγματα: δύο πόρτες στη Βορειοδυτική πλευρά, τρία παράθυρα στη Βορειοανατολική και 3 πόρτες στη Νοτιοανατολική. Όλα τα κουφώματα έχουν πλαίσιο αλουμινίου με διπλά τζάμια χωρίς θερμοδιακοπή. Η κατοικία δε διαθέτει ούτε εξωτερική ούτε εσωτερική μόνωση.

### 5.1.2 Κάτοψη

Εσωτερικά, η κατοικία στη Βόρεια πλευρά διαθέτει ένα μεγάλο ενιαίο χώρο που στεγάζει τη κουζίνα με το σαλόνι, δυτικά υπάρχει ένα μπάνιο, ένα WC και μία μικρή αποθήκη και νότια υπάρχουν τρία υπνοδωμάτια (Εικόνα 19).



Εικόνα 19 Κάτοψη κατοικίας

Η κατοικία για τις ανάγκες θέρμανσης χρησιμοποιεί λέβητα πετρελαίου. Το ζεστό νερό χρήσης καλύπτεται από εγκατεστημένο ηλιακό θερμοσίφωνα και δευτερευόντως από τον λέβητα πετρελαίου. Ο φωτισμός, η ψύξη και οι ανάγκες μαγειρέματος καλύπτονται με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Η κάλυψη των αναγκών ψύξης πραγματοποιείται είτε με ανεμιστήρες, είτε με κλιματιστικά (split) παλαιότερης τεχνολογίας (όχι inverter), οι ανάγκες φωτισμού καλύπτονται στην πλειοψηφία τους με λαμπτήρες τύπου LED. Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της κατοικίας είναι περίπου στις 2640 kWh το χρόνο.



### 5.1.3 Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατοικία

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά ορισμένοι τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας για τη συγκεκριμένη κατοικία, ώστε σε συνδυασμό με την τοποθέτηση ή ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στο κτίριο να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Η τοποθέτηση εξωτερικής μόνωσης στο κέλυφος του κτιρίου με σύγχρονα υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, η μόνωση αυτή αποτρέπει τη διαφυγή θερμότητας από το εσωτερικό της κατοικίας προς το εξωτερικό περιβάλλον κατά τους χειμερινούς μήνες και την είσοδο της εξωτερικής θερμότητας στο εσωτερικό της κατοικίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Με τον τρόπο αυτό η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου θα μειωθούν.

Η αντικατάσταση των παλαιών κλιματιστικών (split) και του λέβητα πετρελαίου με σύγχρονη αντλία θερμότητας (fan coil με υψηλούς δείκτες ενεργειακής αποδοτικότητας COP και EER) που μπορεί μεν να αυξήσει λίγο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αλλά η συνολική ενέργεια που θα χρειάζεται η κατοικία για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης θα είναι πολύ λιγότερες. Με αυτόν τον τρόπο η κατοικία έρχεται πιο κοντά στο να γίνει κτίριο με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας.

Η αντικατάσταση των συσκευών για τις ανάγκες μαγειρέματος με σύγχρονες συσκευές υψηλότερης ενεργειακής κλάσης συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για το φωτισμό και το ζεστό νερό χρήσης δεν χρειάζεται να γίνει κάποια αλλαγή διότι τα φώτα ήδη χρησιμοποιούν τεχνολογία LED που έχουν τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τις τεχνολογίες φωτισμού και για το ζεστό νερό χρήσης υπάρχει ήδη εγκατεστημένος ηλιακός θερμοσίφοντας.

## 5.2 Λογισμικά και Σενάρια ενσωμάτωσης

### 5.2.1 BIMsolar

Για την μελέτη της τοποθέτησης ή ενσωμάτωσης στην κατοικία χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα λογισμικού BIMsolar (<https://www.bim-solar.com/>). Το BIMsolar επιτρέπει την εισαγωγή τρισδιάστατων (3D) μοντέλων κτιρίων και την τοποθέτηση ή ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην οροφή ή το κέλυφος, με στόχο την προσομοίωση της ηλιακής απόδοσης και παραγόμενης ενέργειας.

Το BIMsolar παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής διαφόρων αρχείων με 3D μοντέλα όπως .skp, .rvt, openBIM. Τα δεδομένα του καιρού είτε λαμβάνονται από 100 περίπου

μετεωρολογικούς σταθμούς, είτε μπορούν να εισαχθούν από τον χρήστη σε διάφορες μορφές (tm2, erw ή csv), είτε από βάσεις δεδομένων όπως το PVGIS.

Το BIMsolar προσφέρει προσομοιώσεις για διαφορετικές επιφάνειες ενός 3D μοντέλου λαμβάνοντας υπόψη άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία, με χρήση αλγορίθμου υπολογισμού albedo, που εκφράζει το πόσο ανακλαστική είναι μία επιφάνεια. Το 0% δηλώνει ότι η επιφάνεια απορροφά όλη την ακτινοβολία και το 100 % ότι η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια αντανακλάται όλη. Με αυτό τον τρόπο μοντελοποιούνται οι εισροές και οι απώλειες ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε σημείο μοντέλου.

Διαθέτει επίσης βάση δεδομένων με πληθώρα φωτοβολταϊκών μονάδων που μπορεί να βρει ο χρήστης τόσο για τα συστήματα BAPV όσο και για τα BIPV. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει τη δική του φωτοβολταϊκή μονάδα (BAPV, BIPV) διαμορφώνοντας χαρακτηριστικά όπως ο τύπος της κυψέλης, τις διαστάσεις της φωτοβολταϊκής μονάδας, το γυαλί, το κόστος κ.α. Το ίδιο συμβαίνει και με τους αντιστροφείς (inverters), υπάρχει μία πολύ μεγάλη βάση δεδομένων που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης χειροκίνητα τον inverter που θέλει να χρησιμοποιήσει, όπως και να τον διαμορφώσει όπως και στις φωτοβολταϊκές μονάδες. Εναλλακτικά, η εισαγωγή inverter μπορεί να γίνει αυτόματα, δηλ. να επιλέξει το λογισμικό τον κατάλληλο inverter. Η σύνδεση και η καλωδίωση των φωτοβολταϊκών μονάδων και των inverter μπορεί επίσης να γίνει είτε χειροκίνητα, είτε αυτόματα μειώνοντας τις απώλειες λόγω λανθασμένων υπολογισμών. Το BIMsolar προσφέρει λεπτομερή αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα:

Για τις Φωτοβολταϊκές μονάδες:

Το BIMsolar προσφέρει αποτελέσματα είτε ανά μήνα, είτε ανά μέρα, είτε ανά ώρα, είτε μέση ημερήσια τιμή ανά μήνα, μικρότερο χρονικό βήμα και ανά κατανομή (π.χ. πρόσοψη με μεγαλύτερη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας). Τα αποτελέσματα αυτά είναι η ακτινοβολία, οι απώλειες της ακτινοβολίας λόγω σκιάσεων, η παραγόμενη ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες, οι απώλειες παραγωγής λόγω σκιάσεων, οι απώλειες παραγωγής λόγω αυξημένων θερμοκρασιών των φωτοβολταϊκών μονάδων, η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών μονάδων και η θερμοκρασία αέρα στο περιβάλλον χώρο. Τα παραπάνω μπορούν να εξαχθούν είτε σαν εικόνα, είτε σαν αρχείο .csv.

Για τους inverters:

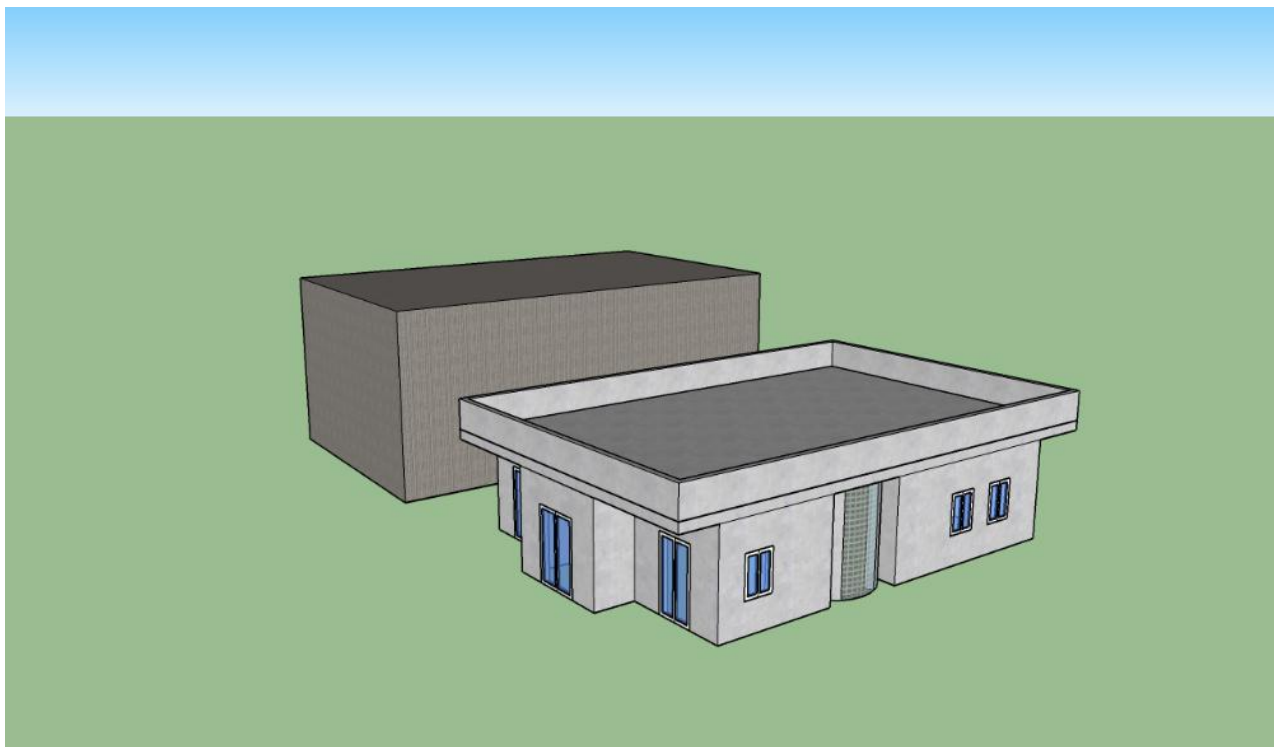
Το BIMsolar προσφέρει αποτελέσματα είτε ανά μήνα, είτε ανά μέρα, είτε ανά ώρα, είτε μέση ημερήσια τιμή ανά μήνα, μικρότερο χρονικό βήμα και ανά κατανομή (π.χ. πρόσοψη με μεγαλύτερη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας). Τα αποτελέσματα αυτά είναι η

παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες (DC ρεύμα), η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στην έξοδο των inverters (AC ρεύμα), η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια των inverters από DC ρεύμα σε AC (αντιπροσωπεύει την απόδοση των inverters), οι ωμικές απώλειες παραγωγής στο DC ρεύμα λόγω αντίστασης των καλωδίων, οι ηλεκτρικές απώλειες της παραγωγής λόγω παραγόντων όπως την ασυμβατότητα μεταξύ των φωτοβολταϊκών μονάδων, λόγω ρύπανσης κ.α., η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών μονάδων και η τελική απόδοση σε kWh ανά εγκατεστημένο kWp (kWh/kWp). Τα παραπάνω μπορούν να εξαχθούν είτε σαν εικόνα, είτε σαν αρχείο .csv.

Τέλος, το BIMsolar παρέχει τη δυνατότητα για οικονομική ανάλυση. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να αξιολογήσει το πόσο οικονομικά βιώσιμη είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (BAPV και BIPV). Το λογισμικό υπολογίζει βασικούς οικονομικούς δείκτες όπως η αρχική επένδυση, τα ετήσια έσοδα από την παραγόμενη ενέργεια, τα λειτουργικά κόστη, καθώς και το χρόνο απόσβεσης (payback period).

### 5.2.2 Δημιουργία 3D μοντέλου κατοικίας

Για τη δημιουργία του 3D μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης SketchUp. Δημιουργήθηκε το κέλυφος, δηλαδή τα αδιαφανή (τοιχοί, δώμα κ.τ.λ.) και τα διαφανή (ανοίγματα) Εικόνα 20. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής αρχείου με κατάληξη .skp ώστε να μπορεί να εισαχθεί στο BIMsolar.

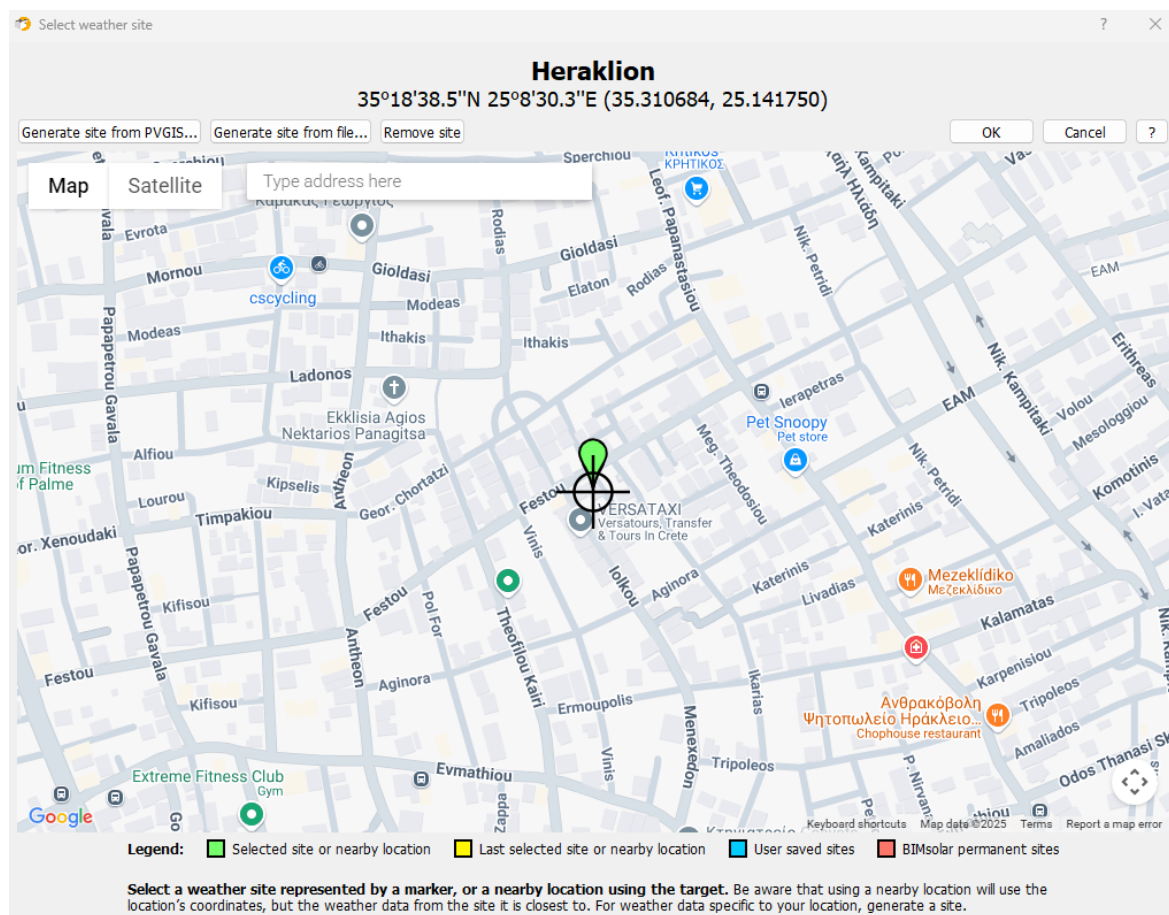


Εικόνα 20 3D μοντέλο κατοικίας

## 5.2.3 Σενάρια τοποθέτησης και ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων στην κατοικία

### 5.2.3.1 1<sup>ο</sup> σενάριο

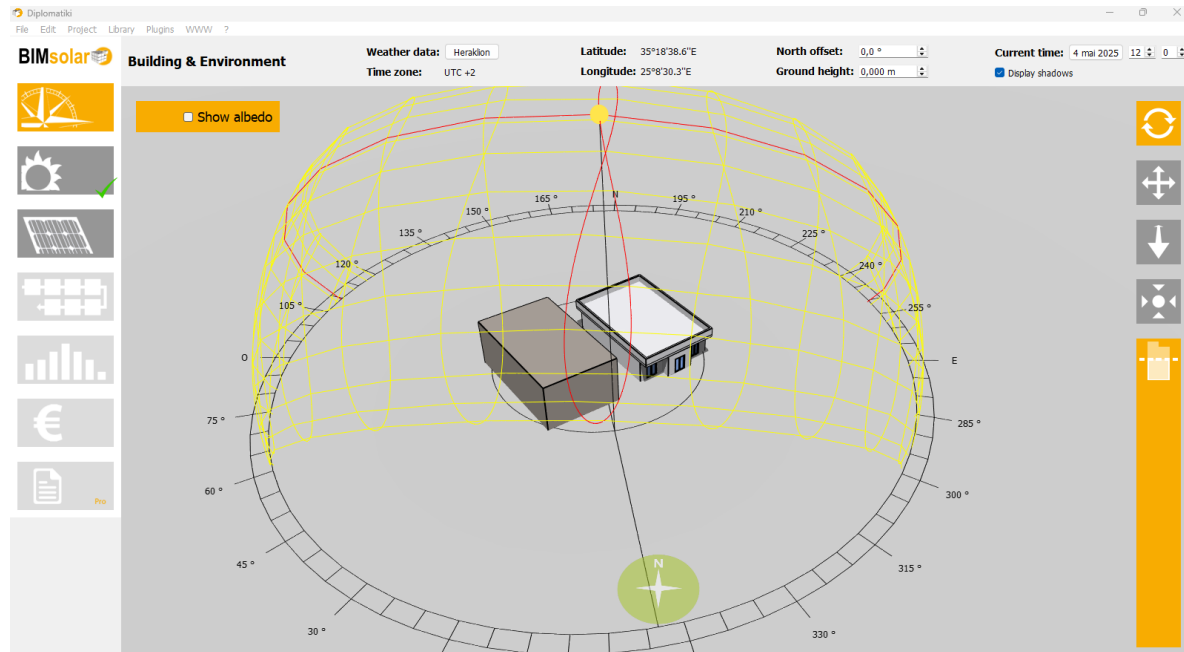
Το πρώτο σενάριο αφορά στην περίπτωση τοποθέτησης BAPV συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ στο δώμα της κατοικίας. Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται η εισαγωγή του 3D μοντέλου σε αρχείο .skp και ο προσδιορισμός της τοποθεσίας στην οποία βρίσκεται η κατοικία ώστε να εισαχθούν τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής (Εικόνα 21). Αν και η κατοικία βρίσκεται στο Ηράκλειο Κρήτης, τα μετεωρολογικά δεδομένα αναφέρουν την Αθήνα, αυτό μπορεί να διορθωθεί πατώντας το κουμπί Generate site from PVGIS... ώστε να συνδεθεί με τη βάση ευρωπαϊκή βάση ηλιακών και μετεωρολογικών δεδομένων PVGIS και να «κατεβάσει» τα δεδομένα για τη συγκεκριμένη τοποθεσία.



Εικόνα 21 Προσδιορισμός τοποθεσίας για την εισαγωγή κλιματικών δεδομένων

Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται η καρτέλα «Building and Environment» είναι η πρώτη καρτέλα του BIMsolar όπου εκεί εμφανίζεται το 3D μοντέλο της κατοικίας που έχει εισαχθεί και η διαδρομή του ήλιου για όλο το χρόνο. Στην καρτέλα αυτή παρουσιάζονται

τα κλιματολογικά δεδομένα (weather data) που εξαρτώνται από την τοποθεσία (Ηράκλειο) τα οποία μπορούν να αλλαχθούν και να οριστούν για άλλη τοποθεσία. Επίσης, παρουσιάζεται η ζώνη ώρας (Time Zone), το γεωγραφικό πλάτος (Latitude) και το γεωγραφικό μήκος (Longitude) που βρίσκεται η κατοικία.

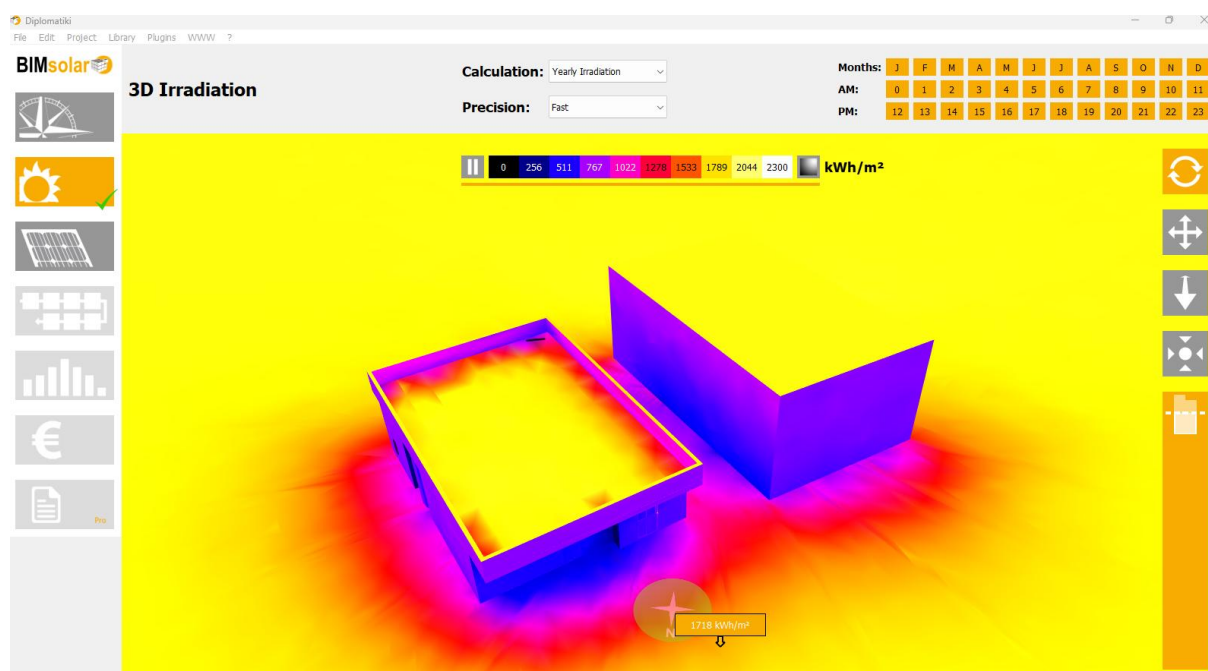


Εικόνα 22 Καρτέλα Building and Environment

Εάν το 3D μοντέλο έχει εισαχθεί με λάθος προσανατολισμό, το North offset δίνει τη δυνατότητα διόρθωσης του προσανατολισμού με βάση το Βορρά, η συγκεκριμένη κατοικία έχει σχεδιαστεί με σωστό προσανατολισμό και για αυτό τον λόγο η τιμή του North offset είναι μηδέν. Με το Ground Height μπορεί ο χρήστης να προσδιορίσει σε τι ύψος από το έδαφος βρίσκεται το κτίριο, η συγκεκριμένη κατοικία είναι ισόγεια, οπότε το Ground Height είναι μηδέν. Στο Current time δίνοντας ο χρήστης ημερομηνία και ώρα παρουσιάζεται η θέση του ήλιου για την συγκεκριμένη ημερομηνία και ώρα.

Τσεκάροντας το Display shadows το λογισμικό εμφανίζει τυχόν σκιάσεις που δημιουργούνται. Οπότε με ενεργοποιημένο το Display shadows και αλλάζοντας ημέρα και ώρα από το Current time ο χρήστης μπορεί να δει που δημιουργούνται σκιάσεις και ποιας έκτασης. Σε αυτήν την καρτέλα δίνεται και η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει το πόσο ανακλαστική είναι κάθε επιφάνεια (albedo) του 3D μοντέλου που εισήγαγε, στη συγκεκριμένη κατοικία όλες οι επιφάνειες έχουν τιμή albedo 50%. Ουσιαστικά αυτό που γίνεται στην πρώτη καρτέλα είναι η σωστή εισαγωγή των δεδομένων (κτίριο, κλιματολογικές συνθήκες, ανακλαστικότητα επιφάνειας κ.α.) ώστε στη συνέχεια να τοποθετηθούν ή ενσωματωθούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στη δεύτερη καρτέλα (3D Irradiation) Εικόνα 23 παρουσιάζεται η ακτινοβολία στις επιφάνειες του κτιρίου. Στο αναπτυσσόμενο menu του Calculation η πρώτη επιλογή (Yearly Irradiation) εκφράζει τη συνολική ακτινοβολία που δέχεται η κάθε επιφάνεια μέσα στο έτος και μετριέται σε kWh/m<sup>2</sup>. Η δεύτερη επιλογή (Average Daily Irradiation) εκφράζει το μέσο όρο της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται οι επιφάνειες του κτιρίου σε όλο το έτος και μετριέται σε Wh/m<sup>2</sup>. Η τρίτη επιλογή (Shading) δείχνει το πόσο συχνά εμποδίζεται η ακτινοβολία να φτάσει στη κάθε επιφάνεια (σκίαση) του κτιρίου με τιμές από 0% (μόνιμη σκιά) μέχρι 100% (καθόλου σκίαση). Η τέταρτη και τελευταία επιλογή (Direct Reception Ratio), εκφράζει το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας που καταφέρνει και φτάνει στις επιφάνειες του κτιρίου σε σχέση με τη διαθέσιμη από 0% (δε φτάνει καθόλου) μέχρι 100% (φτάνει όλη).



Εικόνα 23 Καρτέλα 3D Irradiation

Στον αναπτυσσόμενο menu του Precision η πρώτη επιλογή (fast) έχει μικρή ακρίβεια, αλλά κάνει γρήγορους υπολογισμούς. Η δεύτερη επιλογή (Balanced) έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, αλλά κάνει περισσότερη ώρα. Η τρίτη επιλογή (Accurate) προσφέρει τη μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύνθετα έργα, αλλά αργεί στους υπολογισμούς, δεν αποτελεί ιδανική επιλογή για μεγάλα έργα. Πάνω δεξιά υπάρχουν τα Months, AM, PM, που αποτελούν την περίοδο για την οποία πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει εάν θα είναι για όλο το έτος ή για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Όσον αφορά στη συγκεκριμένη κατοικία, επειδή δεν είναι μεγάλο έργο για να «κολλάει» το λογισμικό, οι υπολογισμοί έγιναν με την επιλογή Accurate. Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 (οι τιμές είναι στο περίπου).

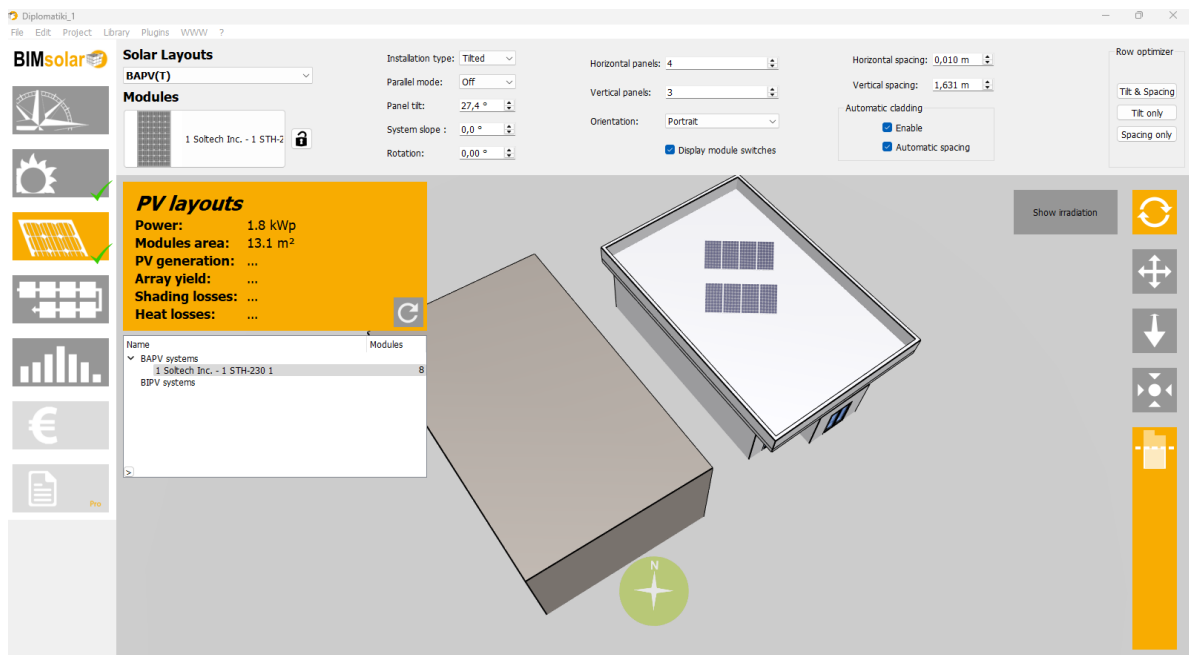
**Πίνακας 2 Accurate υπολογισμοί**

<b>Επιφάνεια</b>	<b>Προσανατολισμός</b>	<b>Yearly Irradiation (kWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Average Daily Irradiation (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Shading (%)</b>	<b>Direct Reception Ratio (%)</b>
Δώμα	Οριζόντιος	1600-1850	325-415	98-99	40-90
Τοίχος με κουφώματα	Νοτιοανατολικός	570-1270	75-280	25-100	3-67
Τοίχος με κουφώματα	Βορειοανατολικός	650-820	50-180	20-100	15-35
Τοίχος με κουφώματα	Βορειοδυτικός	520-780	120-170	35-100	7-27
Τοίχος	Νοτιοδυτικός	410-1154	100-240	50-100	20-55

Από τον πίνακα προκύπτει ότι, η επιφάνεια που δέχεται τη μεγαλύτερη συνολική ακτινοβολία (πάνω από 1800kWh/m<sup>2</sup> στην περισσότερη έκταση της επιφάνειας), το μεγαλύτερο μέσο όρο της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (πάνω από 400Wh/m<sup>2</sup> στην περισσότερη έκταση της επιφάνειας), από τα καλύτερα ποσοστά σκίασης (98-99%) και την περισσότερη άμεση ακτινοβολία είναι το δώμα (πάνω από 80% στην περισσότερη έκταση της επιφάνειας). Πολύ καλές τιμές, επίσης, παρουσιάζουν οι επιφάνειες που βρίσκονται ως επί το πλείστο στη Νοτιοανατολική πλευρά και έπειτα στην Βορειοανατολική. Οι επιφάνειες της Δυτικής πλευράς παρουσιάζουν μεν καλές τιμές αλλά είναι σε μικρό ποσοστό της επιφάνειας με τις χαμηλές τιμές να είναι στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας (λόγω σκίασης). Οι επιφάνειες του Βορρά παρουσιάζουν επίσης χαμηλές τιμές λόγω προσανατολισμού.

Στη τρίτη καρτέλα (Solar Layouts) Εικόνα 24 πραγματοποιείται η τοποθέτηση ή ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στις επιφάνειες του κτιρίου.





Εικόνα 24 Καρτέλα Solar Layouts

Στο αναπτυσσόμενο menu κάτω από το Solar Layouts ο χρήστης επιλέγει εάν τα φωτοβολταϊκά συστήματα που θα εισαχθούν θα τοποθετηθούν (BAPV) σε υφιστάμενο κτίριο ή θα ενσωματωθούν στο κτίριο (BIPV) αντικαθιστώντας δομικά υλικά. Αμέσως από κάτω στο Modules ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από τη βάση δεδομένων το φωτοβολταϊκό σύστημα που επιθυμεί για τοποθέτηση ή ενσωμάτωση στο κτίριο. Όταν ο χρήστης επιλέγει την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τότε εμφανίζονται τα παρακάτω:

- Installation type: ο χρήστης επιλέγει εάν τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα είναι τοποθετημένα επίπεδα στην επιφάνεια ή υπό κλίση.
- Parallel mode: ο χρήστης επιλέγει εάν τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα τοποθετηθούν παράλληλα στην επιφάνεια.
- Panel tilt: η κλίση που θα έχουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε σχέση με τον ορίζοντα, εάν ο χρήστης επιλέξει να τοποθετήσει τα φωτοβολταϊκά πάνελ υπό κλίση.
- System Slope: η κλίση που θα έχουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε σχέση με την επιφάνεια που θα εγκατασταθούν.
- Rotation: ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πάνελ από τον Νότο π.χ.  $20^0$  σημαίνει ότι τα πάνελ είναι γυρισμένα  $20^0$  Δυτικά.
- Horizontal panels: ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πάνελ ανά γραμμή
- Vertical panels: ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πάνελ ανά στήλη




- Orientation: ο χρήστης επιλέγει εάν τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα είναι τοποθετημένα κάθετα ή οριζόντια.
- Display module switches: Ο χρήστης μπορεί να αφαιρέσει φωτοβολταϊκά πάνελ από τη γραμμή ή από τη στήλη.
- Horizontal spacing: Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει την οριζόντια απόσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ.
- Vertical spacing: Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει την κάθετη απόσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ.
- Automatic cladding Enable Automatic spacing: Ο χρήστης ενεργοποιώντας τα, μπορεί να εφαρμόσει περιθώρια γύρω από την εγκατάσταση και να ρυθμίσει τις αποστάσεις ώστε να διασφαλίσει ότι τα πάνελ τοποθετούνται σωστά στην επιφάνεια
- Row optimizer Tilt & spacing Tilt only Spacing only: Ο χρήστης ενεργοποιώντας τα, μπορεί να βελτιστοποιήσει την κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ και την απόσταση μεταξύ τους ώστε να αποφύγει σκιάσεις εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη απόδοση.

Επίσης, ο χρήστης μέσα από το menu Library έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει δικό του φωτοβολταϊκό σύστημα και να το τοποθετήσει ή να το ενσωματώσει στο κτίριο.

Στη συγκεκριμένη κατοικία, αρχικά επιλέχτηκε το φωτοβολταϊκό πάνελ της Soltech μοντέλο STH ισχύος 230Wp, τεχνολογίας πυριτίου μονοκρυσταλλικό στην Εικόνα 25 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του.

<b>1 Soltech Inc. - 1 STH-230</b>	
Technology:	mono_Si
Peak power:	230 Wp
Size:	990x1652 mm
Cells:	6x10 (60)
Diodes:	1
NOCT:	45.0 °C
V <sub>oc</sub> :	36.9 V
V <sub>mpp</sub> :	28.8 V
I <sub>sc</sub> :	8.5 A
I <sub>mpp</sub> :	8.0 A
Bendable:	No
Backside gap editable:	No
Bifacial:	No

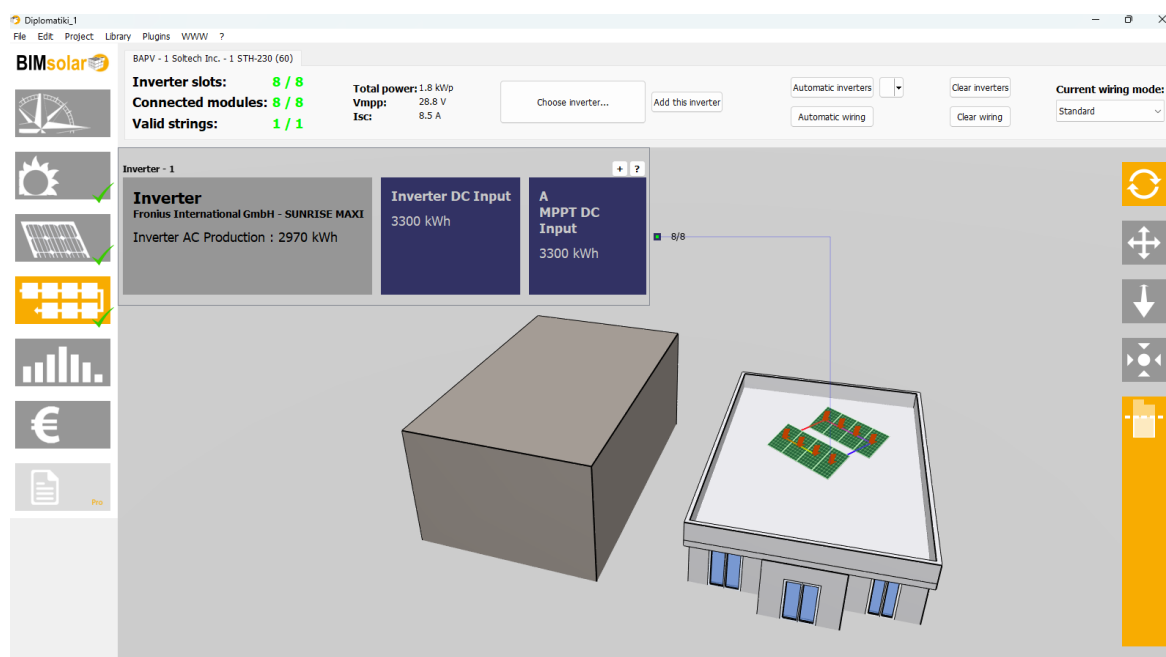


**Εικόνα 25 Soltech STH -230Wp**

Για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών αυτών πάνελ επιλέχτηκε το δώμα της κατοικίας που παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη συνολική ακτινοβολία. Πραγματοποιήθηκε η χωροθέτηση 8 φωτοβολταϊκών πάνελ Soltech STH-230Wp και η συνολική ισχύς ανέρχεται στα 1,8kWp. Ο προσανατολισμός του είναι Νότιος χωρίς απόκλιση, η γωνία

κλίσης των πάνελ και η απόσταση μεταξύ τους έχει βελτιστοποιηθεί (Row optimizer -Tilt & Spacing) στις 27,4<sup>0</sup>. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν τοποθετηθεί κάθετα (portait) με οριζόντια απόσταση μεταξύ τους 0,01m και κάθετη 1,631m και το Automatic cladding έχει ενεργοποιηθεί.

Στη τέταρτη καρτέλα επιλέγεται ο inverter που θα χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση και γίνεται η συρμάτωση των φωτοβολταϊκών πάνελ (Εικόνα 26).



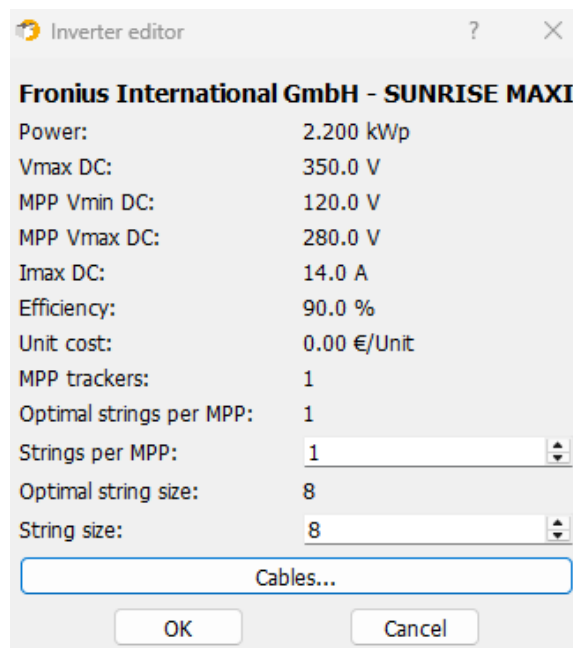
Εικόνα 26 Καρτέλα Inverters

Στο Inverter slots ο χρήστης μπορεί να δει τον αριθμό των θέσεων που είναι διαθέσιμες στον inverter καθώς και πόσα πάνελ έχουν συνδεθεί επιτυχώς μαζί του. Στο Connected modules ο χρήστης μπορεί να δει πόσα από τα πάνελ έχουν συνδεθεί με inverter. Στο Valid strings ο χρήστης μπορεί να δει πόσα από τα string (ορισμένος αριθμός πάνελ συνδεδεμένα σε σειρά) είναι εντός των ορίων ρεύματος και τάσης του inverter που έχει επιλεγεί. Στο Total power ο χρήστης μπορεί να δει τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το Vmpp (Voltage at maximum power point) είναι η τάση λειτουργίας του πάνελ όταν δουλεύει στη μέγιστη ισχύ του υπό συγκεκριμένες συνθήκες (Kongkanjana & Khwan, 2022). Το Isc (Short-Circuit Current) είναι το μέγιστο ρεύμα όταν τα άκρα του φωτοβολταϊκού πάνελ βραχυκυκλωθούν (Diaz, Luna & Duarte, 2011). Στο Choose inverter ο χρήστης μπορεί να επιλέξει χειροκίνητα τον inverter που θέλει να χρησιμοποιήσει από μία μεγάλη βάση δεδομένων, αφού επιλέξει τον inverter που θέλει τον προσθέτει με το πάτημα του κουμπιού Add this inverter. Εναλλακτικά, η επιλογή του inverter γίνεται αυτόματα από το λογισμικό με το πάτημα του κουμπιού Automatic

inverters, δίνεται επίσης η δυνατότητα να οριστούν και ορισμένα φίλτρα για την αυτόματη επιλογή (π.χ. φίλτρο για την ισχύ του).

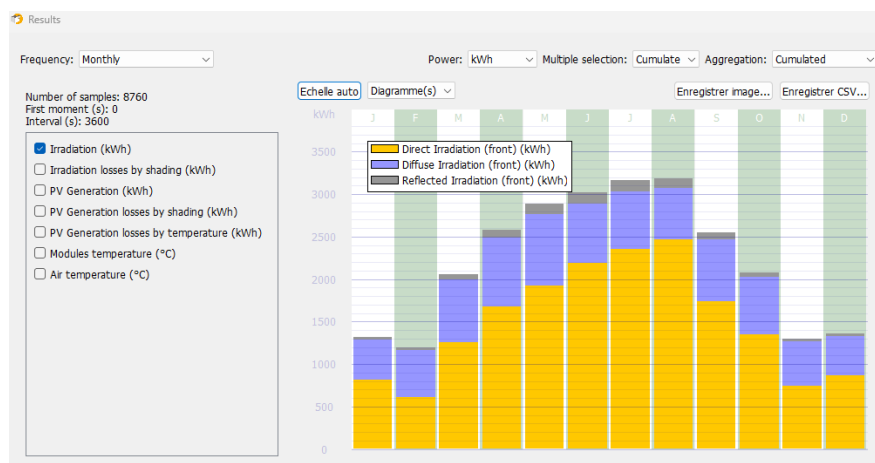
Το Automatic wiring δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει αυτόματα τα strings και να τα συνδέσει στον inverter. Τα κουμπιά clear inverters και clear wiring διαγράφουν τους inverters και τις καλωδιώσεις που έχουν δημιουργηθεί. Από το current wiring mode ο χρήστης μπορεί να επιλέξει για το ποια πάνελ θα συνδεθούν σε ποια strings και αυτό γίνεται είτε αυτόματα από το λογισμικό (standard), είτε χειροκίνητα από το χρήστη (Free). Επίσης, ο χρήστης μέσα από το menu Library έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει τον δικό του inverter και να χρησιμοποιήσει αυτόν.

Για τη συγκεκριμένη κατοικία ο inverter, η καλωδίωση και το current wiring mode επιλέχτηκαν όλα να γίνουν αυτόματα. Ο inverter που επέλεξε το λογισμικό είναι ο Fronius International GmbH-SUNRISE MAXI ισχύος 2,2kWp, στην Εικόνα 27 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του. Η καλωδίωση και το current wiring mode έγιναν αυτόματα με αποτέλεσμα τη δημιουργία 1 string και για τα 8 φωτοβολταϊκά πάνελ. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, ο inverter δέχεται στην είσοδο ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ίση με 3300kwh DC και δίνει στην έξοδο του 2970kwh AC.

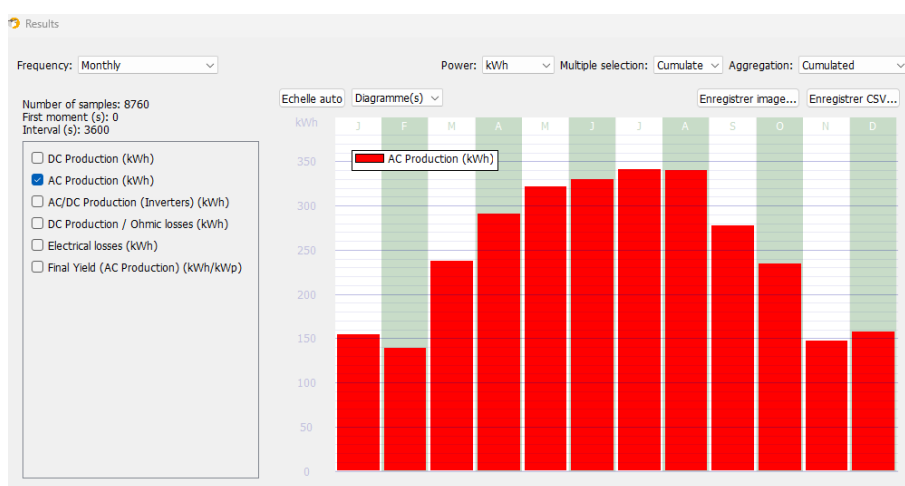


**Εικόνα 27 Fronius International GmbH-SUNRISE MAXI**

Στην πέμπτη καρτέλα (Results-Metrics) παρουσιάζονται τα καιρικά δεδομένα (Display weather data) της περιοχής που έχει επιλεγεί στην καρτέλα 1 και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αποτελέσματα για τα φωτοβολταϊκά πλαόσια (Εικόνα 28) και αποτελέσματα για τον ή τους inverter που έχουν επιλεγεί βλ. Εικόνα 29.



**Εικόνα 28 Καρτέλα για τα αποτελέσματα των φωτοβολταϊκών πάνελ**



**Εικόνα 29 Καρτέλα για τα αποτελέσματα των inverters**

Το λογισμικό μπορεί να δώσει αποτελέσματα με χρονική ανάλυση (Frequency), με επιλογές, συνολικά δεδομένα ανά μήνα (month), με το μέσο όρο των ημερήσιων τιμών ανά μήνα (Average daily by month), καθημερινά (Daily), ωριαία (Hourly), ανάλυση με μικρό χρονικό βήμα (Smallest time step) και την κατανομή (Repartition). Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι σε μορφή διαγράμματος (Diagramme(s)) με αυτόματη επιλογή για αυτόματη προσαρμογή των ορίων των αξόνων (echelle auto) ή σε μορφή πίνακα, σε kWh ή kWh/m<sup>2</sup>. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα της πολλαπλής επιλογής (Multiple Selection), όπου ο χρήστης μπορεί να συσσωρεύσει (Cumulate) δεδομένα ή να συγκρίνει δεδομένα (Compare). Επίσης, μπορεί να ομαδοποιήσει και να συνοψίσει τα δεδομένα (Aggregation) είτε αθροιστικά (Cumulated), είτε το μέσο όρο ανά ώρα (Average per hour). Τέλος, μπορεί να τα εξάγει είτε σε εικόνα (Enregistrer image), είτε σε αρχείο .csv (Enregistrer csv).

Τα αποτελέσματα που δίνει από την προσομοίωση για τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι:

- Irradiation (kWh): Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια των πάνελ.

- Irradiation losses by shading (kWh): Απώλειες ακτινοβολίας λόγω σκιάσεων.
- PV Generation (kWh): Η παραγωγή ενέργειας από τα πάνελ.
- PV Generation losses by shading (kWh): Απώλειες παραγωγής ενέργειας λόγω σκιάσεων.
- PV Generation losses by temperature (kWh): Απώλειες παραγωγής ενέργειας λόγω υψηλής θερμοκρασίας (μείωση απόδοσης των πάνελ).
- Modules temperature (°C): Η θερμοκρασία των πάνελ.
- Air temperature (°C): Η θερμοκρασία αέρα.

Τα αποτελέσματα που δίνει από την προσομοίωση για τους inverters είναι:

- DC Production (kWh) : Η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε μορφή συνεχούς ρεύματος (DC).
- AC Production (kWh): Είναι η τελική παραγωγή ενέργειας που έχει μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) από τον inverter.
- AC/DC Production (Inverters) (kWh): Αφορά την ενέργεια που περνά από τον inverter (DC/AC).
- DC Production / Ohmic losses (kWh): Η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε μορφή συνεχούς ρεύματος (DC)/ ωμικές απώλειες (δηλ. λόγω αντίστασης καλωδίων και υλικών) στο κύκλωμα DC.
- Electrical losses (kWh): Οι ηλεκτρικές απώλειες, από inverter, καλώδια, μετασχηματιστές, κ.λπ.
- Final Yield (AC Production) (kWh/kWp): Η ενέργεια που παράχθηκε ανά εγκατεστημένο kWp.

Για τη συγκεκριμένη κατοικία, στην Εικόνα 30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα φωτοβολταϊκά πάνελ (οι δύο τελευταίες στήλες που αφορούν θερμοκρασίες είναι για Aggregation-Average per hour, οι υπόλοιπες Cumulated) και στην Εικόνα 31 τα αποτελέσματα για τον inverter.

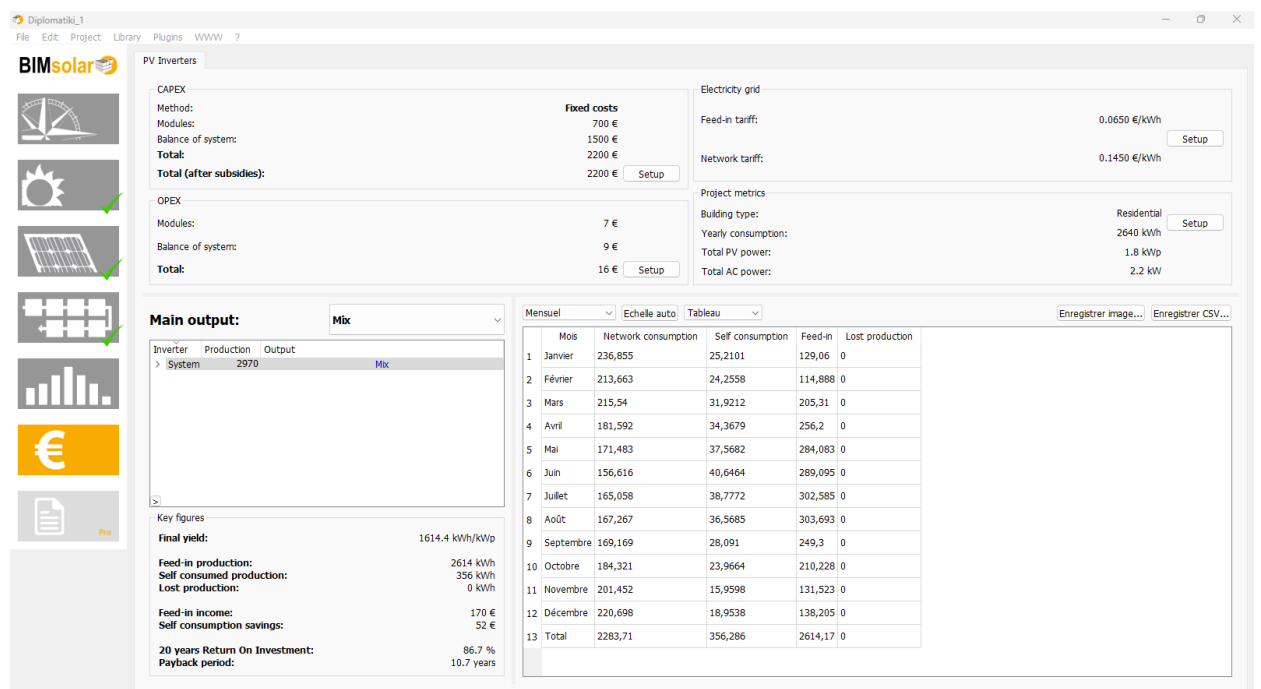
Μήνας	Direct Irradiation (front) (kWh)	Diffuse Irradiation (front) (kWh)	Reflected Irradiation (front) (kWh)	Irradiation (front) (kWh)	Shading losses (front) (kWh)	PV Generation (front) (kWh)	Production (kWh)	Shading losses (kWh)	Production (kWh)	Heat loss (kWh)	Module temperature (°C)	Air temperature (°C)
Ιανουάριος	814,657	472,42	27,617	1314,693	39,65	172,772	172,772	5,293	172,772	12,116	13,921	10,36
Φεβρουάριος	609,102	552,801	31,92	1193,823	20,694	155,832	155,832	2,741	155,832	12,058	13,95	10,369
Μάρτιος	1255,53	738,748	61,412	2055,69	21,387	265,682	265,682	2,829	265,682	23,412	18,226	12,658
Απρίλιος	1673,417	814,447	94	2581,863	3,414	325,415	325,415	0,436	325,415	37,676	24,51	17,283
Μάιος	1927,341	839,234	123,926	2890,501	0,093	360,226	360,226	0,012	360,226	46,269	27,775	19,946
Ιούνιος	2187,671	699,674	135,312	3022,657	0	369,287	369,287	0	369,287	55,794	32,233	23,773
Ιούλιος	2351,406	677,691	135,697	3164,793	0	382,301	382,301	0	382,301	62,768	34,915	26,342
Αύγουστος	2466,104	607,091	114,71	3187,906	3,151	381,068	381,068	0,386	381,068	67,251	36,142	27,507
Σεπτέμβριος	1741,832	724,775	81,418	2548,025	13,548	310,658	310,658	1,697	310,658	47,674	31,756	24,624
Οκτώβριος	1353,326	668,559	54,448	2076,334	35,121	262,281	262,281	4,524	262,281	29,717	24,142	18,518
Νοέμβριος	739,295	524,868	29,858	1294,022	36,26	165,17	165,17	4,711	165,17	16,81	19,538	15,916
Δεκέμβριος	865,229	465,288	26,527	1357,044	56,252	176,006	176,006	7,42	176,006	14,837	17,385	13,71
Toatal	17984,91	7785,596	916,845	26687,351	229,57	3326,698	3326,698	30,049	3326,698	426,382		

**Εικόνα 30 Ενεργειακά αποτελέσματα για φωτοβολταϊκά πάνελ 1ο σενάριο**

Μήνας	DC Production (kWh)	AC Production (kWh)	DC to AC loss (kWh)	Ohmic losses (kWh)	DC Inverter In (kWh)	Mismatch losses (kWh)	Ohmic losses (kWh)	Final yield (kWh/kWp)
Ιανουάριος	171,411	154,27	17,141	1,36	171,411	-1,92E-06	1,36	83,842
Φεβρουάριος	154,605	139,144	15,46	1,227	154,605	-6,07E-07	1,227	75,622
Μάρτιος	263,591	237,232	26,359	2,092	263,591	-4,48E-07	2,092	128,93
Απρίλιος	322,853	290,568	32,285	2,562	322,853	1,31E-07	2,562	157,917
Μάιος	357,39	321,651	35,739	2,836	357,39	8,32E-07	2,836	174,81
Ιούνιος	366,379	329,741	36,638	2,907	366,379	6,00E-07	2,907	179,207
Ιούλιος	379,291	341,362	37,929	3,01	379,291	-2,01E-06	3,01	185,523
Αύγουστος	378,068	340,262	37,807	3	378,068	1,37E-06	3	184,925
Σεπτέμβριος	308,212	277,391	30,821	2,446	308,212	-5,25E-07	2,446	150,756
Οκτώβριος	260,216	234,195	26,022	2,065	260,216	1,58E-06	2,065	127,28
Νοέμβριος	163,87	147,483	16,387	1,3	163,87	1,04E-06	1,3	80,154
Δεκέμβριος	174,621	157,159	17,462	1,386	174,621	-4,86E-07	1,386	85,412
Total	3300,507	2970,458	330,05	26,191	3300,507	-4,50E-07	26,191	1614,378

Εικόνα 31 Ενεργειακά αποτελέσματα του inverter 1ο σενάριο

Στη τελευταία καρτέλα του BIMsolar γίνεται η οικονομοτεχνική ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος Εικόνα 32.



Εικόνα 32 Καρτέλα οικονομοτεχνικής ανάλυσης

Ο χρήστης μπορεί να ορίσει χειροκίνητα ή αυτόματα το αρχικό κόστος εγκατάστασης (CAPEX), δίνοντας ξεχωριστά τις τιμές για τα φωτοβολταϊκά πάνελ και ξεχωριστά για τα υπόλοιπα. Στο OPEX ο χρήστης δίνει το ετήσιο κόστος συντήρησης (OPEX), δίνοντας ξεχωριστά τις τιμές για τα φωτοβολταϊκά πάνελ και ξεχωριστά για τα υπόλοιπα. Στο Electricity grid μπορεί να ορίσει την τιμή που έχει συμφωνήσει να πουλάει την περίσσια ενέργεια (Feed-in Tariff) και την τιμή για αγορά ενέργειας (Network Tariff).

Στο project metrics ο χρήστης δίνει τον τύπο του κτιρίου που είναι εγκατεστημένο το φωτοβολταϊκό σύστημα, τη συνολική επιφάνεια του κτιρίου και την κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο, από την οποία προκύπτει και η συνολική ετήσια κατανάλωση.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από το Main output το ενεργειακό και οικονομικό μοντέλο βάση του οποίου προκύπτουν τα αποτελέσματα. Υπάρχουν τρεις επιλογές:

- Feed in: Η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα πωλείται όλη στο δίκτυο, χωρίς το κτίριο να χρησιμοποιεί καθόλου από αυτή.
- Self Consumption: Η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τις ανάγκες του κτιρίου χωρίς να πωλείται τίποτα στο δίκτυο.
- Mix: Η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιείται για τις ανάγκες του κτιρίου και η περίσσια πωλείται στο δίκτυο.

Το λογισμικό με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζει ορισμένους δείκτες (key figures). Ο Πρώτος δείκτης που υπολογίζεται είναι η απόδοση του συστήματος ανά εγκατεστημένο kWp (Final yield). Έπειτα υπολογίζει πόση από την παραγόμενη ενέργεια πωλείται στο δίκτυο (Feed-in production) και πόση χρησιμοποιείται για ιδιοκατανάλωση (Self consumed production), καθώς και για τυχόν απώλειες της παραγωγής (Lost production). Υπολογίζει τα έσοδα από την πώληση της ενέργειας στο δίκτυο (Feed-in income) με βάση την τιμή που έχει ορίσει στο Electricity grid και την εξοικονόμηση από την ιδιοκατανάλωση (Self consumption savings). Επίσης, υπολογίζει πόση είναι η απόδοση της επένδυσης σε βάθος 20ετίας (20 years Return on Investment) και το χρόνο που η επένδυση θα κάνει απόσβεση (Payback period). Τέλος, το λογισμικό μπορεί να δώσει αποτελέσματα με χρονική ανάλυση, με επιλογές, μηνιαία (Mensuel), το μέσο όρο των ημερήσιων τιμών ανά μήνα (Quotidien moyen), ημερήσια (Quotidien), ωριαία (Horaire) και την κατανομή (Répartition).

Για τη συγκεκριμένη κατοικία, το συνολικό κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών συστημάτων προστέθηκε χειροκίνητα και υπολογίστηκε στα 2200€, όπου τα 700€ αφορούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τα 1500€ τα υπόλοιπα (inverter, βάσεις καλωδιώσεις κ.α.). Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμήθηκε σε 16€ (4€/kWp και για τα φωτοβολταϊκά πάνελ και για τα υπόλοιπα). Η τιμή πώλησης της kWh στο δίκτυο ορίστηκε στα 0,065 €/kWh και η τιμή αγοράς από το δίκτυο στα 0,145 €/kWh. Η κατοικία καταναλώνει 2640kWh περίπου το χρόνο.

Τα αποτελέσματα:

- Final yield= 1614,4 kWh/kWp
- Feed-in production= 2614kWh
- Self consumed production= 356kWh
- Lost production= 0 kWh
- Feed-in income= 170€
- Self consumption savings= 52€
- 20 years Return on Investment= 86,7%
- Payback period= 10,7 years

Συνοπτικά, η τοποθέτηση 8 πάνελ ισχύος 1.84 kWp στο δώμα της κατοικίας παρήγαγε 2.970 kWh ετησίως (AC) με final yield 1.614 kWh/kWp. Παρά τη μικρή εγκατεστημένη ισχύ, η υψηλή απορρόφηση ακτινοβολίας στο δώμα οδήγησε σε υψηλό βαθμό απόδοσης. Το payback period ~11 έτη θεωρείται ικανοποιητικό υπό τις τρέχουσες τιμές ενέργειας.

#### **5.2.3.2 2<sup>ο</sup> σενάριο**

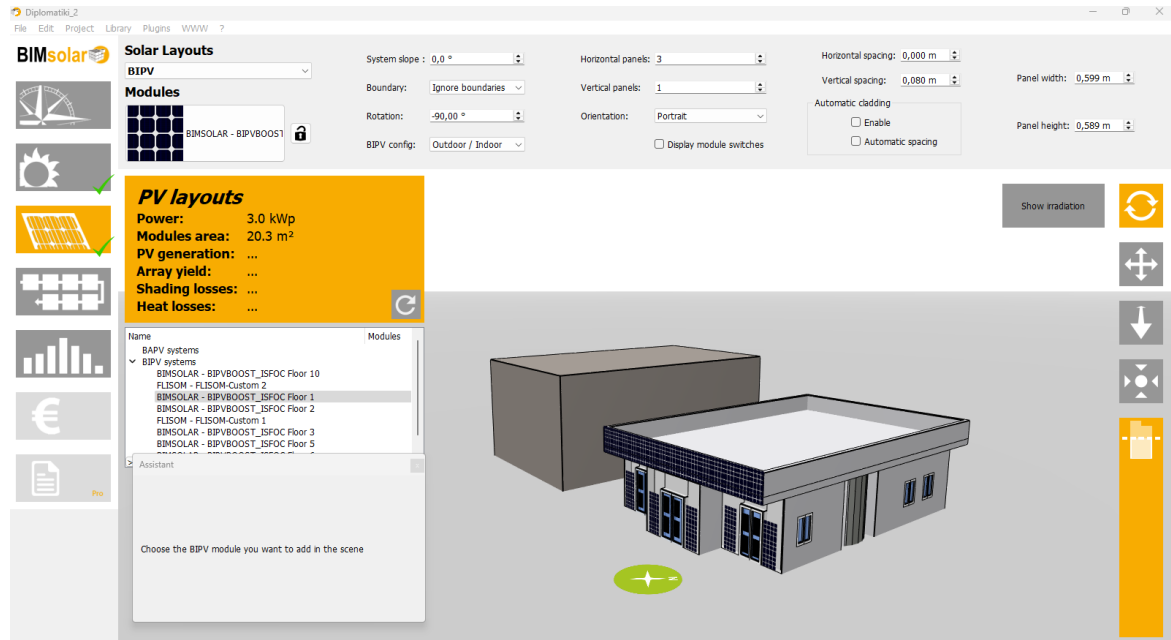
Στο δεύτερο σενάριο για την κατοικία, οι δύο πρώτες καρτέλες έχουν τα ίδια δεδομένα και αποτελέσματα με το πρώτο σενάριο. Από την τρίτη καρτέλα τα δεδομένα αλλάζουν, αυτή τη φορά θα γίνει ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο κτίριο (BIPV systems).

Στην τρίτη καρτέλα όταν ο χρήστης επιλέγει να ενσωματώσει τα φωτοβολταϊκά (BIPV) τότε οι επιλογές στο Solar layouts αλλάζουν. Υπάρχει το System slope όπου επιλέγεται η κλίση τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού συστήματος, το Boundary όπου μπορεί ο χρήστης να επιλέξει να μη λαμβάνονται υπόψη τα όρια της πρόσοψης και το BIPV config όπου ο χρήστης επιλέγει πως θα τοποθετηθεί το φωτοβολταϊκό πάνελ (όλο εξωτερικά ή και εξωτερικά και εσωτερικά).

Το σημείο που επιλέχτηκε για την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η μεριά με Νοτιοανατολικό προσανατολισμό. Πιο συγκεκριμένα ενσωματώνονται φωτοβολταϊκά συστήματα στην πρόσοψη και στους υαλοπίνακες των κουφωμάτων Εικόνα 33. Για την πρόσοψη χρησιμοποιήθηκε το πάνελ BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono\_si Εικόνα 34, που αν και είναι «περπατήσιμο» φωτοβολταϊκό μπορεί να ενσωματωθεί πολύ καλά και σε προσόψεις, επιλέχτηκε λόγω των διαστάσεών του. Για τα κουφώματα και συγκεκριμένα για τους υαλοπίνακες των κουφωμάτων λόγω διαστάσεων, δημιουργήθηκε



ένα φωτοβολταϊκό τεχνολογίας λεπτών υμενίων (thin-film) Εικόνα 35, με βάση το εύκαμπτο φωτοβολταϊκό FLIMSOL-X1a. Για την πρόσοψη χρειάστηκαν 48 πάνελ BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono<sub>si</sub> και για τους υαλοπίνακες των πορτών 12 πάνελ thin-film. Η συνολική ισχύς ανέρχεται στα 3 kWp.



Εικόνα 33 Φωτοβολταϊκά σε πρόσοψη και κουφώματα

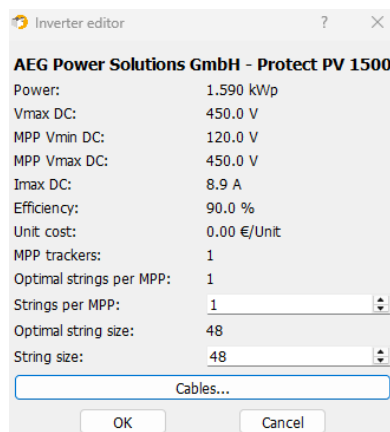
<b>1-2</b>	
<b>Supplier:</b>	BIMSOLAR
<b>Model:</b>	BIPVBOOST_ISOFC Floor
<b>Technology:</b>	mono <sub>Si</sub>
<b>Peak power:</b>	56 Wp
<b>Size:</b>	599x589 mm
<b>Area:</b>	0.35 m <sup>2</sup>
<b>Cells:</b>	16
<b>Occupancy:</b>	110.4 %
<b>NOCT:</b>	45.0 °C
<b>V<sub>oc</sub>:</b>	9.6 V
<b>V<sub>mpp</sub>:</b>	8.0 V
<b>I<sub>sc</sub>:</b>	5.4 A
<b>I<sub>mpp</sub>:</b>	8.0 A
<b>Glazing:</b>	Standard - Single glazing
<b>Glazing U:</b>	5.478 W/K/m <sup>2</sup>
<b>Solar factor:</b>	46.5 %
<b>Lighting transmittance:</b>	65.7 %
<b>Cost (€/Unit):</b>	105.843 €/Unit
<b>Cost (€/m<sup>2</sup>):</b>	300.000 €/m <sup>2</sup>
<b>Bifacial:</b>	No

Εικόνα 34 BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono<sub>si</sub>

<b>2-2</b>	
<b>Supplier:</b>	FLISOM
<b>Model:</b>	FLISOM-Custom
<b>Technology:</b>	CIGS
<b>Peak power:</b>	28 Wp
<b>Size:</b>	747x373 mm
<b>Area:</b>	0.28 m <sup>2</sup>
<b>Cells:</b>	1
<b>Occupancy:</b>	99.1 %
<b>NOCT:</b>	45.0 °C
<b>V<sub>oc</sub>:</b>	47.0 V
<b>V<sub>mpp</sub>:</b>	35.0 V
<b>I<sub>sc</sub>:</b>	0.9 A
<b>I<sub>mpp</sub>:</b>	8.0 A
<b>Glazing:</b>	None
<b>Cost (€/Unit):</b>	56.000 €/Unit
<b>Cost (€/m<sup>2</sup>):</b>	200.983 €/m <sup>2</sup>
<b>Bifacial:</b>	No

**Εικόνα 35 FLIMSOL-X1a Custom**

Στην τέταρτη καρτέλα όπως και στο πρώτο σενάριο επιλέγονται οι inverters και πραγματοποιείται η καλωδίωση των φωτοβολταϊκών πάνελ με τους inverters. Το λογισμικό επέλεξε αυτόματα τους inverters και την καλωδίωση (strings) που χρησιμοποιήθηκαν όπως και στο πρώτο σενάριο. Για τα 48 πάνελ BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono\_si το λογισμικό επέλεξε τον inverter AEG Power Solutions GmbH-Protect PV με ισχύ 1,59kWp Εικόνα 36, και δημιουργήθηκαν 1 string με όλα τα πάνελ. Για τα υπόλοιπα 12 πάνελ το λογισμικό επέλεξε τον inverter Phillips Lighting B.V.-EVO 300 με ισχύ 0,32 kWp Εικόνα 37, και δημιουργήθηκε 4 strings με 3 πάνελ το καθένα. Ο inverter AEG Power Solutions GmbH-Protect PV δέχεται στην είσοδο ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ίση με 2883 kwh DC και δίνει στην έξοδο του 2490kwh AC, ο inverter Phillips Lighting B.V.-EVO 300 δέχεται στην είσοδο ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ίση με 300kwh DC και δίνει στην έξοδο του 270kwh AC. Συνολική ενέργεια εξόδου και από τους δύο inverters 2760 kwh AC.



**Εικόνα 36 AEG Power Solutions GmbH-Protect PV**

**Inverter editor**

**Philips Lighting B.V. - EVO 300**

Power: 0.320 kWp

Vmax DC: 135.0 V

MPP Vmin DC: 45.0 V

MPP Vmax DC: 135.0 V

Imax DC: 5.0 A

Efficiency: 90.0 %

Unit cost: 0.00 €/Unit

MPP trackers: 1

Optimal strings per MPP: 4

Strings per MPP: 4

Optimal string size: 3

String size: 3

Cables...

OK Cancel

**Εικόνα 37 Phillips Lighting B.V.-EVO 300**

Στην πέμπτη καρτέλα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης (όπως και στο πρώτο σενάριο) από την προσομοίωση που πραγματοποίησε το λογισμικό.

Στην Εικόνα 38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ (η τελευταία στήλη που αφορά θερμοκρασίες είναι για Aggregation-Average per hour, οι υπόλοιπες Cumulated) και στην Εικόνα 39 τα αποτελέσματα για τους δύο inverters μαζί.

Μήνας	Direct Irradiation (front) (kWh)	Diffuse Irradiation (front) (kWh)	Reflected Irradiation (front) (kWh)	Irradiation (front) (kWh)	Shading losses (front) (kWh)	PV Generation (front) (kWh)	Production (kWh)	Shading losses (kWh)	Production (kWh)	Heat loss (kWh)	Module temperature (°C)
Ιανουάριος	1002,864	497,447	156,442	1656,753	43,402	240,252	240,252	6,34	240,252	8,216	14,561
Φεβρουάριος	623,073	505,055	154,903	1283,031	33,04	183,196	183,196	4,8	183,196	8,75	14,479
Μάρτιος	994,103	665,265	287,804	1947,17	84,801	279,555	279,555	12,204	279,555	11,864	16,019
Απρίλιος	921,495	672,199	414,928	2008,622	148,238	284,676	284,676	20,338	284,676	16,7	19,174
Μάιος	794,066	659,682	514,963	1968,712	188,633	275,078	275,078	24,915	275,078	21,412	21,021
Ιούνιος	779,249	553,093	533,469	1865,811	210,186	256,849	256,849	27,207	256,849	24,588	24,073
Ιούλιος	877,901	561,744	580,185	2019,83	219,869	276,665	276,665	28,427	276,665	27,81	26,294
Αύγουστος	1193,466	562,787	572,896	2329,15	218,326	321,55	321,55	28,521	321,55	28,596	27,202
Σεπτέμβριος	1206,458	657,233	385,828	2249,518	135,661	313,933	313,933	18,266	313,933	22,742	24,984
Οκτώβριος	1280,839	677,969	276,275	2235,083	87,552	318,983	318,983	12,222	318,983	14,696	19,898
Νοέμβριος	832,013	524,74	159,475	1516,227	40,769	215,317	215,317	5,657	215,317	11,049	17,902
Δεκέμβριος	1168,097	526,658	157,975	1852,729	45,583	268,053	268,053	6,502	268,053	9,018	16,607
Total	11673,624	7063,872	4195,143	22932,636	1456,06	3234,107	3234,107	195,399	3234,107	205,441	

**Εικόνα 38 Ενεργειακά αποτελέσματα για φωτοβολταϊκά πάνελ 2ο σενάριο**

Μήνας	DC Production (kWh)	AC Production (kWh)	AC Production (kWh)	DC to AC loss (kWh)	DC Production (kWh)	Ohmic losses (kWh)	DC Inverter In	Mismatch losses	Ohmic losses	Final yield (kWh/kWp)
Ιανουάριος	236,573	192,954	192,954	43,619	236,573	3,679	236,573	1,45E-06	3,679	63,934
Φεβρουάριος	180,39	153,686	153,686	26,703	180,39	2,807	180,39	-2,04E-06	2,807	50,923
Μάρτιος	275,268	233,108	233,108	42,16	275,268	4,287	275,268	-1,79E-06	4,287	77,239
Απρίλιος	280,298	248,806	248,806	31,492	280,298	4,378	280,298	-3,73E-07	4,378	82,441
Μάιος	270,836	243,752	243,752	27,084	270,836	4,242	270,836	3,46E-06	4,242	80,766
Ιούνιος	252,883	227,595	227,595	25,288	252,883	3,966	252,883	-6,69E-07	3,966	75,412
Ιούλιος	272,395	245,155	245,155	27,239	272,395	4,271	272,395	-1,16E-06	4,271	81,231
Αύγουστος	316,596	284,768	284,768	31,828	316,596	4,954	316,596	2,57E-06	4,954	94,356
Σεπτέμβριος	309,11	272,327	272,327	36,784	309,11	4,823	309,11	-4,01E-06	4,823	90,234
Οκτώβριος	314,091	263,503	263,503	50,588	314,091	4,892	314,091	-1,49E-06	4,892	87,311
Νοέμβριος	212,017	178,477	178,477	33,54	212,017	3,3	212,017	-2,50E-06	3,3	59,137
Δεκέμβριος	263,947	217,031	217,031	46,915	263,947	4,106	263,947	-3,10E-07	4,106	71,912
Total	3184,404	2761,162	2761,162	423,24	3184,404	49,705	3184,404	-6,873E-06	49,705	914,896

**Εικόνα 39 Ενεργειακά αποτελέσματα των inverters 2ο σενάριο**

Στη τελευταία καρτέλα της οικονομοτεχνικής μελέτης, για την κατοικία, το συνολικό κόστος κατασκευής προστέθηκε χειροκίνητα και υπολογίστηκε στα 7000€, όπου

τα 5000€ αφορούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τα 2000€ τα υπόλοιπα (inverter, βάσεις καλωδιώσεις κ.α.). Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμήθηκε σε 20€ (4€/kWp και για τα φωτοβολταϊκά πάνελ και για τα υπόλοιπα). Τα υπόλοιπα παραμένουν ίδια όπως και στο πρώτο σενάριο. Τα αποτελέσματα

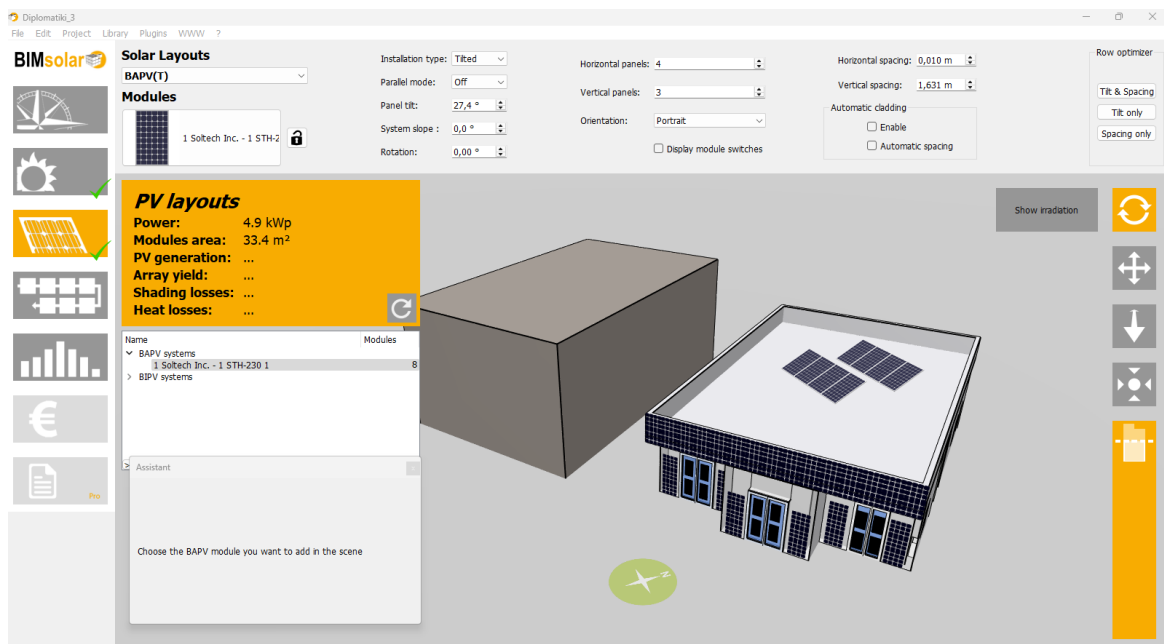
- Final yield= 914,9 kWh/kWp
- Feed-in production= 2189kWh
- Self consumed production= 572kWh
- Lost production= 0 kWh
- Feed-in income= 142€
- Self consumption savings= 83€
- 20 years Return on Investment= -41,3%
- Payback period= 20 years

Συνοπτικά, στο 2ο σενάριο ενσωμάτωσης 60 πάνελ (συνολικής ισχύος 3 kWp) σε πρόσοψη και κουφώματα της κατοικίας, η παραγόμενη ενέργεια έφτασε τις 2.760 kWh ετησίως (AC). Η τελική απόδοση (final yield) ήταν 914,9 kWh/kWp, χαμηλότερη σε σύγκριση με το σενάριο τοποθέτησης στο δώμα, λόγω αυξημένων απωλειών και μικρότερης ηλιακής πρόσπτωσης. Το κόστος εγκατάστασης ήταν υπερδιπλάσιο, ενώ ο χρόνος απόσβεσης αγγίζει τα 20 έτη, με αρνητικό ROI στη 20ετία, γεγονός που καθιστά την επένδυση οικονομικά μη βιώσιμη υπό τις παρούσες συνθήκες.

### 5.2.3.3 3<sup>ο</sup> σενάριο

Το τρίτο σενάριο για την κατοικία είναι ο συνδυασμός των δύο πρώτων σεναρίων. Οπότε οι δύο πρώτες καρτέλες έχουν τα ίδια δεδομένα και αποτελέσματα με τα προηγούμενα σενάρια. Από την τρίτη καρτέλα τα δεδομένα αλλάζουν, αυτή τη φορά θα γίνει και τοποθέτηση και ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο κτίριο (BAPV και BIPV systems).

Τα σημεία που επιλέχτηκαν για την ενσωμάτωση και την τοποθέτηση δεν αλλάζουν, η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα γίνει Νοτιοανατολικά και η τοποθέτηση στο δώμα Εικόνα 40. Στην πρόσοψη ενσωματώθηκαν 48 πάνελ BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono\_si, και για να καλυφθούν οι πόρτες 12 πάνελ thin-film. Η συνολική ισχύς ανέρχεται στα 3,06 kWp και για το δώμα χρειάστηκαν 8 πάνελ STH-230Wp. Η συνολική ισχύς ανέρχεται στα 1,84 kWp.



Εικόνα 40 Φωτοβολταϊκά σε δώμα, σε πρόσοψη και κουφώματα

Στη τέταρτη καρτέλα όπως και στα προηγούμενα σενάρια επιλέγονται οι inverters και πραγματοποιείται η καλωδίωση των φωτοβολταϊκών πάνελ με τους inverters. Το λογισμικό επέλεξε αυτόματα τους inverters και την καλωδίωση (strings) που χρησιμοποιήθηκαν. Για τα 48 πάνελ BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono\_si το λογισμικό επέλεξε τον inverter AEG Power Solutions GmbH-Protect PV με ισχύ 1,59kWp και δημιουργήθηκαν 1 string με όλα τα πάνελ και για τα 12 πάνελ το λογισμικό επέλεξε τον inverter Phillips Lighting B.V.-EVO 300 με ισχύ 0,32 kWp και δημιουργήθηκαν 4 strings με 3 πάνελ το καθένα. Για τα 8 πάνελ Soltech STH 230Wp, ο inverter που επέλεξε το λογισμικό είναι ο Fronius International GmbH-SUNRISE MAXI ισχύος 2,2kWp, δέχεται στην είσοδο ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ίση με 3300kwh DC και δίνει στην έξοδο του 2970kwh AC. Ο inverter AEG Power Solutions GmbH-Protect PV για τα 48 BIPVBOOST ISOFOC FLOOR δέχεται στην είσοδο ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ίση με 2883 kwh DC και δίνει στην έξοδο του 2490kwh AC. Ο inverter Phillips Lighting B.V.-EVO 300 για τα 12 FLIMSOL-X1a Custom δέχεται στην είσοδο ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ίση με 300kwh DC και δίνει στην έξοδο του 270kwh AC. Συνολική ενέργεια εξόδου και από τους τρεις inverters 5731 kwh AC.

Στην πέμπτη καρτέλα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης (όπως και στα προηγούμενα σενάρια) από την προσομοίωση που πραγματοποίησε το λογισμικό. Στην Εικόνα 41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ (η τελευταία στήλη που αφορά θερμοκρασίες είναι για

Aggregation-Average per hour, οι υπόλοιπες Cumulated) και στην Εικόνα 42 τα αποτελέσματα και για τους τρεις inverters μαζί.

Μήνας	Direct Irradiation (front) (kWh)	Diffuse Irradiation (front) (kWh)	Reflected Irradiation (front) (kWh)	Irradiation (front) (kWh)	Shading losses (front) (kWh)	PV Generation (front) (kWh)	Production (kWh)	Shading losses (kWh)	Production (kWh)	Heat loss (kWh)	Module temperature (°C)
Ιανουάριος	1817,521	969,867	184,056	2971,443	83,052	413,023	413,023	11,633	413,023	20,332	14,31
Φεβρουάριος	1232,176	1057,857	186,823	2476,856	53,734	339,028	339,028	7,54	339,028	20,808	14,271
Μάρτιος	2249,633	1404,021	349,222	4002,877	106,188	545,24	545,24	15,033	545,24	35,276	16,884
Απρίλιος	2594,913	1486,649	508,94	4590,5	151,651	610,093	610,093	20,774	610,093	54,377	21,266
Μάιος	2721,408	1498,915	638,896	4859,219	188,726	635,305	635,305	24,927	635,305	67,681	23,67
Ιούνιος	2966,92	1252,765	668,783	4888,469	210,186	626,135	626,135	27,207	626,135	80,382	27,273
Ιούλιος	3229,307	1239,434	715,891	5184,631	219,869	658,967	658,967	28,427	658,967	90,579	29,675
Αύγουστος	3659,573	1169,881	687,617	5517,069	221,477	702,62	702,62	28,907	702,62	95,847	30,708
Σεπτέμβριος	2948,29	1382,016	467,252	4797,556	149,209	624,593	624,593	19,963	624,593	70,417	27,64
Οκτώβριος	2634,166	1346,532	330,726	4311,423	122,673	581,265	581,265	16,746	581,265	44,413	21,562
Νοέμβριος	1571,306	1049,606	189,332	2810,243	77,029	380,487	380,487	10,368	380,487	27,859	18,543
Δεκέμβριος	2033,327	991,945	184,499	3209,77	101,835	444,059	444,059	13,922	444,059	23,855	16,912
Total	29658,54	14849,488	5112,037	49620,056	1685,629	6560,815	6560,815	225,447	6560,815	631,826	

**Εικόνα 41 Ενεργειακά αποτελέσματα για φωτοβολταϊκά πάνελ 3ο σενάριο**

Μήνας	DCProduction (kWh)	ACProduction (kWh)	ACProduction (kWh)	DCto ACloss (kWh)	DCProduction (kWh)	Ohmic losses (kWh)	DCInverter In	Mismatch losses	Ohmic losses	Final yield (kWh/kWp)
Ιανουάριος	407,984	347,224	347,224	60,76	407,984	5,039	407,984	6,89E-07	5,039	71,475
Φεβρουάριος	334,995	292,831	292,831	42,164	334,995	4,033	334,995	-8,94E-07	4,033	60,278
Μάρτιος	538,861	470,341	470,341	68,52	538,861	6,379	538,861	-1,23E-06	6,379	96,818
Απρίλιος	603,153	539,375	539,375	63,777	603,153	6,94	603,153	1,80E-06	6,94	111,028
Μάιος	628,227	565,404	565,404	62,823	628,227	7,078	628,227	5,01E-06	7,078	116,386
Ιούνιος	619,262	557,336	557,336	61,926	619,262	6,873	619,262	2,79E-07	6,873	114,725
Ιούλιος	651,687	586,518	586,518	65,169	651,687	7,281	651,687	-7,26E-07	7,281	120,732
Αύγουστος	694,666	625,031	625,031	69,635	694,666	7,954	694,666	1,08E-06	7,954	128,66
Σεπτέμβριος	617,324	549,719	549,719	67,605	617,324	7,269	617,324	-5,38E-06	7,269	113,157
Οκτώβριος	574,308	497,699	497,699	76,61	574,308	6,957	574,308	3,03E-07	6,957	102,449
Νοέμβριος	375,887	325,96	325,96	49,927	375,887	4,6	375,887	-3,12E-06	4,6	67,097
Δεκέμβριος	438,567	374,189	374,189	64,377	438,567	5,492	438,567	-1,44E-07	5,492	77,025
Total	6484,921	5731,627	5731,627	753,293	6484,921	75,895	6484,921	-2,32E-06	75,895	1179,83

**Εικόνα 42 Ενεργειακά αποτελέσματα των inverters 3ο σενάριο**

Στην τελευταία καρτέλα της οικονομοτεχνικής μελέτης, για την κατοικία, η τιμή των φωτοβολταϊκών πάνελ όπως και οι τιμές των inverters και υπολοίπων προκύπτουν από την πρόσθεση των δύο προηγούμενων σεναρίων. Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμήθηκε σε 36€ (4€/kWp και για τα φωτοβολταϊκά πάνελ και για τα υπόλοιπα). Τα υπόλοιπα παραμένουν ίδια όπως και στο πρώτο σενάριο. Τα αποτελέσματα:

- Final yield= 1179,8 kWh/kWp
- Feed-in production= 5070kWh
- Self consumed production= 662kWh
- Lost production= 0 kWh
- Feed-in income= 330€
- Self consumption savings= 96€
- 20 years Return on Investment= -15,3%
- Payback period= 20,0 years

Συνοπτικά, το τρίτο σενάριο που περιλαμβάνει ταυτόχρονη τοποθέτηση και ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών (BAPV + BIPV) στο δώμα και τη νότιοανατολική πρόσοψη της κατοικίας,

πέτυχε συνολική παραγωγή 5.970 kWh ετησίως (AC) από ισχύ 4,9 kWp. Παρότι η παραγωγή ενέργειας αυξήθηκε, ο δείκτης final yield μειώθηκε στις 1179,8 kWh/kWp, υποδεικνύοντας μικρότερη απόδοση ανά εγκατεστημένη ισχύ, λόγω της συμμετοχής των BIPV πάνελ που έχουν χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση. Παρά το υψηλότερο εισοδηματικό όφελος (426 € συνολικά), το αυξημένο αρχικό κόστος επένδυσης (9200 €) οδηγεί σε αρνητικό ROI και μεγάλο χρόνο απόσβεσης (20 έτη), καθιστώντας το σενάριο οικονομικά μη βιώσιμο σε σημερινές συνθήκες αγοράς.

### **5.3.3 Σχολιασμός των ενεργειακών και οικονομοτεχνικών αποτελεσμάτων των τριών σεναρίων**

#### **Ενεργειακά αποτελέσματα**

##### **1<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο πρώτο σενάριο η εγκατεστημένη ισχύς από την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχεται στα 1,8kWp καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 13τ.μ. στο δώμα του κτιρίου. Η συνολική ακτινοβολία που δέχονται τα πάνελ κατά τη διάρκεια του έτους ανέρχεται στις 26687 kWh, οι απώλειες λόγω σκίασης ανέρχονται σε 229kWh που είναι λιγότερο από το 1% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας οπότε συμπεραίνεται ότι η χωροθέτηση των πάνελ είναι πολύ καλή. Από τις 26687 kWh ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα πάνελ μετατρέπουν σε ενέργεια υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος (DC) τις 3327kWh (Βαθμός απόδοσης περίπου 12,46% όχι καλός για BAPV τεχνολογία) με απώλειες λόγω σκιάσεων 30kWh που είναι και αυτές λιγότερο από το 1%. Οι απώλειες όμως λόγω θερμοκρασίας που αγγίζουν το 12,8%, ποσοστό υψηλό για εγκατάσταση χωρίς δροσισμό ή παθητικά μέτρα μείωσης θερμοκρασίας.

Η έξοδος του inverter δίνει 2970kWh ενέργεια σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) από τις 3300kWh (DC) που δέχεται στην είσοδο. Οι υπόλοιπες είναι απώλειες, από τη μετατροπή DC σε AC (οι περισσότερες), ωμικές απώλειες (μικρές) και απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των συσκευών (ελάχιστες). Το final yield που αποτελεί δείκτη απόδοσης της πραγματικής παραγωγής ενέργειας σε kWh ανά εγκατεστημένο kWp είναι 1614,38kWh/kWp που είναι μία καλή τιμή για το Ηράκλειο Κρήτης συγκρινόμενη με τις τιμές των ιστοσελίδων του PVGIS ([https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)) και του Global Solar Atlas. (<https://globalsolaratlas.info/>).

##### **2<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο δεύτερο σενάριο η εγκατεστημένη ισχύς από την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχεται στα 3kWp καταλαμβάνοντας έκταση περίπου

20τ.μ. στην πρόσοψη και στα κουφώματα του κτιρίου. Η συνολική ακτινοβολία που δέχονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά τη διάρκεια του έτους ανέρχεται στις 22933kWh, οι απώλειες λόγω σκίασης ανέρχονται σε 1457 kWh που είναι το 6,4% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ποσότητα που δεν είναι αμελητέα. Από τις 22933kWh ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα πάνελ μετατρέπουν σε ενέργεια υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος (DC) τις 3234kWh (Βαθμός απόδοσης περίπου 14,1% καλός για τεχνολογία BIPV) με σκιάσεις που οδηγούν σε απώλειες της τάξης του 6%, γεγονός που υποδεικνύει την ευαισθησία της πρόσοψης σε εμπόδια φωτός, ειδικά για BIPV τεχνολογίες. Οι απώλειες λόγω υψηλής θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχονται σε 205kWh που αποτελεί το 6,3% της παραγόμενης ενέργειας.

Η έξοδος των inverters δίνει 2761kWh ενέργεια σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) από τις 3184kWh (DC) που δέχεται στην είσοδο. Οι υπόλοιπες είναι απώλειες, από τη μετατροπή DC σε AC (οι περισσότερες), ωμικές απώλειες (μικρές) και απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των συσκευών (ελάχιστες). Η τιμή του final yield είναι 914,9 kWh/kWp που δεν είναι μία καλή τιμή για το Ηράκλειο Κρήτης.

### **3<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο τρίτο σενάριο η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχεται στα 4,9kWp καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 33τ.μ. στο δώμα, στην πρόσοψη και στα κουφώματα του κτιρίου. Η συνολική ακτινοβολία που δέχονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά τη διάρκεια του έτους ανέρχεται στις 49620kWh, οι απώλειες λόγω σκίασης ανέρχονται σε 1685 kWh που είναι το 3,4 % της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, που είναι οι τριπλάσιες περίπου σε σχέση με το πρώτο σενάριο και οι μισές περίπου σε σχέση με το δεύτερο σενάριο. Από τις 49620kWh ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα πάνελ μετατρέπουν σε ενέργεια υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος (DC) τις 6561kWh (Βαθμός απόδοσης περίπου 13,22% σχετικά καλός για BIPV τεχνολογία, αλλά χαμηλός για BAPV τεχνολογία) με απώλειες λόγω σκιάσεων 225kWh που είναι το 3,4 %, που είναι οι τριπλάσιες περίπου σε σχέση με το πρώτο σενάριο και οι μισές περίπου σε σχέση με το δεύτερο σενάριο. Οι απώλειες λόγω υψηλής θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχονται σε 631kWh που αποτελεί το 9,6% της παραγόμενης ενέργειας περίπου 3% μικρότερος από το πρώτο σενάριο και περίπου 3% μεγαλύτερος σε σχέση με το δεύτερο σενάριο.

Η έξοδος των inverters δίνει 5732kWh ενέργεια σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) από τις 6485kWh (DC) που δέχεται στην είσοδο. Οι υπόλοιπες είναι απώλειες, από τη μετατροπή DC σε AC (οι περισσότερες), ωμικές απώλειες (μικρές) και



απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των συσκευών (ελάχιστες). Η τιμή του final yield είναι 1179,8 kWh/kWp, χαμηλότερη από το πρώτο σενάριο λόγω της συνεισφοράς των BIPV πάνελ με περιορισμένο προσανατολισμό, παρά την επιπλέον εγκατεστημένη ισχύ.

### **Συγκριτική Επισκόπηση**

Συγκριτικά, το πρώτο σενάριο με τοποθέτηση BAPV στο δώμα εμφάνισε τη μεγαλύτερη απόδοση ανά εγκατεστημένο kWp (final yield = 1614,4 kWh/kWp), αξιοποιώντας την υψηλή ηλιακή προσπίπτουσα ακτινοβολία και ελάχιστες σκιάσεις. Το δεύτερο σενάριο (BIPV σε πρόσοψη και υαλοστάσια) παρήγαγε λιγότερη ενέργεια ανά μονάδα ισχύος (914,9 kWh/kWp), εξαιτίας του περιορισμένου προσανατολισμού, σκιάσεων και χαμηλότερης τεχνολογικής απόδοσης. Το τρίτο σενάριο, αν και είχε τη μεγαλύτερη συνολική παραγωγή (5732 kWh AC), είχε ενδιάμεση ενεργειακή απόδοση, καταδεικνύοντας ότι ο συνδυασμός BIPV και BAPV μπορεί να αυξήσει τη συνολική παραγωγή αλλά δεν βελτιστοποιεί απαραίτητα την αποδοτικότητα ανά μονάδα ισχύος.

### **Οικονομοτεχνικά αποτελέσματα**

Στην οικονομοτεχνική μελέτη οι τιμές πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ίδιες και για τα τρία σενάρια και είναι κατά προσέγγιση με βάση τις εταιρίες αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές εγκατάστασης και συντήρησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι κατά προσέγγιση και στα τρία σενάρια με βάση την αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η ετήσια κατανάλωση της κατοικίας βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία (λογαριασμοί ηλεκτρικού ρεύματος). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε ώστε η παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα να χρησιμοποιείται πρωτίστως για τις ανάγκες της κατοικίας και η περίσσια ενέργειας να πωλείται στο δίκτυο (Mix).

#### **1<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο πρώτο σενάριο η απόδοση της επένδυσης μετά από 20 χρόνια θα είναι 86,7% που θεωρείται καλό ποσοστό για επένδυση (σχεδόν διπλασιασμός των χρημάτων), με την απόσβεση να γίνεται στα 10,7 χρόνια.

#### **2<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο δεύτερο σενάριο η απόδοση της επένδυσης μετά από 20 χρόνια θα είναι -41,3% (εμφανίζει αρνητικό ROI), δεν ενδείκνυται ως οικονομικά ελκυστικό με βάση τα σημερινά δεδομένα, με την απόσβεση να ξεπερνάει τα 20 έτη.

#### **3<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο τρίτο σενάριο η απόδοση της επένδυσης μετά από 20 χρόνια θα είναι -15,3% που πάλι είναι ζημιολόγο ποσοστό για επένδυση, με την απόσβεση να ξεπερνάει και πάλι τα 20 έτη.

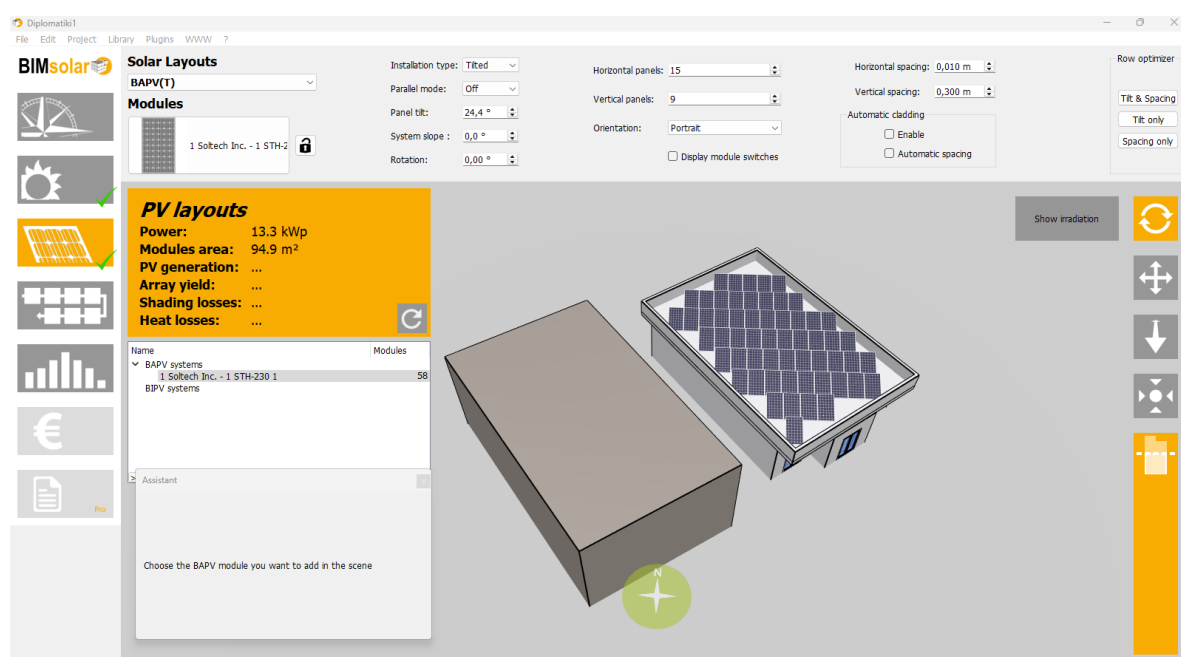
Με βάση τα παραπάνω οικονομοτεχνικά στοιχεία το μόνο σενάριο που είναι βιώσιμο και κερδοφόρο σύμφωνα με τα αποτελέσματα του BIMsolar, είναι το πρώτο. Το δεύτερο σενάριο έχει πολύ υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης λόγω της χρήσης συστημάτων της τεχνολογίας BIPV που έχουν επιπλέον κόστος μεταξύ άλλων και λόγω του ότι αντικαθιστούν δομικά υλικά και για αυτόν το λόγο είναι μη βιώσιμο. Στο τρίτο σενάριο μετριάζεται λίγο η κατάσταση, αλλά πάλι η επένδυση κρίνεται μη κερδοφόρα.

Συνολικά, από τα οικονομοτεχνικά αποτελέσματα προκύπτει πως η απλή τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ στο δώμα (1ο σενάριο) αποτελεί τη βέλτιστη λύση από πλευράς απόδοσης επένδυσης, με ικανοποιητικό χρόνο απόσβεσης (~11 έτη) και συνολικό κέρδος. Η χρήση BIPV τεχνολογίας αυξάνει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης, χωρίς να το αντισταθμίζει με ανάλογη αύξηση στην παραγόμενη ενέργεια ή στα έσοδα, καθιστώντας την προς το παρόν μη συμφέρουσα επιλογή.

### 5.3.4 Επιπλέον σενάρια

Δημιουργήθηκαν επιπλέον τρία σενάρια, τα οποία δεν έχουν σκοπό μόνο την κάλυψη των αναγκών της κατοικίας σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά την εκμετάλλευση ορισμένων επιφανειών (με υψηλή προσπίπτουσα ακτινοβολία) του κτιρίου για την τοποθέτηση όσο περισσότερων φωτοβολταϊκών συστημάτων με σκοπό την μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

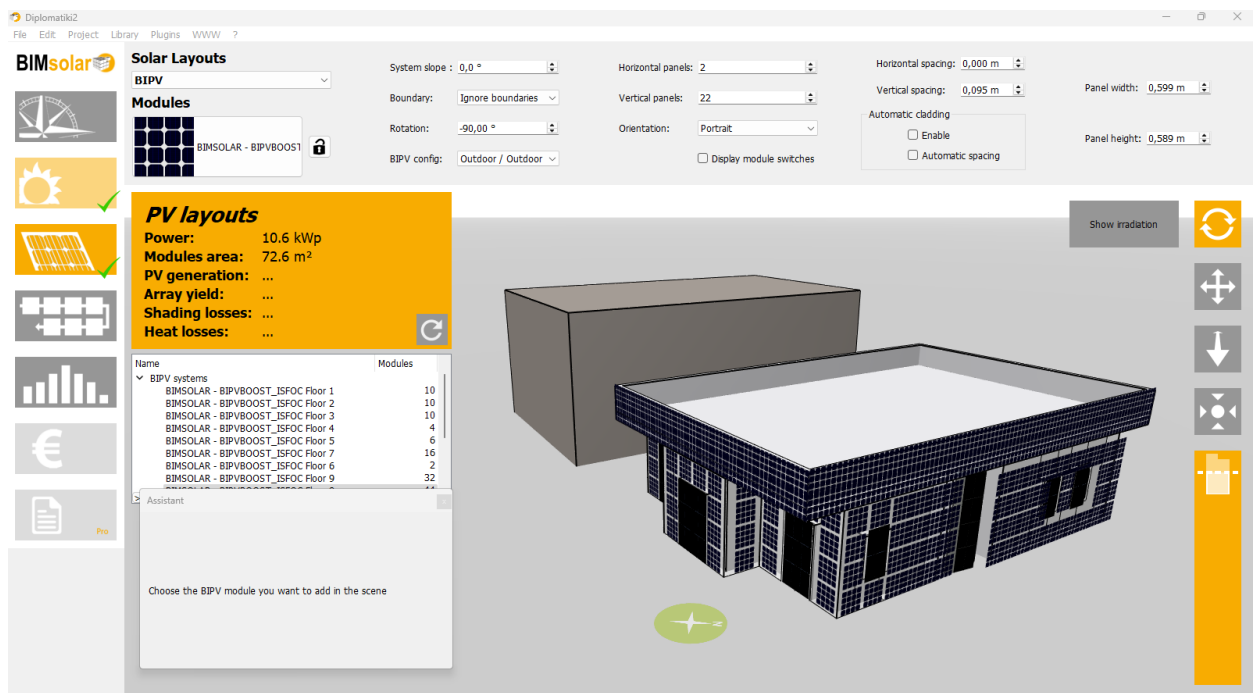
Στο πρώτο, επιπλέον, σενάριο χρησιμοποιήθηκε σχεδόν όλη η επιφάνεια του δώματος όπου τοποθετήθηκαν 58 πάνελ Soltech STH-230Wr (ίδια με το πρώτο βασικό σενάριο) Εικόνα 43. Η συνολική ισχύ ανέρχεται στα 13,34kWp



Εικόνα 43 1ο επιπλέον σενάριο

Ο inverter που επιλέχτηκε είναι ο Huawei-Sun2000-8KTL-M1 ισχύος 12kWp. Δημιουργήθηκαν 2 strings αποτελούμενα από 29 φωτοβολταϊκά πάνελ έκαστο.

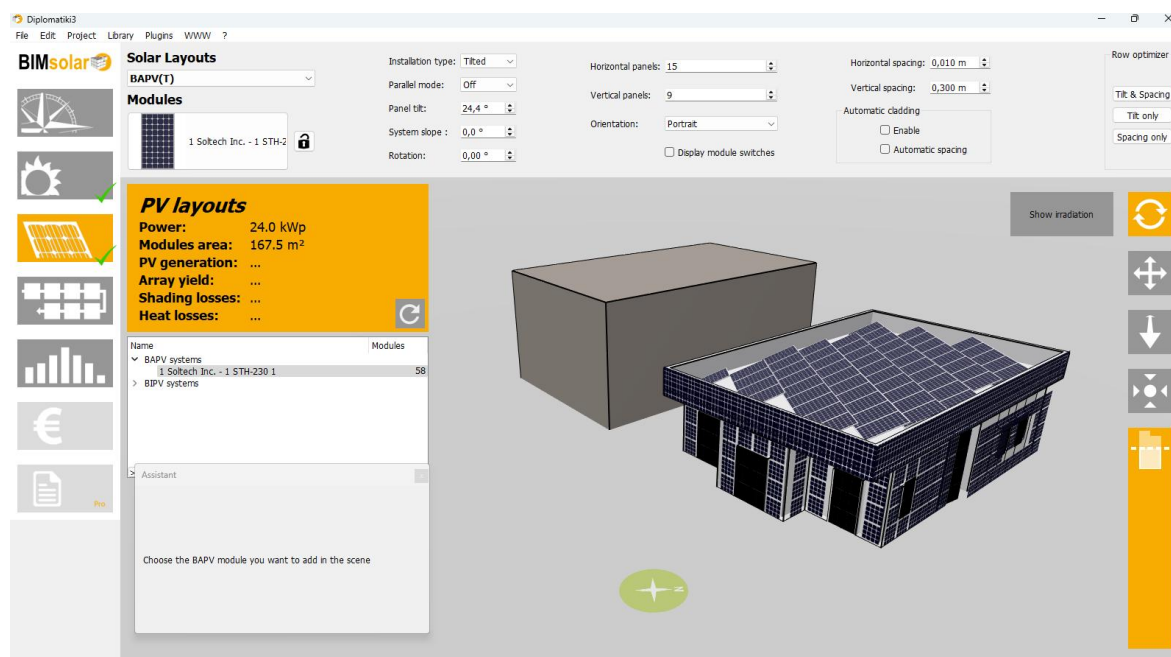
Στο δεύτερο επιπλέον σενάριο χρησιμοποιήθηκε ή Νοτιοανατολική πλευρά και η Βορειοανατολική πλευρά για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων BIPV. Για τις προσόψεις χρησιμοποιήθηκε το πάνελ BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono\_si, (όπως και στο δεύτερο βασικό σενάριο) και επιλέχτηκε λόγω των διαστάσεών του, ώστε να μπορέσουν να καλυφθούν σχεδόν ολοκληρωτικά οι προσόψεις. Για τα κουφώματα, και συγκεκριμένα για τους υαλοπίνακες των κουφωμάτων λόγω διαστάσεων, δημιουργήθηκε ένα φωτοβολταϊκό τεχνολογίας λεπτών υμενίων (thin-film) με βάση το εύκαμπτο φωτοβολταϊκό FLIMSOL-X1a (όπως και στο δεύτερο βασικό σενάριο). Για να καλυφθούν οι δύο προσόψεις χρειάστηκαν 164 πάνελ BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono\_si και για να καλυφθούν τα παράθυρα και οι πόρτες 53 πάνελ thin-film. Η συνολική ισχύς ανέρχεται στα 10,6 kWp, Εικόνα 44.



Εικόνα 44 2ο επιπλέον σενάριο

Για τα 164 πάνελ BIPVBOOST ISOFOC FLOOR mono\_si το λογισμικό επέλεξε τον inverter Elettronica Santerno-SunWay TG 10-800V με 8,2 kWp και δημιουργήθηκαν 2 strings με 82 πάνελ το καθένα. Για τα υπόλοιπα 53 πάνελ το λογισμικό επέλεξε τον inverter Aixcon Elektrotechnik GmbH-PS 1300 με 1,4 kWp και δημιουργήθηκαν 6 strings τα 5 με 9 πάνελ το καθένα και το 6ο με 8 πάνελ.

Στο τρίτο επιπλέον σενάριο έγινε ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων επιπλέον σεναρίων, τοποθετήθηκαν δηλ. και τα φωτοβολταϊκά συστήματα στο δώμα του πρώτου επιπλέον σεναρίου (BAPV systems) και τα φωτοβολταϊκά συστήματα των προσόψεων και των κουφωμάτων (BIPV systems) του δεύτερου επιπλέον σεναρίου Εικόνα 45. Οι inverters είναι οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο πρώτα επιπλέον σενάρια.



Εικόνα 45 3ο επιπλέον σενάριο

## Ενεργειακά αποτελέσματα επιπλέον σεναρίων

### 1<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο

Στο πρώτο επιπλέον σενάριο η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχεται στα 13,3kWp καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 95τ.μ. στο δώμα του κτιρίου. Η συνολική ακτινοβολία που δέχονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά τη διάρκεια του έτους ανέρχεται στις 187525kWh, οι απώλειες λόγω σκίασης ανέρχονται σε 2699 kWh που είναι το 1,4 % της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σχεδόν αμελητέες. Από τις 187525kWh ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα πάνελ μετατρέπουν σε ενέργεια υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος (DC) τις 23361kWh (Βαθμός απόδοσης 12,46%: χαμηλός σε σχέση με τις τιμές αναφοράς BAPV (>15%) για περιοχές υψηλής ηλιοφάνειας), με απώλειες λόγω σκιάσεων 354kWh που είναι το 1,5 %, σχεδόν αμελητέες. Οι απώλειες λόγω υψηλής θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχονται σε 3011kWh που αποτελεί το 12,89% της παραγόμενης ενέργειας που είναι αρκετά μεγάλο ποσοστό.

Η έξοδος του inverter δίνει 22903kWh ενέργεια σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) από τις 23229kWh (DC) που δέχεται στην είσοδο. Οι υπόλοιπες είναι

απώλειες, από τη μετατροπή DC σε AC (οι περισσότερες), ωμικές απώλειες (μικρές) και απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των συσκευών (ελάχιστες). Το final yield που αποτελεί δείκτη απόδοσης της πραγματικής παραγωγής ενέργειας σε kWh ανά εγκατεστημένο kWp είναι 1716,9kWh/kWp που είναι μία πάρα πολύ καλή τιμή για το Ηράκλειο Κρήτης.

## **2° επιπλέον σενάριο**

Στο δεύτερο επιπλέον σενάριο η εγκατεστημένη ισχύς από την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχεται στα 10,6kWp, καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 73τ.μ. στην πρόσοψη και στα κουφώματα του κτιρίου. Η συνολική ακτινοβολία που δέχονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά τη διάρκεια του έτους ανέρχεται στις 64252kWh, οι απώλειες λόγω σκίασης ανέρχονται σε 4155kWh που είναι το 6,5% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ποσότητα που δεν είναι αμελητέα. Από τις 64252kWh ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα πάνελ μετατρέπουν σε ενέργεια υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος (DC) τις 8645kWh (Βαθμός απόδοσης περίπου 13,45% καλός για τεχνολογία BIPV) με απώλειες λόγω σκιάσεων 564kWh που είναι το 6,5 %, ποσότητα που δεν είναι αμελητέα. Οι απώλειες λόγω υψηλής θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχονται σε 737kWh που αποτελεί το 8,5% της παραγόμενης ενέργειας .

Η έξοδος των inverters δίνει 7647kWh ενέργεια σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) από τις 8497kWh (DC) που δέχεται στην είσοδο. Οι υπόλοιπες είναι απώλειες, από τη μετατροπή DC σε AC (οι περισσότερες), ωμικές απώλειες (μικρές) και απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των συσκευών (ελάχιστες). Η τιμή του final yield είναι 718 kWh/kWp που είναι χαμηλό για το Ηράκλειο Κρήτης.

## **3° επιπλέον σενάριο**

Στο τρίτο επιπλέον σενάριο η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχεται στα 24kWp καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 168τ.μ. στο δώμα, στην πρόσοψη και στα κουφώματα του κτιρίου. Η συνολική ακτινοβολία που δέχονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά τη διάρκεια του έτους ανέρχεται στις 251777kWh, οι απώλειες λόγω σκίασης ανέρχονται σε 6854kWh που είναι το 2,7 % της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, που είναι σχεδόν οι διπλάσιες σε σχέση με το πρώτο σενάριο και λιγότερο από τις μισές σε σχέση με το δεύτερο σενάριο. Από τις 251777kWh ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα πάνελ μετατρέπουν σε ενέργεια υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος (DC) τις 32006kWh (Βαθμός απόδοσης περίπου 12,7% όχι κακός) με απώλειες λόγω σκιάσεων 918kWh που είναι το 2,9 %, που είναι οι διπλάσιες περίπου σε σχέση με το πρώτο σενάριο και λιγότερες από τις μισές σε σχέση με το δεύτερο σενάριο. Οι απώλειες λόγω υψηλής

θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανέρχονται σε 3748kWh που αποτελεί το 11,7% της παραγόμενης ενέργειας περίπου 1% μικρότερος από το πρώτο σενάριο και περίπου 3% μεγαλύτερος σε σχέση με το δεύτερο σενάριο.

Η έξοδος των inverters δίνει 30551kWh ενέργεια σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) από τις 31726kWh (DC) που δέχεται στην είσοδο. Οι υπόλοιπες είναι απώλειες, από τη μετατροπή DC σε AC (οι περισσότερες), ωμικές απώλειες (μικρές) και απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των συσκευών (ελάχιστες). Η τιμή του final yield είναι 1273,9 kWh/kWp που είναι μία μέτρια τιμή για το Ηράκλειο Κρήτης.

### **Οικονομοτεχνικά αποτελέσματα επιπλέον σεναρίων**

Στην οικονομοτεχνική μελέτη των επιπλέον σεναρίων ισχύουν οι ίδιες αριθμητικά τιμές όπως και στα βασικά σενάρια και οι ίδιες παραδοχές. Δηλαδή, οι τιμές πώλησης και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ίδιες και για τα τρία σενάρια και είναι κατά προσέγγιση με βάση τις εταιρίες αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές εγκατάστασης και συντήρησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι κατά προσέγγιση και στα τρία σενάρια με βάση την αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η ετήσια κατανάλωση της κατοικίας βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία (λογαριασμοί ηλεκτρικού ρεύματος). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε ώστε η παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα να χρησιμοποιείται πρωτίστως για τις ανάγκες της κατοικίας και η περίσσια ενέργεια να πωλείται στο δίκτυο (Mix).

#### **1<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο πρώτο σενάριο η απόδοση της επένδυσης μετά από 20 χρόνια θα είναι 142,5% που είναι ένα πάρα πολύ καλό ποσοστό για επένδυση (παραπάνω από διπλασιασμό των χρημάτων), με την απόσβεση να γίνεται μόλις στα 8,2 χρόνια.

#### **2<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο δεύτερο σενάριο η απόδοση της επένδυσης μετά από 20 χρόνια θα είναι -56,9% (εμφανίζει αρνητικό ROI), δεν ενδείκνυται ως οικονομικά ελκυστικό με βάση τα σημερινά δεδομένα, με την απόσβεση να ξεπερνάει τα 20 έτη.

#### **3<sup>ο</sup> σενάριο**

Στο τρίτο σενάριο η απόδοση της επένδυσης μετά από 20 χρόνια θα είναι 10,3% ένα πολύ μικρό ποσοστό για επένδυση, με την απόσβεση να γίνεται στα 18,1 έτη.

Με βάση τα παραπάνω οικονομοτεχνικά στοιχεία το πρώτο επιπλέον σενάριο που είναι αρκετά κερδοφόρο σύμφωνα με τα αποτελέσματα του BIMsolar. Το δεύτερο επιπλέον σενάριο είναι μη βιώσιμο οικονομικά. Στο τρίτο επιπλέον σενάριο να μην είναι βιώσιμο

αλλά τα περιθώρια κέρδους είναι πάρα πολύ μικρά, παρατηρείται όμως κάτι σημαντικό ότι εάν η εγκατεστημένη ισχύς των BAPV είναι μεγαλύτερη από την εγκατεστημένη ισχύ των BIPV η επένδυση γίνεται οικονομικά βιώσιμη.

Τα σχόλια για όλα τα παραπάνω οικονομοτεχνικά σενάρια ισχύουν για τις δοσμένες τιμές. Σε περίπτωση που υπάρξουν αλλαγές στην τιμή αγοράς και πώλησης της ενέργειας, τα παραπάνω πρέπει να υπολογιστούν με τις καινούριες τιμές ώστε να προκύψουν νέα σχόλια.

## 6. Ανάπτυξη και χρήση υπολογιστικού εργαλείου ενεργειακής ανάλυσης

### 6.1 Ανάλυση ενεργειακής ισορροπίας

Η εφαρμογή με τίτλο «Ενεργειακή ανάλυση» (Εικόνα 46) αναπτύχθηκε με σκοπό τη αξιολόγηση της ενεργειακής ισορροπίας κτιρίων, υπολογίζοντας κρίσιμους δείκτες απόδοσης. Με βάση την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός κτιρίου, το προφίλ λειτουργίας του κτιρίου και την παραγωγή από ΑΠΕ (π.χ. φωτοβολταϊκά), υπολογίζονται οι εξής βασικοί δείκτες απόδοσης:

α) Load Matching → Πλήθος ωρών κατά τις οποίες η παραγωγή καλύπτει πλήρως τη ζήτηση.

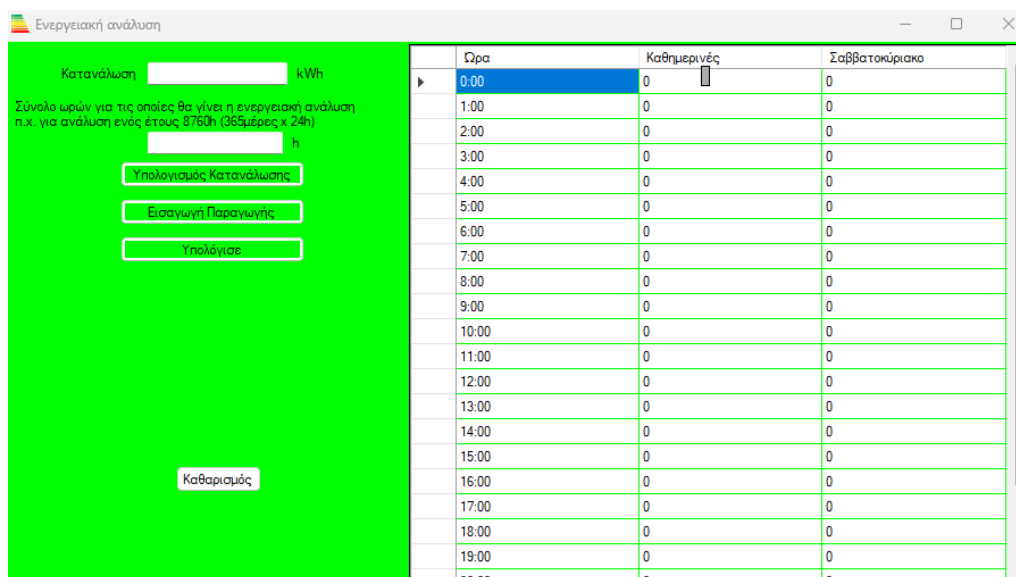
β) Self-Consumption (SC) → Το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας που καταναλώνεται απευθείας από το κτίριο.

γ) Self-Sufficiency (SS) → Το ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης που καλύπτεται από την τοπική παραγωγή

δ) Αυτονομία → Ο λόγος της συνολικής παραγωγής προς τη συνολική κατανάλωση εντός του έτους.

ε) Εξαγωγή αρχείου .csv → Ωριαία δεδομένα αυτοκατανάλωσης, περίσσειας και απαίτησης από το δίκτυο.

Η εφαρμογή αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του visual studio 2022 σε γλώσσα προγραμματισμού C#.



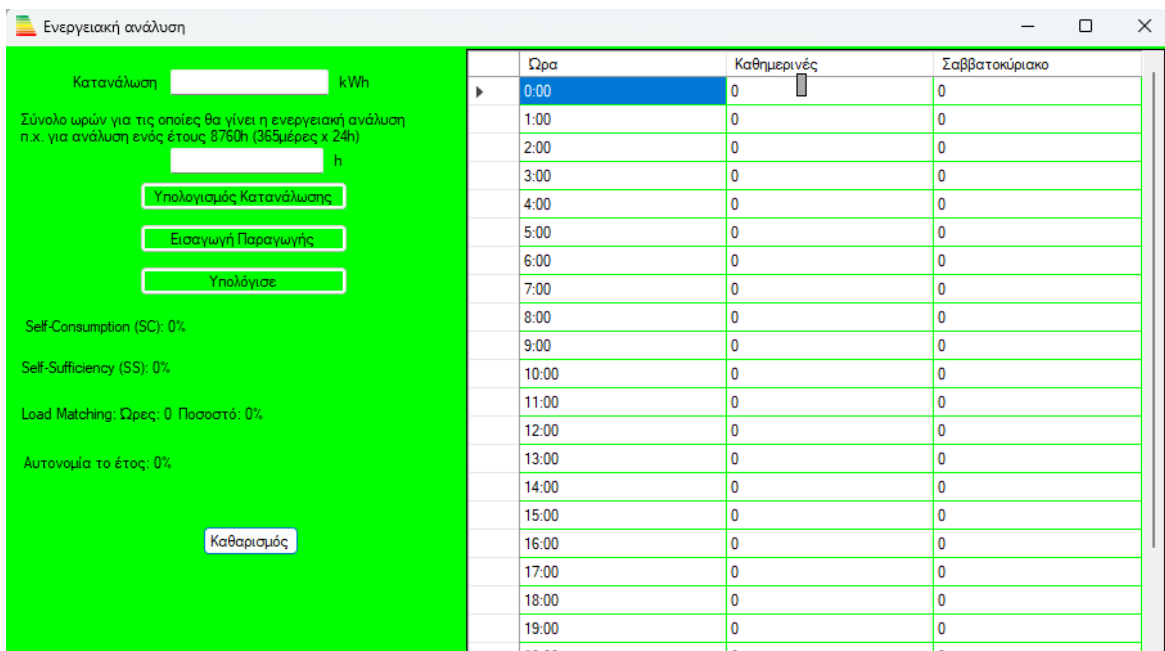
Ωρα	Καθημερινές	Σαββατοκύριακο
0:00	0	0
1:00	0	0
2:00	0	0
3:00	0	0
4:00	0	0
5:00	0	0
6:00	0	0
7:00	0	0
8:00	0	0
9:00	0	0
10:00	0	0
11:00	0	0
12:00	0	0
13:00	0	0
14:00	0	0
15:00	0	0
16:00	0	0
17:00	0	0
18:00	0	0
19:00	0	0
20:00	0	0
21:00	0	0
22:00	0	0
23:00	0	0
24:00	0	0

Εικόνα 46 Οπτικό περιβάλλον της εφαρμογής «Ενεργειακή Ανάλυση»



Η εφαρμογή μπορεί να πραγματοποιήσει την ενεργειακή ανάλυση ανά ώρα σε οποιοδήποτε κτίριο ανεξάρτητα από το μέγεθός του, τις ώρες και την εποχή που γίνεται η κατανάλωση και η παραγωγή ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με το να δέχεται ως είσοδο τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και το πώς αυτή καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, των αριθμών των ωρών που γίνεται αυτή η κατανάλωση και το σύνολο των ωρών που γίνεται η ενεργειακή ανάλυση. Η εφαρμογή δίδει σαν έξοδο τον αριθμό ωρών πλήρους κάλυψης της κατανάλωσης από την παραγωγή (Load Matching), το δείκτη Self-Consumption (SC) δηλ. το πόση από την ενέργεια που παράχθηκε καταναλώθηκε επιτόπου, το δείκτη Self-Sufficiency (SS) δηλ. ποσοστό της κατανάλωσης που καλύφθηκε από την παραγωγή και τη συνολική παραγωγή προς τη συνολική κατανάλωση που δείχνει την αυτονομία του συστήματος Εικόνα 47.

Επίσης, εξάγει ένα αρχείο .csv το οποίο περιέχει ανά ώρα το ποσοστό αυτοκατανάλωσης, την περίσσεια ενέργειας δηλ. το πόσο ενέργεια εξάγεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όταν υπάρχει υπερκάλυψη της ζήτησης από την παραγωγή καθώς και τη ζήτηση ενέργειας από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όταν η παραγωγή ενέργειας δεν μπορεί να καλύψει την ζήτηση Εικόνα 48.



Εικόνα 47 Υπολογιζόμενοι δείκτες από το εργαλείο

A	B	C	D	E
Hour	Pososto Autokatanalosis	Perisseia Energeias kW	Zhthsh apo to Diktuo kW	
0:00	0.00%	0	0,93	
1:00	0.00%	0	0,93	
2:00	0.00%	0	0,93	
3:00	0.00%	0	0,93	
4:00	0.00%	0	0,93	
5:00	0.00%	0	0,93	
6:00	0.00%	0	0,93	
7:00	0.00%	0	0,93	
8:00	14.96%	0	0,79	
9:00	10.44%	0	0,83	
10:00	13.02%	0	0,81	
11:00	18.94%	0	0,75	
12:00	42.30%	0	0,54	
13:00	17.00%	0	0,77	
14:00	6.67%	0	0,87	
15:00	0.00%	0	0,93	
16:00	0.00%	0	0,93	
17:00	0.00%	0	0,93	
18:00	0.00%	0	0,93	
19:00	0.00%	0	0,93	
20:00	0.00%	0	0,93	
21:00	0.00%	0	0,93	
22:00	0.00%	0	0,93	
23:00	0.00%	0	0,93	

Εικόνα 48 Απόσπασμα από το παραγόμενο αρχείο .csv

## 6.2 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας

### 6.2.1 Εισαγωγή δεδομένων

Για να μπορέσει η εφαρμογή να υπολογίσει την κατανάλωση ενέργειας θα πρέπει ο χρήστης να εισάγει την συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) στο αντίστοιχο πεδίο εισαγωγής (Εικόνα 49).

Κατανάλωση  kWh

Εικόνα 49 Εισαγωγή κατανάλωσης ενέργειας

Στη συνέχεια θα πρέπει να ορίσει τις ώρες που υπάρχει κατανάλωση ενέργειας στο κτίριο. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια του «πίνακα» της Εικόνας 50. Ο χρήστης θα πρέπει να εισαγάγει συντελεστές στάθμισης (τιμές από 0 έως 1) για κάθε ώρα λειτουργίας που έχει κατανάλωση είτε τις καθημερινές είτε τα Σαββατοκύριακα. Πρέπει όμως να ορίσει κα το σύνολο των ωρών για τις οποίες θα γίνει η ενεργειακή ανάλυση στο αντίστοιχο πλαίσιο τιμών (Εικόνα 51). Για παράδειγμα, ενεργειακή ανάλυση για ένα έτος θα πρέπει να γράψει

στο πεδίο 8760 ώρες (365 μέρες x 24 ώρες), για ένα μήνα με 30 μέρες θα δώσει 720 (30μέρες x 24ώρες). Αφού έχει τελειώσει και με αυτό μπορεί να πατήσει το κουμπί «Υπολογισμός Κατανάλωσης» (Εικόνα 52) ώστε η εφαρμογή να υπολογίσει την ωριαία κατανάλωση ενέργειας για όλο το έτος.

	Ωρα	Καθημερινές	Σαββατοκύριακο
▶	0:00	0	0
	1:00	0	0
	2:00	0	0
	3:00	0	0
	4:00	0	0
	5:00	0	0
	6:00	0	0
	7:00	0	0
	8:00	0	0
	9:00	0	0
	10:00	0	0
	11:00	0	0
	12:00	0	0
	13:00	0	0
	14:00	0	0
	15:00	0	0
	16:00	0	0
	17:00	0	0
	18:00	0	0
	19:00	0	0

Εικόνα 50 Πίνακας εισαγωγής συντελεστών

Σύνολο ωρών για τις οποίες θα γίνει η ενεργειακή ανάλυση  
π.χ. για ανάλυση ενός έτους 8760h (365μέρες x 24h)

h

Εικόνα 51 Εισαγωγή περιόδου ενεργειακής ανάλυσης

**Υπολογισμός Κατανάλωσης**

Εικόνα 52 Κουμπί «Υπολογισμός Κατανάλωσης»

## 6.2.2 Τρόπος υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας

Η εφαρμογή για να μπορέσει να υπολογίσει την ωριαία κατανάλωση ενέργειας για την περίοδο που θα του δώσει ο χρήστης (οι ώρες για την ενεργειακή ανάλυση) υπολογίζει την ωριαία κατανάλωση ενέργειας κατανέμοντάς την βάσει των συντελεστών στάθμισης που όρισε ο χρήστης. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές από 0 έως 1 που δίνονται στο κάθε κουτάκι της ώρας είναι η τιμή ενός συντελεστή που δηλώνει ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας για

κάθε ώρα. Η εφαρμογή αθροίζει αυτούς τους συντελεστές και έτσι προκύπτει το σύνολο των ωρών της περιόδου ανάλυσης που έχουμε κατανάλωση ενέργειας. Στη συνέχεια, η εφαρμογή διαιρεί την κατανάλωση ενέργειας προς το σύνολο των ωρών της ενεργειακής ανάλυσης. Το αποτέλεσμα της διαίρεσης αυτής επί το συντελεστή της κάθε ώρας που έχει δώσει ο χρήστης μας δίνει την κατανάλωση ενέργειας για κάθε ώρα. Εάν όλα έχουν εισαχθεί και υπολογιστεί σωστά η εφαρμογή εμφανίζει μήνυμα ότι ο υπολογισμός ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Σε περίπτωση που δεν εισαχθεί αριθμητική τιμή ή μείνει κενό το κουτάκι της κατανάλωσης, η εφαρμογή εμφανίζει μήνυμα που ζητάει τη διόρθωση, το ίδιο συμβαίνει εάν ο χρήστης δεν εισάγει τιμές για τους συντελεστές των ωρών.

## **6.3 Εισαγωγή παραγωγής ενέργειας**

### **6.3.1 Εισαγωγή δεδομένων**

Για να μπορέσει ο χρήστης να εισάγει τα δεδομένα από την παραγωγή ενέργειας θα πρέπει να πατήσει το κουμπί «Εισαγωγή Παραγωγής» Εικόνα 53 πατώντας το κουμπί, ανοίγει ένα παράθυρο όπου πρέπει να επιλέξει το αρχείο .csv που θέλει να εισάγει. Το αρχείο .csv πρέπει να περιλαμβάνει μόνο αριθμητικές τιμές σε μία στήλη (στήλη Α), χωρίς επικεφαλίδες ή κενά κελιά (Εικόνα 54). Η εφαρμογή έχει τη δυνατότητα να ελέγχει το σύνολο των τιμών (συμπεριλαμβανομένου του μηδέν) και όπου διαπιστώσει ότι λείπει τιμή συμπληρώνει με την τιμή μηδέν, ώστε το σύνολο των τιμών να είναι πάντα όσο έχει δώσει ο χρήστης στο κουτάκι του συνόλου των ωρών για ενεργειακή ανάλυση ώστε να μπορέσουν να γίνουν σωστά οι υπολογισμοί. Εάν το αρχείο εισαχθεί σωστά, η εφαρμογή εμφανίζει μήνυμα με τον σύνολο των τιμών που εισήχθησαν και πόσες τιμές συμπληρώθηκαν με μηδέν σε περίπτωση που το αρχείο δεν έχει όλες τις τιμές που έχει δώσει ο χρήστης στο κουτάκι του συνόλου των ωρών για ενεργειακή ανάλυση.



**Εικόνα 53 Κουμπί «Εισαγωγή Παραγωγής»**

	A	B
1	0	
2	0	
3	0	
4	0	
5	0	
6	0	
7	0	
8	0	
9	0,139	
10	0,097	
11	0,121	
12	0,176	
13	0,393	
14	0,158	
15	0,062	
16	0	
17	0	
18	0	
19	0	
20	0	
21	0	
22	0	
23	0	
24	0	
25	0	
26	0	
27	0	
28	0	
29	0	
30	0	
31	0	
32	0,041	
33	0,993	
34	2,277	
35	3,146	
36	3,998	

Εικόνα 54 Αρχείο csv εισαγωγής στην εφαρμογή

## 6.4 Υπολογισμοί

### 6.4.1 Εισαγωγή

Έχοντας υπολογίσει την ωριαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και έχοντας εισάγει την παραγωγή ενέργειας η εφαρμογή μπορεί να υπολογίσει ορισμένους βασικούς δείκτες, τον Self-Consumption (SC), τον Self- Sufficiency (SS), τις συνολικές ώρες που η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται από την παραγωγή, την αυτονομία του συστήματος, το ποσοστό αυτοκατανάλωσης ανά ώρα, την εξαγωγή στο δίκτυο (περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας) και την ζήτηση από το δίκτυο (η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που λείπει για να καλυφθεί η κατανάλωση).

#### Self-Consumption (SC)

Ο πρώτος δείκτης που υπολογίζει, είναι ο Self Consumption (SC), που εκφράζει το ποσοστό αυτοκατανάλωσης, δηλ. πόση από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται επιτόπου στο κτίριο και δεν επιστρέφει στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (Luthander, Widén, Nilsson & Palm, 2015). Ο υπολογισμός του  $SC = (Ενέργεια\ που\ καταναλώθηκε\ επιτόπου) / (συνολική\ παραγόμενη\ ενέργεια) \times 100$  (Luthander κ.α., 2015). Στη συνέχεια αυτό αθροίζεται για το σύνολο των ωρών και όχι μόνο για τις ώρες που έχουμε μη μηδενικό συντελεστή ώστε να αντιπροσωπεύει όλο την περίοδο που έχει δώσει ο χρήστης και πολλαπλασιάζεται με το 100 για να βγει το ποσοστό. Ο δείκτης SC είναι χρήσιμος διότι μπορεί ο ιδιοκτήτης του κτιρίου να καταλάβει εάν χρησιμοποιεί καλά την παραγωγή ενέργειας του κτιρίου. Ένα παράδειγμα καλής χρήσης είναι, κατά τις ζεστές ημέρες του καλοκαιριού, το μεσημέρι και νωρίς το απόγευμα υπάρχει συνήθως περισσότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω χρήσης των κλιματιστικών μονάδων, εάν έχουν τοποθετηθεί φωτοβολταϊκά πάνελ θα υπάρχει και μεγάλη παραγωγή ενέργειας που θα καταναλώνεται επιτόπου χωρίς να χρειάζεται να διοχετευτεί στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή να αποθηκευτεί.

### **Self- Sufficiency (SS)**

Ο δεύτερος δείκτης που υπολογίζει, είναι ο Self- Sufficiency (SS), που εκφράζει το ποσοστό της κατανάλωσης που καλύφθηκε άμεσα από την παραγωγή. Ο υπολογισμός του  $SS = (πόση\ από\ την\ παραγόμενη\ ενέργεια\ καταναλώθηκε) / (συνολική\ κατανάλωση\ ενέργειας)$  (Luthander κ.α., 2015). Στη συνέχεια αυτό αθροίζεται για τις ώρες που έχει δώσει ο χρήστης και όχι μόνο για τις ώρες που έχουμε μη μηδενικό συντελεστή ώστε να αντιπροσωπεύει όλη την περίοδο ενεργειακής ανάλυσης που έχει δώσει ο χρήστης και πολλαπλασιάζεται με το 100 για να βγει το ποσοστό. Ο δείκτης SS δείχνει εκφράζει την ποσοστιαία κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από την άμεση παραγωγή χωρίς αποθήκευση. Δηλαδή εάν το ποσοστό του δείκτη αυτού είναι μεγάλο τότε υπάρχει μεγάλη χρονική ταύτιση μεταξύ της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου οπότε ενδεχομένως να μην χρειάζεται να γίνεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και η εξάρτηση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι λιγότερη. Εάν το ποσοστό του δείκτη αυτού είναι μικρό τότε δείχνει ότι η χρονική ταύτιση μεταξύ κατανάλωσης και παραγωγής δεν είναι μεγάλη και πρέπει να γίνουν διορθωτικές κινήσεις όπως εργασίες που χρειάζονται μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας να προγραμματίζονται να γίνονται την ώρα που υπάρχει και υψηλή παραγωγή ενέργειας.

### **Ώρες κάλυψης φορτίου (Load Matching)**

Η εφαρμογή υπολογίζει και πόσες από τις ώρες που δίνει ο χρήστης για την ενεργειακή ανάλυση η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ίση ή μεγαλύτερη από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ο υπολογισμός πραγματοποιείται πολύ ευκολά με την εφαρμογή να ελέγχει και να αθροίζει στο τέλος ποιες ώρες η παραγωγή είναι περισσότερη ή ίση με την κατανάλωση. Εάν οι ώρες που η παραγωγή καλύπτει την κατανάλωση είναι πολλές σημαίνει ότι το σύστημα δουλεύει καλά τις περισσότερες ώρες. Δηλαδή υπάρχει χρονική ταύτιση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης οπότε ενδεχομένως να μην χρειάζεται να γίνεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας ή αλλαγή της ώρας για τις εργασίες που απαιτούν πολλή ηλεκτρική ενέργεια.

### **Αυτονομία**

Η εφαρμογή υπολογίζει και το ποσοστό αυτονομίας. Για να γίνει ο υπολογισμός αυτός η εφαρμογή διαιρεί την συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει από το άθροισμα των τιμών του αρχείου .csv που εισήχθη για τον υπολογισμό της προς τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που είναι η τιμή που έχει δοθεί στο κουτάκι της κατανάλωσης ενέργειας. Ενώ ο υπολογισμός του δείκτη SS απαιτεί να υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ταυτόχρονα με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αλλιώς δεν το λαμβάνει υπόψη, στον υπολογισμό της αυτονομίας δεν υπάρχει αυτό. Δεν εξαρτάται δηλαδή από το πότε παράχθηκε ή καταναλώθηκε η ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η πληροφορία είναι χρήσιμη διότι δείχνει κατά πόσο και σε ποιο βαθμό ένα κτίριο μπορεί να είναι αυτόνομο (δηλ. να μην εξαρτάται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας) στην περίπτωση που η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί, βοηθώντας έτσι στο σχεδιασμό αυτόνομων συστημάτων. Χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες που υπάρχουν όταν γίνεται μετατροπή ενέργειας από μία μορφή σε άλλη π.χ. από ηλεκτρική σε χημική και μετά πάλι σε ηλεκτρική.

### **Ποσοστό αυτοκατανάλωσης ανά ώρα, εξαγωγή και ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.**

Τέλος, η εφαρμογή κάνει ορισμένους υπολογισμούς τους οποίους εξάγει σε ένα αρχείο .csv. Υπολογίζει το ποσοστό αυτοκατανάλωσης ανά ώρα, δηλ. τι ποσοστό της κατανάλωσης καλύφθηκε για κάθε ώρα. Αυτό παρέχει πιο λεπτομερή χρονική ανάλυση όσον αφορά την ενεργειακή συμπεριφορά που είναι χρήσιμη για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής π.χ. εάν η παραγωγή υπερκαλύπτει τη ζήτηση τις πρωινές ώρες που πιθανόν να μην υπάρχουν ηλεκτρικές καταναλώσεις αλλά τις απογευματινές ώρες που οι καταναλώσεις

είναι πολύ μεγάλες η παραγωγή μπορεί να καλύψει ένα ελάχιστο ποσοστό, τότε σε περίπτωση που έχουν εγκατασταθεί φωτοβολταϊκά πάνελ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ίσως θα πρέπει να προσανατολιστούν δυτικά ώστε να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκείνες τις ώρες παρόλο που η συνολική παραγωγή ενέργειας θα μειωθεί σε σχέση με τον Νότιο προσανατολισμό.

Η εξαγωγή της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αλλά δεν καταναλώνεται επιτόπου με αποτέλεσμα να διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Υπολογίζεται ως η παραγωγή μείον την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά ώρα, όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση. Εάν υπάρχει πολύ περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, τότε μπορεί το σύστημα να είναι υπερδιαστασιοποιημένο που σημαίνει μεταξύ άλλων και μεγαλύτερο αρχικό κόστος εγκατάστασης.

Η ζήτηση από το δίκτυο είναι η ενέργεια που απαιτείται όταν η παραγωγή είναι ανεπαρκής. Υπολογίζεται αφαιρώντας την παραγωγή από τη ζήτηση (όταν η διαφορά είναι θετική). Μεγάλη ζήτηση από το δίκτυο σημαίνει ότι το κτίριο έχει χαμηλή αυτάρκεια και είτε η παραγωγή είναι ανεπαρκής είτε υπάρχει υψηλή κατανάλωση τις ώρες που η παραγωγή είναι χαμηλή.

#### 6.4.2 Ενδεικτικό Υπολογιστικό Παράδειγμα

Για να μπορέσουν να γίνουν τα παραπάνω περισσότερα κατανοητά, θα χρησιμοποιηθεί το παρακάτω απλό παράδειγμα. Στον Πίνακα 3 δίδονται τα δεδομένα του παραδείγματος.

**Πίνακας 3 Τιμές παραδείγματος**

Ωρα	Παραγωγή (kWh)	Κατανάλωση (kWh)
1	2	2
2	3	5
3	6	4
4	4	3
5	2	4

#### Υπολογισμός SC και της εισαγωγής ή ζήτησης από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Για την 1<sup>η</sup> ώρα:  $\min(\text{παραγωγή, κατανάλωση}) = \min(2, 2) = 2 \text{ kWh}$ , όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται καταναλώνεται επιτόπου.

Για την 2<sup>η</sup> ώρα:  $\min(3, 5) = 3 \text{ kWh}$  και 2 kWh ζητούνται από το δίκτυο



Για την 3<sup>η</sup> ώρα:  $\min(6, 4) = 4$  kWh και 2 kWh εξάγονται στο δίκτυο

Για την 4<sup>η</sup> ώρα:  $\min(4, 3) = 3$  kWh, και 1 kWh εξάγεται στο δίκτυο

Για την 5<sup>η</sup> ώρα:  $\min(2, 4) = 2$  kWh και 2 kWh ζητούνται από το δίκτυο

Οπότε:

Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι:  $\Sigma \text{ παραγωγή} = 2+3+6+4+2 = 17\text{kWh}$

Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι:  $\Sigma \text{ κατανάλωση} = 2+5+4+3+4 = 18\text{kWh}$

Το συνολικό ποσό από την παραγόμενη ενέργεια θα είναι  $\Sigma \min(\text{παραγωγή, κατανάλωση}) = 2+3+4+3+2 = 14\text{kWh}$

Οπότε το SC υπολογίζεται ως εξής:  $SC = \frac{\Sigma \min(\text{παραγωγή, κατανάλωση})}{\Sigma \text{ παραγωγή}} \times 100 = \frac{14\text{kWh}}{17\text{kWh}} \times 100 = 82,35\%$ , αυτό σημαίνει ότι το 82,35% της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται επιτόπου και δεν διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

#### **Υπολογισμός SS**

Το SS υπολογίζεται ως εξής:  $SS = \frac{\Sigma \min(\text{παραγωγή, κατανάλωση})}{\Sigma \text{ κατανάλωσης}} \times 100 = \frac{14\text{kWh}}{18\text{kWh}} \times 100 = 77,78\%$ , αυτό σημαίνει ότι το 77,78% της κατανάλωσης καλύφθηκε άμεσα από την παραγωγή.

#### **Υπολογισμός συνολικών ωρών όπου η παραγωγή καλύπτει την κατανάλωση**

Από τον πίνακα φαίνεται ότι στην 1<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, και 4<sup>η</sup> ώρα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι είτε ίση, είτε μεγαλύτερη από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε το σύνολο των ωρών όπου η παραγωγή καλύπτει την κατανάλωση είναι 3 και ποσοστό  $\frac{3h}{5h} \times 100 = 60\%$ .

#### **Υπολογισμός αυτονομίας**

Για τον υπολογισμό της αυτονομίας χρησιμοποιείται η συνολική παραγωγή και η συνολική κατανάλωση, οπότε:  $\text{Αυτονομία} = \frac{\Sigma \text{ παραγωγή}}{\Sigma \text{ κατανάλωση}} \times 100 = \frac{17\text{kWh}}{18\text{kWh}} \times 100 = 94,44\%$ , αυτό σημαίνει ότι εάν με κάποιο τρόπο μπορεί να αποθηκευτεί η περίσσεια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμοποιηθεί όποτε χρειάζεται περισσότερη ενέργεια από εκείνη που παράγει το σύστημα τη δεδομένη χρονική στιγμή, η αυτονομία του κτιρίου θα άγγιζε το 94,44%, στο ποσοστό αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω μετατροπής ενέργειας από μια μορφή σε άλλη, με αποτέλεσμα η πραγματική αυτονομία να είναι μικρότερη, λόγω απωλειών μετατροπής.

### Υπολογισμός ποσοστού αυτοκατανάλωσης ανά ώρα

Το ποσοστό αυτοκατανάλωσης της κάθε ώρας προκύπτει διαιρώντας την παραγωγή της κάθε ώρας με την κατανάλωση της κάθε ώρας πολλαπλασιαζόμενο με το 100.

Οπότε:

$$\text{Για την 1}^{\text{η}} \text{ ώρα: } \frac{\text{Παραγωγή 1ης ώρας}}{\text{Κατανάλωση 1ης ώρας}} \times 100 = \frac{2}{2} \times 100 = 100\%$$

$$\text{Για τη 2}^{\text{η}} \text{ ώρα: } \frac{3}{5} \times 100 = 60\% \text{ το υπόλοιπο } 40\% \text{ ζητείται από το δίκτυο}$$

$$\text{Για τη 3}^{\text{η}} \text{ ώρα: } \frac{6}{4} \times 100 = 100\% \text{ και ένα ποσοστό } 50\% \text{ εξάγεται στο δίκτυο}$$

$$\text{Για τη 4}^{\text{η}} \text{ ώρα: } \frac{4}{3} \times 100 = 100\% \text{ και ένα ποσοστό } 33,33\% \text{ εξάγεται στο δίκτυο}$$

$$\text{Για τη 5}^{\text{η}} \text{ ώρα: } \frac{2}{4} \times 100 = 50\% \text{ το υπόλοιπο } 50\% \text{ ζητείται από το δίκτυο}$$

## 6.5 Χρήση της εφαρμογής στη μελέτη περίπτωσης

Η εφαρμογή χρησιμοποιείται για την ενεργειακή ανάλυση των 6 σεναρίων τοποθέτησης φωτοβολταϊκών συστημάτων της κατοικίας. Το συνολικό εύρος ανάλυσης είναι ένα έτος (8760h). Αρχικά δίδεται το πόσο καταναλώνει η κατοικία (2640kWh), στη συνέχεια δίδεται το σύνολο των ωρών που θα γίνει η ενεργειακή ανάλυση (8760 ώρες για ένα έτος). Έπειτα ορίζεται ένα προφίλ κατανάλωσης για τη συγκεκριμένη κατοικία, δηλ. ποιες ώρες υπάρχει κατανάλωση και σε τι ποσοστό. Η κατανάλωση, το σύνολο των ωρών που γίνεται η ενεργειακή ανάλυση και το προφίλ κατανάλωσης είναι ίδια για όλα τα σενάρια, Εικόνα 55.

Ωρα	Καθημερινές	Σαββατοκύριακο
4:00	0	0
5:00	0	0
6:00	0	0
7:00	0.5	0
8:00	0.5	0.5
9:00	0	0.7
10:00	0	0.7
11:00	0	0.7
12:00	0	0.7
13:00	1	1
14:00	1	1
15:00	1	1
16:00	1	1
17:00	0.5	0.5
18:00	0.5	0.5
19:00	0.5	0.5
20:00	1	1
21:00	1	1
22:00	0.5	0.7
23:00	0.5	0.7

Εικόνα 55 Κοινά δεδομένα

Το προφίλ κατανάλωσης βασίζεται σε τυπικές οικιακές συνήθειες: χαμηλή κατανάλωση το πρωί, κορύφωση το μεσημέρι και ήπια χρήση το βράδυ. Τα σαββατοκύριακα παρατηρείται ομοιόμορφη κατανάλωση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας (Εικόνα 55).

### **1<sup>ο</sup> σενάριο**

Από το λογισμικό BIMsolar για το 1<sup>ο</sup> σενάριο, γίνεται εξαγωγή ενός αρχείου .csv που περιέχει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (AC) από την έξοδο του inverter ανά ώρα. Αυτό το αρχείο τροποποιείται ώστε να μείνει μία στήλη που περιέχει μόνο τις τιμές και εισάγεται στην εφαρμογή. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται και για όλα τα υπόλοιπα σενάρια.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής για το συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζονται ως εξής:

Self-Consumption (SC): 41,14%

Self-Sufficiency (Ss): 46,29%

Load Matching: 1562h Ποσοστό: 17,83%

Αυτονομία: 112,52%

Η εφαρμογή εξάγει επίσης ένα αρχείο .csv για το 1<sup>ο</sup> σενάριο που περιέχει αποτελέσματα ανά ώρα για το ποσοστό αυτοκατανάλωσης, την περίσσια ενέργειας και την ζήτηση από το δίκτυο.

### **2<sup>ο</sup> σενάριο**

Η εφαρμογή μετά τους υπολογισμούς δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

Self-Consumption (SC): 33,54%

Self-Sufficiency (Ss): 35,08%

Load Matching: 946h Ποσοστό: 10,8%

Αυτονομία: 104,59%

Η εφαρμογή εξάγει επίσης ένα αρχείο .csv για το 2<sup>ο</sup> σενάριο που περιέχει αποτελέσματα ανά ώρα για το ποσοστό αυτοκατανάλωσης, την περίσσια ενέργειας και την ζήτηση από το δίκτυο.

### **3<sup>ο</sup> σενάριο**

Η εφαρμογή μετά τους υπολογισμούς δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

Self-Consumption (SC): 23,74%

Self-Sufficiency (Ss): 51,55%

Load Matching: 2051h Ποσοστό: 23,41%

Αυτονομία: 217,11%

Η εφαρμογή εξάγει επίσης ένα αρχείο .csv για το 3<sup>ο</sup> σενάριο που περιέχει αποτελέσματα ανά ώρα για το ποσοστό αυτοκατανάλωσης, την περίσσια ενέργειας και την ζήτηση από το δίκτυο.

#### **1<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο**

Η εφαρμογή μετά τους υπολογισμούς δίδει τα παρακάτω αποτελέσματα:

Self-Consumption (SC): 6,85%

Self-Sufficiency (Ss): 59,4%

Load Matching: 2692h Ποσοστό: 30,73%

Αυτονομία: 867,55%

Η εφαρμογή εξάγει επίσης ένα αρχείο .csv για το 1<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο που περιέχει αποτελέσματα ανά ώρα για το ποσοστό αυτοκατανάλωσης, την περίσσια ενέργειας και την ζήτηση από το δίκτυο.

#### **2<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο**

Η εφαρμογή μετά τους υπολογισμούς δίδει τα παρακάτω αποτελέσματα:

Self-Consumption (SC): 18,52%

Self-Sufficiency (Ss): 53,66%

Load Matching: 2058h Ποσοστό: 23,49%

Αυτονομία: 289,68%

Η εφαρμογή εξάγει επίσης ένα αρχείο .csv για το 2<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο που περιέχει αποτελέσματα ανά ώρα για το ποσοστό αυτοκατανάλωσης, την περίσσια ενέργειας και την ζήτηση από το δίκτυο.

#### **3<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο**

Η εφαρμογή μετά τους υπολογισμούς δίδει τα παρακάτω αποτελέσματα:

Self-Consumption (SC): 5,19%

Self-Sufficiency (Ss): 60,07%

Load Matching: 2775h Ποσοστό: 31,68%

Αυτονομία: 1157,22%

Η εφαρμογή εξάγει επίσης ένα αρχείο .csv για το 3<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο που καταγράφει ανά ώρα το ποσοστό αυτοκατανάλωσης, την περίσσια παραγωγής και τη συμπληρωματική ζήτηση από το δίκτυο.

**Σχολιασμός και αξιολόγηση ενεργειακών δεικτών**

Από τα παραπάνω αποτελέσματα για την συγκεκριμένη κατοικία και το συγκεκριμένο προφίλ κατανάλωσης, προκύπτει ότι εάν ο σκοπός της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η κατανάλωση επιτόπου της παραγόμενης ενέργειας με μικρό αρχικό κεφάλαιο τότε, το 1<sup>ο</sup> σενάριο φαίνεται το πλέον αποδοτικό από πλευράς αυτοκατανάλωσης (SC) με το 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> να ακολουθούν. Εάν το ζητούμενο είναι η γρήγορη απόσβεση και το μεγαλύτερο περιθώριο κέρδους χωρίς το ύψος του αρχικού κεφαλαίου να είναι πρόβλημα τότε το 1<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο αποτελεί την πλέον κερδοφόρα επιλογή βάσει απόδοσης και περιόδου απόσβεσης. Το 3<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο έχει το μεγαλύτερο ποσοστό στο πόση κατανάλωση ενέργειας καλύφθηκε από την παραγωγή (SS) όπως και τη μεγαλύτερη αυτονομία και τις περισσότερες ώρες όπου η παραγωγή καλύπτει τη ζήτηση αλλά η απόσβεση του συστήματος γίνεται πολύ αργά. Επίσης, συμπεραίνεται ότι σε κάθε περίπτωση, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μειώνει την εξάρτηση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (που η περισσότερη παραγωγή γίνεται με συμβατικό τρόπο) συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στην αύξηση της ενεργειακής ανεξαρτησίας.

## 7. Συμπεράσματα

### 7.1 Βασικά συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ενεργειακή συμπεριφορά μιας κατοικίας μέσω της τοποθέτησης ή/και ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού BIMsolar και ενός προσαρμοσμένου υπολογιστικού εργαλείου ενεργειακής ανάλυσης που αναπτύχθηκε για τον σκοπό αυτό. Εξετάστηκαν συνολικά έξι σενάρια, με διαφορετικές επιλογές τεχνολογίας (BAPV, BIPV) και γεωμετρικής εγκατάστασης. Τα τρία πρώτα σενάρια εστιάζουν στην κάλυψη της ζήτησης και τα τρία επιπλέον σενάρια στη μεγιστοποίηση της παραγωγής.

Για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επιλέχθηκε το δώμα της κατοικίας διότι δέχεται το μεγαλύτερο ποσό συνολικής ακτινοβολίας σε σχέση με τις άλλες πλευρές. Για την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επιλέχθηκε η πλευρά με Νοτιοανατολικό προσανατολισμό (2<sup>ο</sup> σενάριο και 3<sup>ο</sup> σενάριο) και οι πλευρές με Νοτιοανατολικό και Βορειοανατολικό προσανατολισμό (2<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο και 3<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο) διότι δέχονται ικανοποιητικό ποσοστό συνολικής ακτινοβολίας και δεν υπάρχουν και σκιάσεις.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι, παρόλο που η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος οδηγεί σε μεγαλύτερη ενεργειακή αυτάρκεια, δεν εξασφαλίζει απαραίτητα καλύτερη οικονομική απόδοση. Το 1<sup>ο</sup> βασικό σενάριο, με περιορισμένο κόστος και καλή ευθυγράμμιση με το προφίλ κατανάλωσης, παρουσίασε την καλύτερη ισορροπία μεταξύ SC, SS, final yield (για την περιοχή που βρίσκεται η κατοικία) και ROI. Το 2<sup>ο</sup> βασικό σενάριο παρουσιάζει αυξημένο κόστος εγκατάστασης το δεύτερο χαμηλότερο final yield και μικρότερα SC και SS σε σχέση με το πρώτο. Το ROI είναι το δεύτερο χαμηλότερο κάτι που καθιστά την επένδυση μη βιώσιμη οικονομικά. Το 3<sup>ο</sup> βασικό σενάριο παρουσιάζει καλό SS αλλά χαμηλό SC και final yield με το ROI να δείχνει ότι η επένδυση είναι οριακά μη βιώσιμη. Το 1<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας, το χαμηλότερο SC και υψηλά τα SS και final yield. Έχει το καλύτερο ROI από όλα τα σενάρια με την απόσβεση να γίνεται σε 8,2 έτη που είναι και η πιο σύντομη. Το 2<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο έχει χαμηλό SC, καλό SS και το χαμηλότερο final yield. Το ROI είναι το χαμηλότερο με την επένδυση να είναι μη βιώσιμη. Το 3<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο έχει το μικρότερο SC και το μεγαλύτερο SS, καλό final yield και η επένδυση είναι οριακά βιώσιμη οικονομικά βάσει του ROI. Συγκεντρωτικά τα παραπάνω παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

**Πίνακας 4 Αποτελέσματα σεναρίων**

Σενάριο	kWp	Επιφάνεια φωτοβολταϊκών (m <sup>2</sup> )	Παραγόμενη AC (kWh)	Self- Consumption (%)	Self- Sufficiency (%)	Ώρες Κάλυψης (h)	Αυτονομία (%)	Final Yield (kWh/kWp)	Επένδυση (€)	Payback (έτη)	ROI 20ετίας (%)	Βιωσιμότητα
1 <sup>ο</sup> (BAPV)	1,8	13	2970	<b>41,14</b>	46,29	1562 (17,83%)	112,52	1614	<b>2200</b>	10,7	86,7	Ναι
2 <sup>ο</sup> (BIPV)	3	20	2760	33,54	35,08	946 (10,8%)	104,59	915	7000	>20	-41,3	Όχι
3 <sup>ο</sup> (Συνδυασμός)	4,9	33	5732	23,74	51,55	2051 (23,41%)	217,11	1180	9200	20	-15,3	Οριακά Όχι
1 <sup>ο</sup> επιπλέον (BAPV)	13,3	95	22903	6,85	59,4	2692 (30,73%)	867,55	<b>1717</b>	12600	<b>8,2</b>	<b>142,5</b>	Ναι
2 <sup>ο</sup> επιπλέον (BIPV)	10,6	73	7647	18,52	53,66	2058 (23,49%)	289,68	718	16800	>20	-56,9	Όχι
3 <sup>ο</sup> επιπλέον (Συνδυασμός)	<b>24</b>	<b>168</b>	<b>30551</b>	5,19	<b>60,07</b>	<b>2775 (31,68%)</b>	<b>1157,22</b>	1274	29400	18,1	10,3	Οριακά Ναι

Συνολικά, από τα οικονομοτεχνικά αποτελέσματα προκύπτει πως η απλή τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ στο δώμα (1<sup>ο</sup> σενάριο) αποτελεί τη βέλτιστη λύση από πλευράς απόδοσης επένδυσης και χαμηλού αρχικού κεφαλαίου με ικανοποιητικό χρόνο απόσβεσης (~11 έτη). Η χρήση BIPV τεχνολογίας αυξάνει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης, χωρίς να το αντισταθμίζει με ανάλογη αύξηση στην παραγόμενη ενέργεια ή στα έσοδα, καθιστώντας την προς το παρόν μη συμφέρουσα επιλογή.

## 7.2 Επιστημονική συμβολή

Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα:

Ποιό σενάριο μεγιστοποιεί την αυτοκατανάλωση; → Το 1<sup>ο</sup> βασικό σενάριο ( $SC \approx 41\%$ ).

Ποιό σενάριο επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη οικονομική απόδοση; → Το 1<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο (ROI 142% σε 20 έτη).

Ποιό σενάριο έχει τις περισσότερες ώρες όπου η παραγωγή καλύπτει πλήρως τη ζήτηση; → Το 3<sup>ο</sup> επιπλέον σενάριο (Load Matching 2775 ώρες).

Ποιός συνδυασμός τεχνολογιών και χωροθέτησης είναι βιώσιμος; → BAPV σε δώμα, με περιορισμένη χρήση BIPV.

Ποιό το ενεργειακό όφελος συνολικά; → Η μείωση της εξάρτησης από το δίκτυο έως και ~60% στο καλύτερο σενάριο.

## 7.3 Περιορισμοί της έρευνας

Η ανάλυση βασίστηκε σε ετήσια στατιστικά προφίλ χωρίς ενσωμάτωση δυναμικών ή real-time δεδομένων. Η οικονομική εκτίμηση έγινε κατά προσέγγιση με σταθερές τιμές αγοράς/πώλησης και δεν περιλαμβάνει αποθήκευση ή δυναμική τιμολόγηση.

## 7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ανάλυση με πραγματικά μετρημένα δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης. Ενσωμάτωση μοντέλων αποθήκευσης (μπαταρίες) και έξυπνης διαχείρισης φορτίου (smart load shifting). Επέκταση του υπολογιστικού εργαλείου με δυνατότητα σύγκρισης πολλαπλών σεναρίων και οπτικοποίησης δεδομένων. Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε διαφορετικού τύπου κτίρια (π.χ. σχολεία, μικρές επιχειρήσεις).



# Βιβλιογραφία

## Ξενόγλωσση

- Attoye, D. E., Tabet Aoul, K. A., & Hassan, A. (2017). A review on building integrated photovoltaic façade customization potentials. *Sustainability*, 9(12), 2287.
- Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliveira, A. C., del Caño, T., Rico, E., Lechón, J. L., Andrade, L., Mendes, A., & Atlı, Y. B. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering science and technology, an international journal*, 20(3), 833-858.
- Cao, X., Li, N., Li, Y., Che, L., Yu, B., & Liu, H. (2023). A review of photovoltaic/thermal (PV/T) technology applied in building environment control. *Energy and Built Environment*.
- Diaz, N., Luna, A., & Duarte, O. (2011, September). Improved MPPT short-circuit current method by a fuzzy short-circuit current estimator. In 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (pp. 211-218). IEEE.
- Elnozahy, A., Abd-Elbary, H., & Abo-Elyousr, F. K. (2024). Efficient energy harvesting from PV Panel with reinforced hydrophilic nano-materials for eco-buildings. *Energy and Built Environment*, 5(3), 393-403.
- Faranda, R. S., Fumagalli, K., & Oliva, F. (2023). Tips for Buildings Energy Saving: Results of Some Research. *Energies*, 16(3), 1284.
- Kapsalis, V., Maduta, C., Skandalos, N., Bhuvad, S. S., D'Agostino, D., Yang, R. J., Udayraj., Parker, D., & Karamanis, D. (2024). Bottom-up energy transition through rooftop PV upscaling: remaining issues and emerging upgrades towards NZEBs at different climatic conditions. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 100083.
- Kirimtat, A., Tasgetiren, M. F., Brida, P., & Krejcar, O. (2022). Control of PV integrated shading devices in buildings: A review. *Building and Environment*, 214, 108961.
- Kongkanjana, K., & Khwan-On, S. (2022, March). Maximum Power Point Tracking for Solar Energy System Using Vmpp-Current Based Method. In 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON) (pp. 1-4). IEEE.
- Kuhn, T. E., Erban, C., Heinrich, M., Eisenlohr, J., Ensslen, F., & Neuhaus, D. H. (2021). Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). *Energy and Buildings*, 231, 110381.

- Li, H. X., Zhang, Y., Edwards, D., & Hosseini, M. R. (2020). Improving the energy production of roof-top solar PV systems through roof design. *In Building simulation* (Vol. 13, pp. 475-487). Tsinghua University Press.
- Li, S. Y., & Han, J. Y. (2022). The impact of shadow covering on the rooftop solar photovoltaic system for evaluating self-sufficiency rate in the concept of nearly zero energy building. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103821.
- Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., & Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied energy*, 142, 80-94.
- Rodríguez, L. R., Duminil, E., Ramos, J. S., & Eicker, U. (2017). Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. *Solar Energy*, 146, 264-275.
- Sailor, D. J., Anand, J., & King, R. R. (2021). Photovoltaics in the built environment: A critical review. *Energy and Buildings*, 253, 111479.
- Satpathy, P. R., Babu, T. S., Shanmugam, S. K., Popavath, L. N., & Alhelou, H. H. (2021). Impact of uneven shading by neighboring buildings and clouds on the conventional and hybrid configurations of roof-top PV arrays. *IEEE Access*, 9, 139059-139073.
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2016). A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. *Energy and Buildings*, 128, 99-110.
- te Heesen, H., Herbort, V., & Rumpler, M. (2019). Performance of roof-top PV systems in Germany from 2012 to 2018. *Solar Energy*, 194, 128-135.
- Tian, J., & Ooka, R. (2024). Evaluation of solar energy potential for residential buildings in urban environments based on a parametric approach. *Sustainable Cities and Society*, 106, 105350.
- Wang, C., Ji, J., Song, Z., & Ke, W. (2024). Performance analysis and capacity configuration of building energy system integrated with PV/T technology under different operation strategies. *Energy*, 130679.
- Wilson, G. M., Al-Jassim, M., Metzger, W. K., Glunz, S. W., Verlinden, P., Xiong, G., Mansfield, L. M., Stanbery, B. J., Zhu, K., Tamboll, A. C., Peibst, R., Catchpole, K., Reese, M. O., Klinga, C. S., Denholm, P., Morjaria, M., Deceglie, M. G., Freeman, J. M., Mikofski, M. A., Jordan, D. C., Tamizhmani, G., & Sulas-Kern, D. B. (2020). The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(49), 493001.

- Yu, G., Yang, H., Yan, Z., & Ansah, M. K. (2021). A review of designs and performance of façade-based building integrated photovoltaic-thermal (BIPVT) systems. *Applied thermal engineering*, 182, 116081.
- Zhong, J., Zhang, W., Xie, L., Zhao, O., Wu, X., Zeng, X., & Guo, J. (2023). Development and challenges of bifacial photovoltaic technology and application in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113706.

## Ελληνόγλωσση

- Τσαλίδης, Φ. (1985). Φωτοβολταϊκή Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική. Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Διδακτορική διατριβή). Διαθέσιμο από: Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών.
- Φραγκιαδάκης, Ι. Ε. (2004). Φωτοβολταϊκά Συστήματα. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.