



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ SKELION (SKETCHUP)



**ΒΙΔΑΛΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2024



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING  
THERMAL ENGINEERING SECTION

## **DIPLOMA THESIS**

# **PV SYSTEM SIMULATION WITH SKELION (SKETCHUP)**



**VIDALIS EVANGELOS**

**SUPERVISOR: Prof. TZIVANIDIS CHRISTOS**

**ATHENS, JUNE 2024**



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην αρχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον επιβλέπων καθηγητή κ. Χρήστο Τζιβανίδη για τη συνεργασία, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο, καθώς και προς τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που γνώρισα στη σχολή με τους οποίους περάσαμε μαζί αυτά τα χρόνια και εκτός από όλες τις όμορφες στιγμές που ζήσαμε, με ώθησαν ο καθένας με τον τρόπο του στο να είμαι συνεχώς καλύτερος.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και την κοπέλα μου που ήταν εκεί και με στήριξαν σε κάθε στιγμή που τους χρειάστηκα.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	4
ΣΥΝΟΨΗ .....	7
ABSTRACT .....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	9
1.1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΡΙΣΗ .....	9
1.2. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	11
2. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	13
2.1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	16
2.1.1. ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	17
2.1.2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	19
2.2. ΜΕΡΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	20
2.2.1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ.....	20
2.2.2. ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΙΣ ΤΑΣΗΣ .....	21
3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	22
3.1. PVSYS.....	22
3.2. PVGIS.....	23
3.3. TRNSYS .....	23
3.4. SKELION.....	23
4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ.....	25
4.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΤΙΡΙΟΥ .....	25
4.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ - SKETCHUP.....	26
4.2.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΥΡΙΑΣ ΔΟΜΗΣ ΚΤΙΡΙΟΥ.....	26
4.2.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΛΙΜΑΚΟΣΤΑΣΙΩΝ .....	28
4.2.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΑΡΑΘΥΡΩΝ .....	29
4.2.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΡΟΦΗΣ .....	32
4.2.5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΚΥΡΙΑΣ ΕΙΣΟΔΟΥ.....	34
4.2.6. ΟΨΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΟΥ .....	35
4.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΧΩΡΟΥ .....	39
4.3.1. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ .....	39
4.3.2. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΟΠΑΤΙΩΝ.....	42
4.3.3. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΤΙΡΙΩΝ .....	44
4.3.4. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΔΕΝΤΡΩΝ .....	46
4.3.5. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ N .....	47

5.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	49
5.1.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ.....	49
5.2.	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΙΔΑΝΙΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ .	56
5.3.	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ .....	61
5.4.	ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....	63
5.4.1.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ .....	63
5.4.2.	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΤΗ ΣΤΕΓΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ .....	68
5.4.3.	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ .....	74
5.4.4.	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΠΡΟΣ ΤΑ ΔΥΤΙΚΑ .....	78
5.4.5.	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΤΙΣ ΠΛΕΥΡΕΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ .....	80
6.	ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	87
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	91
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	92
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	99
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	103

## ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία για την ολοκλήρωση των σπουδών της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, έχει ως στόχο τη διεξαγωγή προσομοιώσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων που θα εγκατασταθούν στο κτίριο N των εργαστηρίων της σχολής στην Πολυτεχνειούπολη, με τη χρήση του λογισμικού Skelion.

Αρχικά, με χρήση της διαστασιολόγησης του κτιρίου που βασίστηκε σε υπολογισμό των διαστάσεων του από χάρτες τρισδιάστατης απεικόνισης του διαδικτύου αλλά και παρατήρηση και μέτρηση διαστάσεων στον χώρο του κτιρίου, ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του κτιρίου αλλά και του περιβάλλοντος χώρου. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση ορισμένων παραμέτρων, όπως ο τύπος του φωτοβολταϊκού πλαισίου, η σκίαση των επιφανειών αλλά και η ιδανική κλίση και ο προσανατολισμός των πλαισίων, με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση του ηλιακού δυναμικού. Στο επόμενο και κύριο μέρος της εργασίας, εξετάζονται ορισμένα σενάρια τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων τόσο στην οροφή του κτιρίου όσο και περιμετρικά και με βάση τα αποτελέσματα πραγματοποιείται και οικονομική ανάλυση και σύγκριση για την εύρεση του συστήματος με τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση που θα είναι όσο το δυνατόν περισσότερο κερδοφόρο.

Για την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων εκτός από το λογισμικό Skelion, χρησιμοποιήθηκαν κατά σειρά και τα λογισμικά Google Earth, SketchUp, Placemaker και Excel.

## ABSTRACT

This diploma thesis, for the completion of the studies at the School of Mechanical Engineering of the National Technical University of Athens, aims to conduct simulations of photovoltaic systems to be installed in building N of the school's laboratories at the Polytechnic Campus, using the Skelion software.

Initially, using the dimensions of the building based on the calculation from three-dimensional rendering maps from the internet as well as observation and measurement of dimensions on-site, the design of the building and the surrounding area was completed. Subsequently, an analysis of certain parameters was carried out, such as the type of photovoltaic panel, the shading on the surfaces, and the optimal tilt and orientation of the panels, aiming at the optimal utilization of solar energy potential. In the next and main part of the thesis, certain scenarios for the placement of photovoltaic panels both on the roof of the building and around it are examined, and based on the results, an economic analysis and comparison are carried out to find the system with the optimal energy performance that will be as profitable as possible.

For the completion of the simulations, apart from the Skelion software, Google Earth, SketchUp, Placemaker and Excel software were also used sequentially.

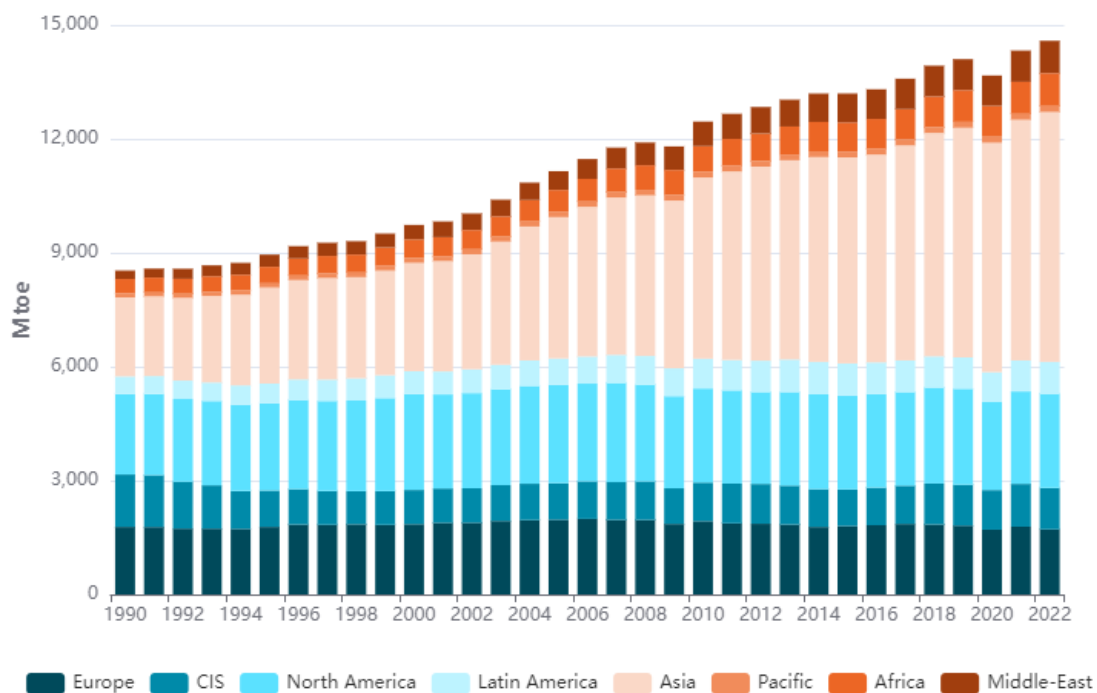


# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια τόσο η ενεργειακή κρίση όσο και η κλιματική αλλαγή αποτελούν ζητήματα, των οποίων η αντιμετώπιση κρίνεται απαραίτητη όχι μόνο για τη βραχυπρόθεσμη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, αλλά και μακροπρόθεσμα για τη διασφάλιση βιώσιμης ανθρώπινης ζωής στον πλανήτη Γη.

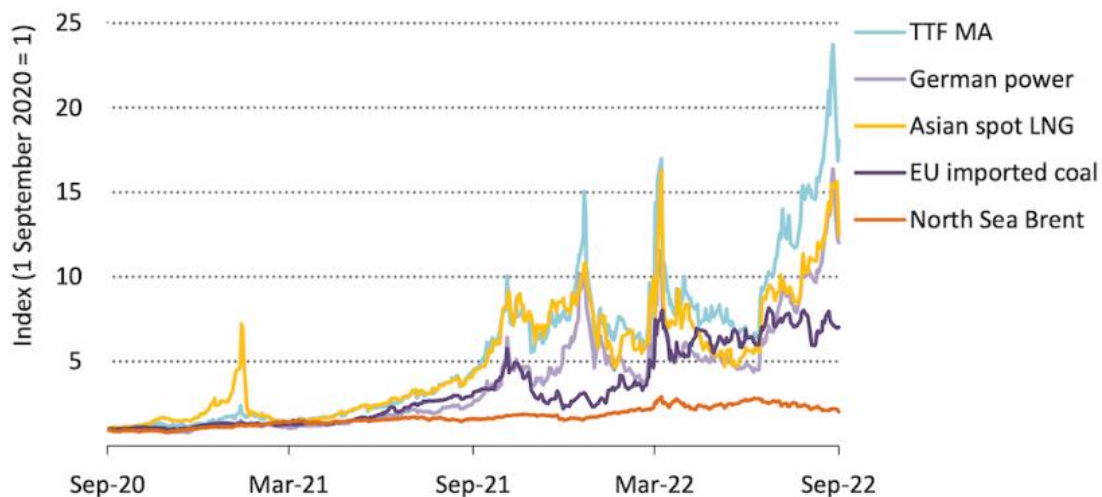
## 1.1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΡΙΣΗ

Κατά τη διάρκεια της πανδημίας του κορονοϊού, υπήρξε μείωση στην ζήτηση της ενέργειας παγκοσμίως λόγω της μειωμένης οικονομικής και επιχειρηματικής δραστηριότητας. Ωστόσο, μετά την έξοδο από την καραντίνα, η ενεργειακή ζήτηση αυξήθηκε απότομα όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1**, σε επίπεδα ακόμα υψηλότερα από ό,τι πριν την έναρξη της πανδημίας, με τον OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) να αργεί να αντιδράσει και να αυξήσει την παραγωγή του πετρελαίου [1].



**Εικόνα 1.** Συνολική κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο από το 1990 μέχρι το 2022 σε Mtoe (Million tonnes of oil equivalent, 1 Mtoe = 11630 TWh) [2].

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα οι τιμές του πετρελαίου και των παράγωγων του να αυξηθούν και να παρασύρουν και τις τιμές των περισσότερων αγαθών, αφού επηρεάστηκαν μεταξύ άλλων το κόστος των μεταφορών και της παραγωγής τους. Η κατάσταση επιδεινώθηκε ακόμα περισσότερο, όπως αποτυπώνεται και στην **Εικόνα 2**, με τον πόλεμο μεταξύ Ρωσίας και Ουκρανίας που ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2022. Η Ρωσία είναι παγκοσμίως ένας από τους μεγαλύτερους εξαγωγείς ορυκτών καυσίμων και ένας ιδιαίτερα σημαντικός προμηθευτής στην Ευρώπη, η οποία στην προσπάθεια της να εξαλείψει την παραγωγή ενέργειας από τις παραδοσιακές μορφές του άνθρακα, όπως ο λιγνίτης, είναι σε μεγάλο βαθμό εξαρτημένη από εισαγωγές ενέργειας, όπως το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, από γεωπολιτικά ασταθείς περιοχές, όπως η Ρωσία και η Μέση Ανατολή [3]. Ενδεικτικά, το 2021 περίπου το ένα τέταρτο όλης της καταναλωμένης ενέργειας της Ε.Ε. προήλθε από τη Ρωσία [4]. Έτσι, η επιβολή των κυρώσεων που ακολούθησε από τις χώρες της Ε.Ε., μεταξύ άλλων και στις εισαγωγές φυσικού αερίου και πετρελαίου από τη Ρωσία, είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ενεργειακού κενού το οποίο έπρεπε να καλυφθεί με εισαγωγές από άλλες χώρες, αλλά με μεγαλύτερο κόστος [5].

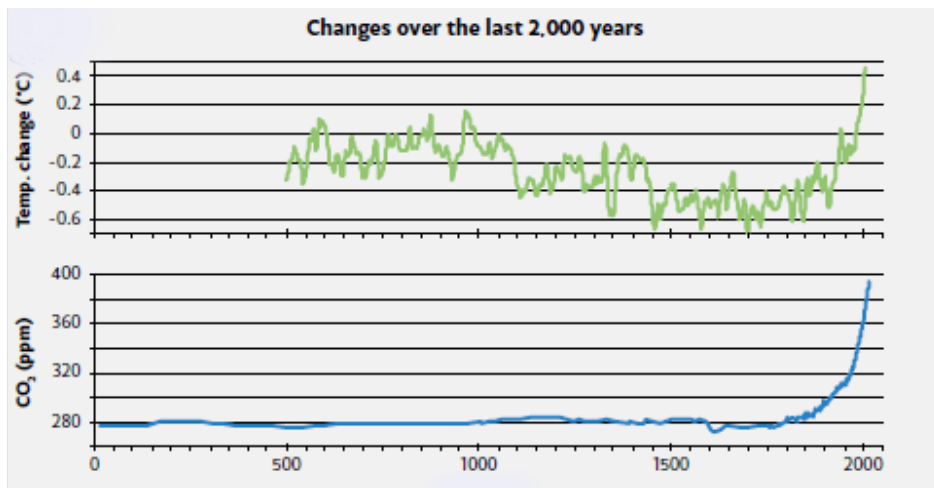


**Εικόνα 2.** Επιλεγμένοι δείκτες τιμών ενέργειας, που εμφανίζονται σε σχέση με τα επίπεδα Σεπτεμβρίου 2020 [6].

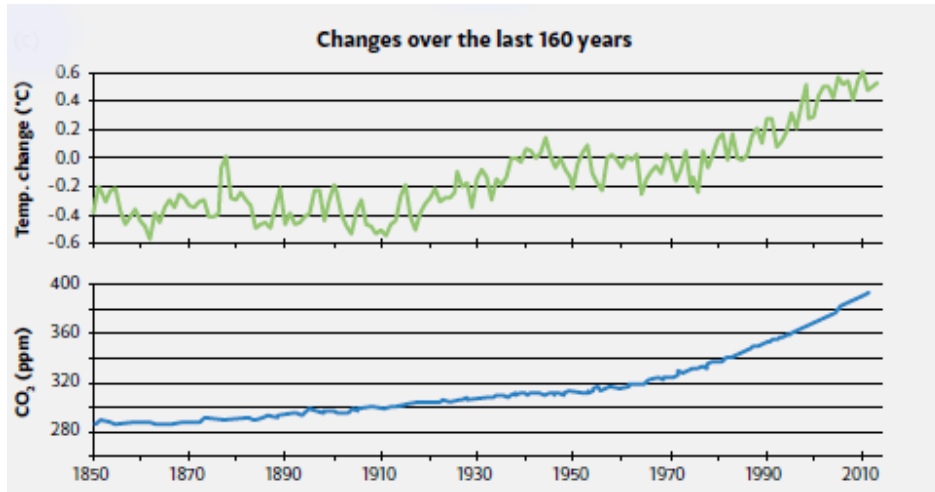
Συμπερασματικά λοιπόν, η αύξηση της ζήτησης, οι γεωπολιτικές εντάσεις, η δυσκολία στην εφοδιαστική αλυσίδα καθώς και άλλοι παράγοντες οδήγησαν στην ενεργειακή κρίση, την οποία η Ευρώπη αλλά και άλλες χώρες κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν. Μία από τις φτηνές και δημοφιλείς λύσεις ήταν και η επιστροφή στην παραγωγή ενέργειας από τις παραδοσιακές μορφές του άνθρακα (όπως ο λιγνίτης), η οποία όμως όπως έχει αποδειχθεί επιδρά αρνητικά στο ζήτημα της κλιματικής αλλαγής.

## 1.2. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

Ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής είναι μία από τις κυριότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κόσμος τις τελευταίες δεκαετίες. Για πολλούς, ο πατέρας της κλιματικής αλλαγής θεωρείται ο Σβάντε Αρρένιους, Σουηδός φυσικός και χημικός, ο οποίος το 1896 σε άρθρο που δημοσίευσε ανέφερε τη σύνδεση μεταξύ των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και την αύξηση της θερμοκρασίας, υποστηρίζοντας πως αν διπλασιαστούν τα τότε επίπεδα του CO<sub>2</sub>, αυτό θα σήμαινε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης κατά 5 με 6 βαθμούς Κελσίου [7]. Περίπου εκατό χρόνια μετά, στα τέλη της δεκαετίας του 1980, ο επιστήμονας της NASA Τζέιμς Χάνσεν κατέθεσε στο Κογκρέσο ότι ήταν 99% σίγουρο πως η τάση της θέρμανσης του πλανήτη δεν ήταν μια φυσική αλλαγή, αλλά αποτέλεσμα της συσσώρευσης του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων τεχνητών αερίων στην ατμόσφαιρα [8]. Η συγκέντρωση των αερίων αυτών (όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο) έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με την εποχή πριν την βιομηχανική επανάσταση. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα έχει αυξηθεί πάνω από 40%, ενώ αντίστοιχα αυτή του μεθανίου περίπου 150% [9]. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, σύμφωνα και με την **Εικόνα 3** και την **Εικόνα 4**, και την αύξηση της θερμοκρασίας με μεγαλύτερους ρυθμούς από το παρελθόν και σε υψηλότερα από τα αναμενόμενα επίπεδα, έχοντας ως συνέπειες, μεταξύ άλλων, την αύξηση της στάθμης της θάλασσας με το λιώσιμο των παγετώνων και ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως πλημμύρες και εκτεταμένες ξηρασίες [9, 10].



**Εικόνα 3.** Αλλαγή μέσης θερμοκρασίας της Γης και επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα τα τελευταία 2000 χρόνια [11].



**Εικόνα 4.** Αλλαγή μέσης θερμοκρασίας της Γης και επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα τα τελευταία 160 χρόνια [11].

Για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, τόσο σε διεθνές όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο έχουν τεθεί κάποιοι στόχοι και έχουν αναπτυχθεί διάφορα σχέδια για την υλοποίηση αυτών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, με ψήφισμά της το 2009, το οποίο έμεινε γνωστό ως “CARE package” (Climate Action and Renewable Energy Package), έθεσε μέχρι το 2020 τους ακόλουθους στόχους [12]:

- 20% της ενέργειας να παράγεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκ των οποίων το 10% να καταναλώνεται στις μεταφορές
- 20% μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990
- 20% αύξηση στην ενεργειακή απόδοση

Οι στόχοι αυτοί, είναι σύμφωνοι και με τους στόχους #7 («Φθνή και καθαρή ενέργεια») και #13 («Δράση για το κλίμα») από τους 17 στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης του εγγράφου του ΟΗΕ «Να αλλάξουμε τον κόσμο μας: η Ατζέντα του 2030 για τη βιώσιμη ανάπτυξη». Υιοθετήθηκε τον Σεπτέμβριο του 2015 από τους ηγέτες των κρατών κατά την 70<sup>η</sup> Γενική Συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών, για να ενδυναμώσει την περιβαλλοντική προστασία και να οδηγήσει σε αυξανόμενα και διατηρήσιμα επίπεδα ευημερίας [13].

Ωστόσο, οι στόχοι αυτοί επανεκτιμήθηκαν το 2018, με το αναθεωρημένο ψήφισμα να κάνει λόγο για στόχο 32% της ενέργειας να προέρχεται από ΑΠΕ το 2030, το οποίο τελικά το 2023 έγινε 42.5% προκειμένου η Ευρώπη να ανεξαρτητοποιηθεί πιο άμεσα από τα ρωσικά (και μη) ορυκτά καύσιμα, ενώ παράλληλα έχει θεσπιστεί και ο στόχος των μηδενικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050 [14 - 16]. Προάγεται επομένως η λύση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, τόσο για το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής όσο και για αυτό της ενεργειακής κρίσης, ως μια σχετικά φτηνή και περιβαλλοντικά φιλική επιλογή.

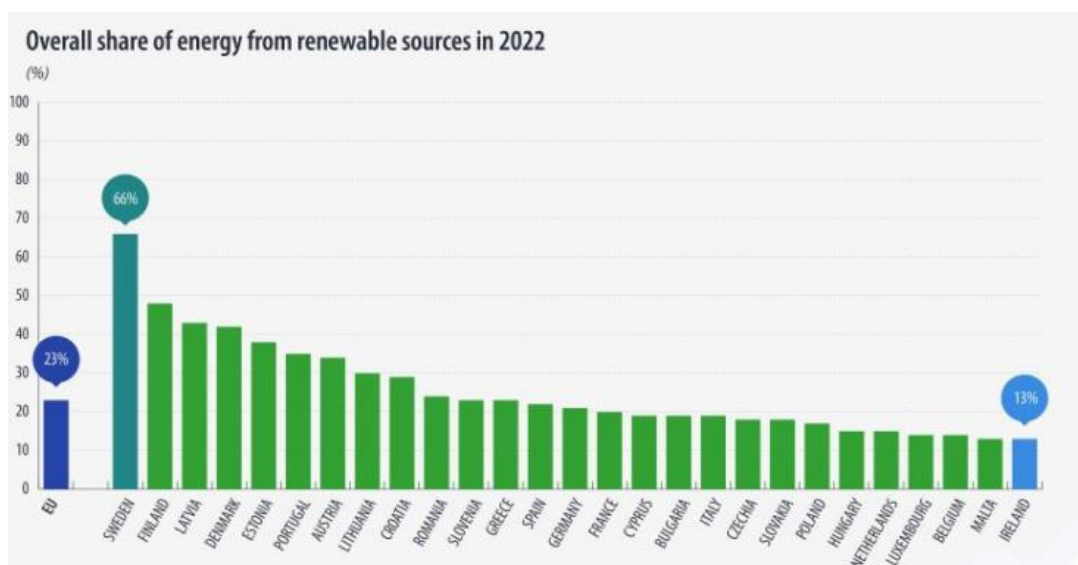
## 2. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σύμφωνα, με την οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές θεωρείται αυτή που προέρχεται από μη ορυκτές πηγές, δηλαδή αιολική, ηλιακή, γεωθερμική, ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα και άλλες [17].

Από την αρχαιότητα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ήταν η μόνη διαθέσιμη πηγή για την παραγωγή ενέργειας. Στη συνέχεια ωστόσο, μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση των ορυκτών καυσίμων (αρχικά των παραδοσιακών μορφών άνθρακα όπως ο λιγνίτης, αργότερα του πετρελαίου και τελευταία του φυσικού αερίου), έχασαν έδαφος για λόγους κυρίως τεχνολογικούς και απόδοσης. Παρόλα αυτά, από τα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν έρθει και πάλι στο προσκήνιο, αφενός λόγω της επικείμενης εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων και αφετέρου λόγω των πολύ σοβαρών αρνητικών επιπτώσεών τους στο περιβάλλον [18].

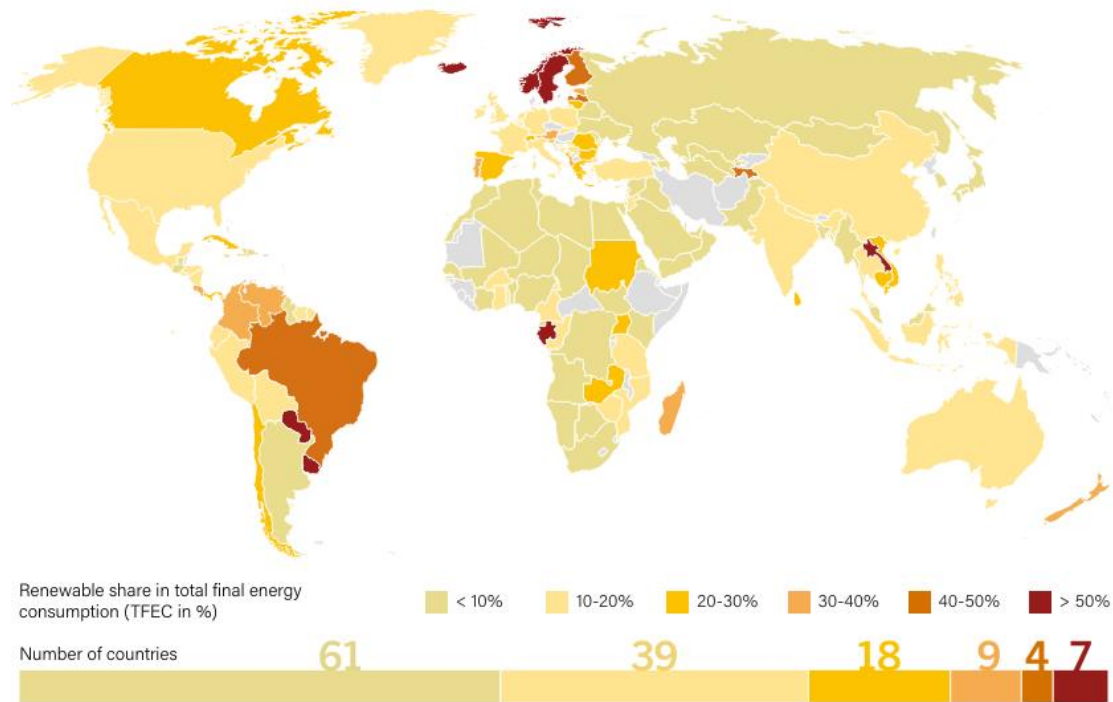
Η αρχή έγινε τη δεκαετία του 1970, όταν το αραβικό εμπάργκο πετρελαίου οδήγησε πολλές χώρες του δυτικού κόσμου να στραφούν σε νέες τεχνολογίες στην προσπάθειά τους να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες των πολιτών και των επιχειρήσεών τους [19]. Έκτοτε, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος και με τη βοήθεια της τεχνολογίας αποτελούν πλέον ένα συνεχώς αυξανόμενο ποσοστό των πηγών ενέργειας παγκοσμίως.

Σύμφωνα με τη Eurostat (Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία), όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 5**, στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το 2022, το 23% της συνολικής ενέργειας που καταναλώθηκε, προήλθε από ΑΠΕ, ενώ αντίστοιχα το ποσοστό αυτό ήταν περίπου 22% το 2021 [20].



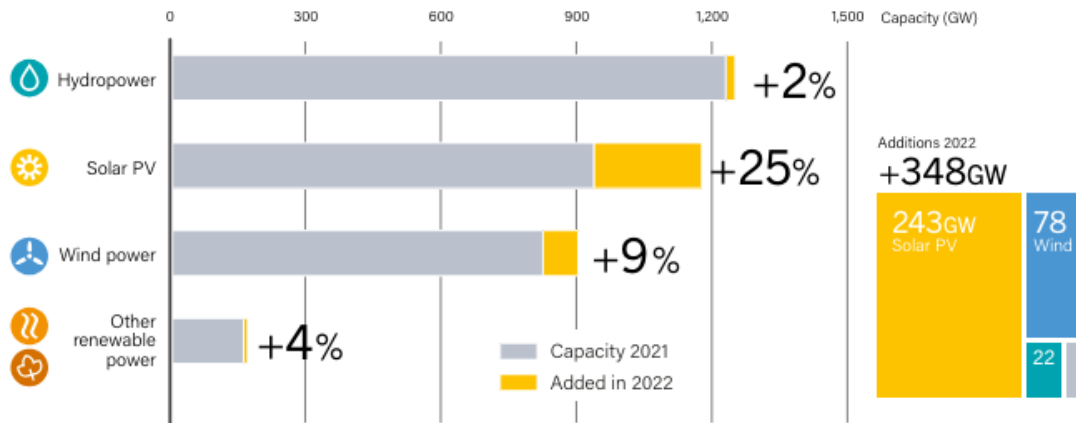
**Εικόνα 5.** Ποσοστό της συνολικής καταναλωμένης ενέργειας στις χώρες της Ε.Ε. που προήλθε από ΑΠΕ το 2022 [20].

Σε παγκόσμιο επίπεδο, σύμφωνα και με την **Εικόνα 6**, το ποσοστό της συνολικής ενέργειας που καταναλώθηκε και προέρχεται από ΑΠΕ κυμαίνεται στο 13% (χωρίς να περιλαμβάνονται η απευθείας καύση ξύλου και τα αγροτικά και κτηνοτροφικά παραπροϊόντα που καίγονται για μαγειρική ή θέρμανση χώρου), ποσοστό σχεδόν ίδιο με το 2021 [21].



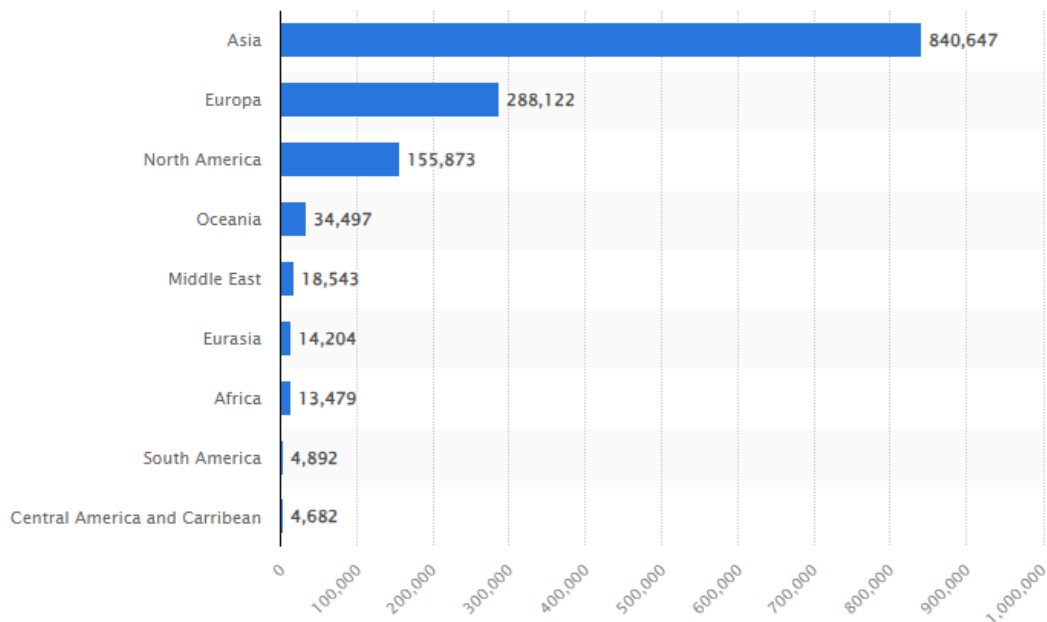
**Εικόνα 6.** Ποσοστό συνολικής καταναλωμένης ενέργειας που προήλθε από ΑΠΕ το 2022 [21].

Η πολύ μικρή διαφορά του ποσοστού του 2022 σε σχέση με το 2021, οφείλεται στην αύξηση της ζήτησης, η οποία αντιστάθμισε την προσθήκη νέων ΑΠΕ, συνολικής ισχύος 348 GW όπως αποτυπώνεται και στην **Εικόνα 7**, ενώ το 2023 η αντίστοιχη συνολική ισχύς των ΑΠΕ που προστέθηκε ήταν 473 GW [21].



**Εικόνα 7.** Ποσοστό που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία ΑΠΕ το 2022 [21].

Όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα, η τεχνολογία η οποία έχει το μεγαλύτερο ποσοστό νέων προσθηκών είναι αυτή των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο τέλος του 2023 ξεπέρασε το 1.3 TW, με το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτά να βρίσκονται στην Ασία και ειδικά την Κίνα, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα στην **Εικόνα 8** [22].

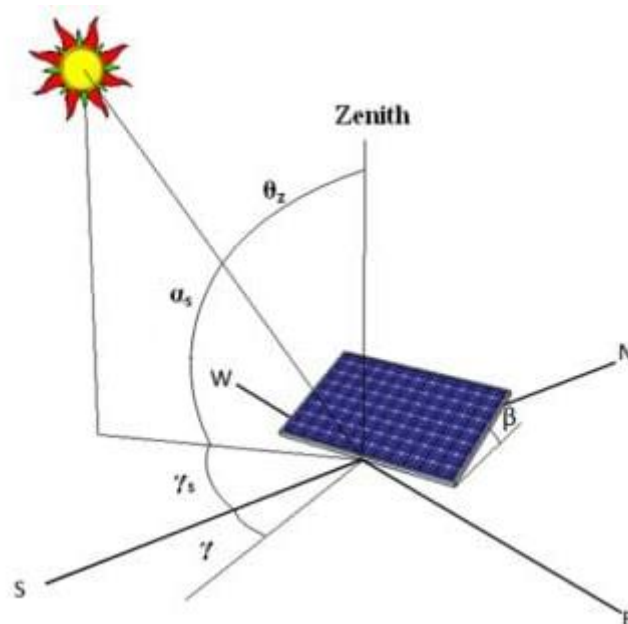


**Εικόνα 8.** Ισχύς των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά περιοχή της Γης το 2023 [22].

## 2.1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Ως ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται η ενέργεια που φτάνει από τον Ήλιο στη Γη με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ύστερα από σημαντική αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα [23]. Η ηλιακή ενέργεια είναι απαραίτητη για τη ζωή στη Γη και το ότι είναι δωρεάν, απεριόριστη και δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον την καθιστά ιδανική για να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση, φωτισμό αλλά και άλλες ηλεκτρικές ανάγκες.

Για τη μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας με στόχο τη βέλτιστη ενεργειακή αξιοποίησή της έχουν οριστεί τα γεωμετρικά μεγέθη που φαίνονται στην ακόλουθη **Εικόνα 9**:



**Εικόνα 9.** Ηλιακές γωνίες χρήσιμες κατά τους υπολογισμούς για την ενεργειακή απόδοση ΦΒ πλαισίων [24].

Τα μεγέθη αυτά είναι [24]:

- **Γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ):** η γωνία ανάμεσα στην κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου. Στην ανατολή και δύση του ηλίου αυτή είναι 90 μοίρες.
- **Ηλιακό ύψος ( $\alpha_s$ ):** η γωνία ανάμεσα στην οριζόντιο και την ευθεία όρασης του ήλιου. Είναι η συμπληρωματική γωνία της γωνίας ζενίθ.
- **Ηλιακό αζιμούθιο ( $\gamma_s$ ):** η γωνία ανάμεσα στον νότο και την προβολή της ευθείας όρασης στο οριζόντιο επίπεδο. Είναι 0 μοίρες κατά το ηλιακό μεσημέρι και οι γωνίες προς την ανατολή είναι αρνητικές ενώ προς τη δύση θετικές.



- **Αζιμούθιο επιφάνειας ( $\gamma$ ):** η γωνία ανάμεσα στον νότο και την προβολή της καθέτου κάποιας επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο. Και εδώ γωνίες προς την ανατολή είναι αρνητικές ενώ προς τη δύση θεωρούνται θετικές.
- **Κλίση επιφάνειας ( $\beta$ ):** η γωνία ανάμεσα σε μια επιφάνεια και το οριζόντιο επίπεδο.
- **Ηλιακή απόκλιση ( $\delta$ ):** η γωνιακή θέση του ήλιου το ηλιακό μεσημέρι σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού. Είναι ανάμεσα σε  $-23.45^\circ$  και  $23.45^\circ$  ανάλογα με τη μέρα του έτους.

Επίσης, η ολική ακτινοβολία που προσπίπτει στη Γη έχει ένα μέρος το οποίο φτάνει στην επιφάνεια της Γης άμεσα (άμεση ακτινοβολία) και ένα μέρος το οποίο διαχέεται πρώτα από την ατμόσφαιρα (διάχυτη ακτινοβολία), ενώ τέλος, υπάρχει και ένα μέρος της άμεσης ακτινοβολίας το οποίο ανακλάται από το έδαφος και στη συνέχεια μπορεί να πέσει πάνω σε μια άλλη επιφάνεια (ανακλώμενη ακτινοβολία).

Για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας υπάρχουν δύο κατηγορίες τεχνολογίας, αυτή των **θερμικών ηλιακών συστημάτων** και αυτή των **φωτοβολταϊκών συστημάτων**.

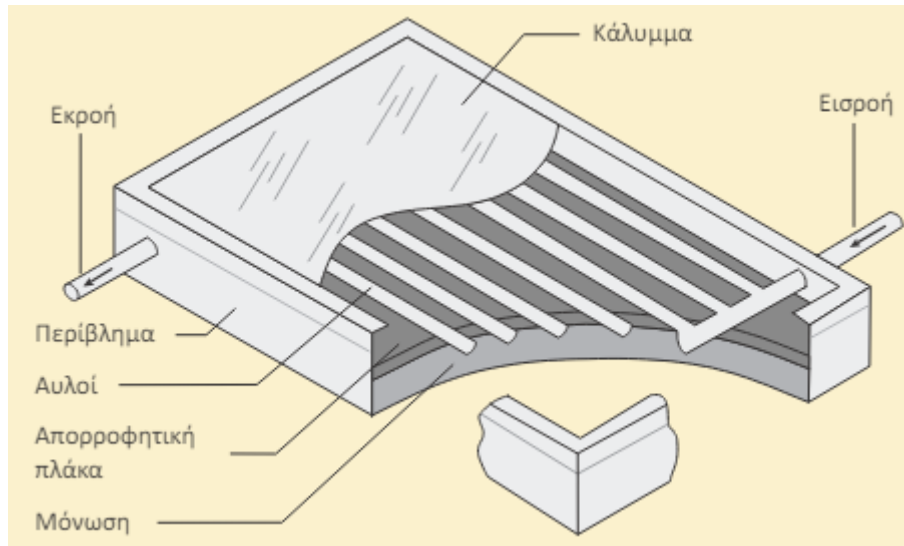
### 2.1.1. ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα μετατρέπουν την ακτινοβολούμενη ενέργεια από τον ήλιο σε θερμότητα, η οποία ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα σε εφαρμογές όπως θέρμανση χώρου, νερού ή στη βιομηχανία είτε έμμεσα για οποιοδήποτε άλλη εφαρμογή, αφού μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια [25]. Η γενική αρχή λειτουργίας τους είναι η θέρμανση με τη βοήθεια ηλιακού συλλέκτη νερού ή κάποιου άλλου μέσου, το οποίο στη συνέχεια ανάλογα με τη χρήση θα αξιοποιηθεί σε άλλο σημείο. Οι ηλιακού συλλέκτες μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, από τους  $-50^\circ\text{C}$  έως ακόμα και πάνω από  $1200^\circ\text{C}$ , ενώ διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες με βάση την τεχνολογία τους, τους επίπεδους συλλέκτες, τους συλλέκτες κενού και τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες [26].

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος ηλιακού συλλέκτη και χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές θέρμανσης ζεστού νερού χρήσης είτε οικιακής είτε σε κάποιο άλλο κτίριο (όπως για παράδειγμα νοσοκομείο) σε θερμοκρασίες που δεν ξεπερνούν τους  $100^\circ\text{C}$  [27]. Τοποθετείται με προσανατολισμό προς τον ισημερινό και με κλίση τέτοια έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοσή του κατά την περίοδο που ενδιαφέρει τον χρήστη (συνήθως χειμώνα). Τα κύρια μέρη ενός επίπεδου συλλέκτη όπως φαίνονται και στην **Εικόνα 10** είναι [27]:

- Η απορροφητική επιφάνεια ή απορροφητήρας, η οποία μπορεί να είναι από χαλκό, αλουμίνιο ή χάλυβα και έχει την ιδιότητα να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία (υψηλή απορροφητικότητα). Στην πίσω πλευρά του

- απορροφητήρα βρίσκεται και το δίκτυο μεταφοράς του θερμαινόμενου ρευστού .
- Ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα τα οποία μπορεί να είναι από γυαλί ή διαφανές πλαστικό και έχουν ως στόχο την μείωση των θερμικών απωλειών.
- Θερμομόνωση στο πίσω μέρος και τα πλάγια για μείωση των θερμικών απωλειών.
- Το περίβλημα του συλλέκτη.



**Εικόνα 10.** Κύρια μέρη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [28]

Αντίστοιχα, οι συλλέκτες κενού αποτελούνται από μια σειρά παράλληλων γυάλινων διάφανων σωλήνων, στο εσωτερικό των οποίων υπάρχει μικρή επίπεδη ή καμπύλη απορροφητική επιφάνεια συγκολλημένη με το δίκτυο μεταφοράς του ρευστού. Ωστόσο στο εσωτερικό αυτών των σωλήνων δημιουργείται κενό αέρος, το οποίο επιτρέπει την μείωση των θερμικών απωλειών σε πολύ μεγάλο βαθμό. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά το μεγαλύτερο μέρος της μέρας (ακόμα και νωρίς το πρωί ή αργά το απόγευμα) λόγω της κυλινδρικής επιφάνειας των γυάλινων σωλήνων. Έτσι, οι συλλέκτες κενού παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες, έχουν ωστόσο και μεγαλύτερο κόστος και παρουσιάζουν δυσκολίες κατά την κατασκευή τους, κυρίως για την επίτευξη των συνθηκών του κενού [29].

Όσον αφορά τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, αυτοί χρησιμοποιούνται όταν είναι επιθυμητή η επίτευξη μέσων και πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Οι θερμοκρασίες αυτές επιτυγχάνονται με τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο σημείο όπου είναι τοποθετημένη μια μικρή επιφάνεια απορρόφησης, με τη χρήση ανακλαστικών ή διαθλαστικών επιφανειών [27].

Ένα παράδειγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι αυτό των πάρκων CSP (συγκεντρωτικά ηλιακά πάρκα), όπως εκείνο που φαίνεται στην **Εικόνα 11**. Σε αυτά, χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός ηλιοστατών για να γίνει συγκέντρωση της ακτινοβολίας σε έναν κεντρικό δέκτη, θερμαίνοντας είτε κάποιο ρευστό (θερμικό έλαιο) είτε κάποιο ειδικό άλας, το οποίο στη συνέχεια αποδίδει τη θερμότητά του στο εργαζόμενο μέσο ενός θερμοδυναμικού κύκλου που με τη χρήση στροβίλων θα οδηγήσει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



**Εικόνα 11.** Συγκεντρωτικό ηλιακό πάρκο

### 2.1.2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια ηλιακή τεχνολογία η οποία ανακαλύφθηκε το 1839 από τον 19χρονο Γάλλο φυσικό Εντμόν Μπεκερέλ, ο οποίος μέσα από πειράματα έδειξε πως μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από το ηλιακό φως [30]. Σήμερα η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται συνεχώς και συγκεντρώνει μεταξύ άλλων τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

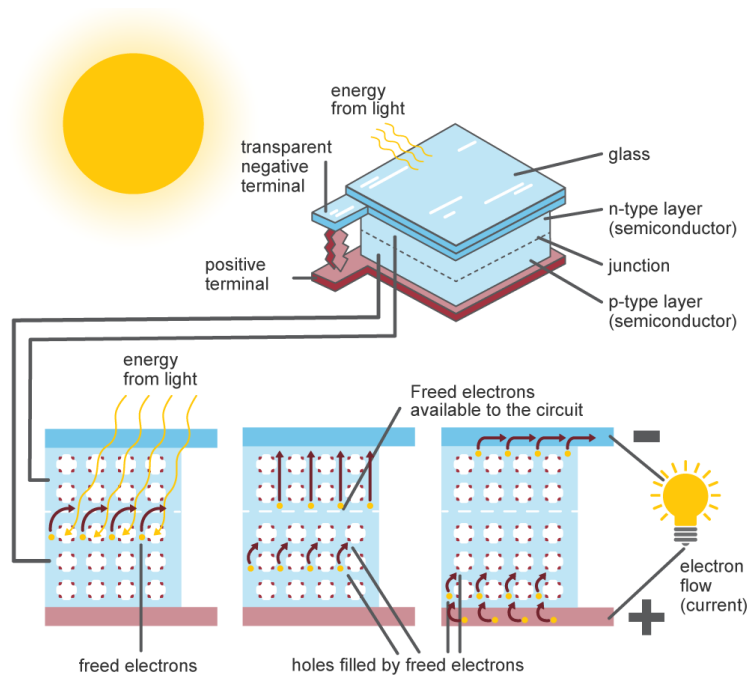
- Είναι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς κατά τη χρήση της δεν το μολύνει, ενώ η μόλυνση που προκύπτει κατά την κατασκευή των φωτοβολταϊκών είναι σχετικά μικρή και ελέγξιμη.
- Η απόδοση τους αυξάνεται ολοένα και περισσότερο με την πάροδο των χρόνων, ενώ ταυτόχρονα το κόστος τους μειώνεται, καθιστώντας τα μια εξαιρετικά ανταγωνιστική οικονομικά επιλογή.
- Η λειτουργία τους απαιτεί ελάχιστες εργασίες συντήρησης και η εγκατάσταση τους είναι σχετικά εύκολη και απλή.

## 2.2. ΜΕΡΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τα κύρια μέρη των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι αντιστροφείς τάσεις (inverter), οι βάσεις στήριξης, οι μπαταρίες και κάποια περιφερειακά συστήματα [31].

### 2.2.1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ) αποτελούνται από σειρές ηλιακών κελιών συνδεδεμένων μεταξύ τους. Τα κελιά αυτά αποτελούν το βασικό στοιχείο στη διαδικασία μετατροπής ενέργειας και είναι κατασκευασμένα από υλικό κάποιου ημιαγωγού, του οποίου τα ηλεκτρόνια διεγείρονται και μετατρέπονται σε ηλεκτρικό ρεύμα όταν εκτίθενται στο ηλιακό φως, όπως φαίνεται και στην απεικόνιση στην **Εικόνα 12** [32].



**Εικόνα 12.** Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια με τη χρήση ΦΒ κελιών [26].

Τα φωτοβολταϊκά κελιά κατασκευάζονται κυρίως με βάση δύο τεχνολογίες, από κρυσταλλικό πυρίτιο και από λεπτή μεμβράνη, ενώ χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [33]:

- i) **Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς**, τα οποία είναι ο παραδοσιακός τύπος των φωτοβολταϊκών, κατασκευασμένα από μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά

στοιχεία πυριτίου. Τα μονοκρυσταλλικά έχουν την υψηλότερη καθαρότητα σε περιεκτικότητα πυριτίου και εμφανίζουν ένα σκούρο χρώμα. Έχουν υψηλότερη απόδοση (15% – 20%) [33] από τα πολυκρυσταλλικά (13% - 18%) [33], μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και τείνουν να επηρεάζονται λιγότερο από τις υψηλές θερμοκρασίες, αλλά έχουν μεγαλύτερο κόστος. Γενικά, τα φωτοβολταϊκά της πρώτης γενιάς αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής παραγωγής φωτοβολταϊκών και χρησιμοποιούνται κυρίως όταν το ηλιακό σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο.

- ii) **Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς**, τα οποία κατασκευάζονται από πολύ λεπτές μεμβράνες από το υλικό του ημιαγωγού (συνήθως πυρίτιο), με το πάχος τους να μην ξεπερνά το 1 μm, σε αντίθεση με τα 200 μm της πρώτης γενιάς [34]. Έχουν φτηνότερο κόστος παραγωγής από αυτά της πρώτης γενιάς και επηρεάζονται λιγότερο από τις υψηλές θερμοκρασίες, ωστόσο έχουν χαμηλότερους βαθμούς απόδοσης (7% - 18%) [34]. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα φωτοβολταϊκά από άμορφο πυρίτιο, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρές εφαρμογές και στην αρχιτεκτονική [12].
- iii) **Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς**, τα οποία είναι σε πειραματικό στάδιο και προσπαθούν να βελτιώσουν την απόδοση αυτών της δεύτερης γενιάς, κρατώντας παράλληλα χαμηλό το κόστος παραγωγής.

### 2.2.2. ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΙΣ ΤΑΣΗΣ

Οι αναστροφείς τάσης (inverters) έχουν ως κύριο στόχο την μετατροπή του DC ρεύματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε AC ρεύμα και την προσαρμογή αυτού στη συχνότητα και το επίπεδο τάσης του ηλεκτρικού συστήματος. Στα συστήματα φωτοβολταϊκών που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, οι inverters μπορούν είτε να συνδέονται απευθείας στο δίκτυο και άρα όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται να διοχετεύεται σε αυτό, είτε να συνδέονται με το δίκτυο του κτιρίου και άρα η ηλεκτρική ενέργεια να καλύπτει πρώτα τις ανάγκες του κτιρίου και στη συνέχεια η περίσσεια της, αν υπάρχει, να δίνεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι inverters που συνδέονται στο δίκτυο χωρίζονται στους κεντρικούς, οι οποίοι είναι για όλο το φωτοβολταϊκό σύστημα, στους string inverters που είναι ο καθένας για κάθε string (σειρά πλαισίων συνδεδεμένη σε σειρά) και τέλος στους module inverters που είναι ξεχωριστοί για κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο [12].

Οι string inverters χρησιμοποιούνται συνήθως στα συστήματα με παραγόμενη ενέργεια μέχρι 3 KW [13]. Οι module inverters βρίσκονται τοποθετημένοι στο πίσω μέρος ή πολύ κοντά στο αντίστοιχο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι η απόδοση του κάθε πλαισίου είναι ανεξάρτητη από αυτή των υπολοίπων. Ωστόσο το κόστος τους είναι μεγαλύτερο από αυτό των υπόλοιπων κατηγοριών [30].

### 3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Καθώς η ζήτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αυξάνεται συνεχώς, η τεχνολογία τους δε σταματά να αναπτύσσεται με στόχο την επίτευξη ολοένα και καλύτερων αποδόσεων. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο που βοηθά σε αυτή την κατεύθυνση είναι τα λογισμικά προσομοίωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία εκτός από τη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών συμβάλλουν πλέον και στην ανάλυση και δημιουργία αναφορών σχετικά με την απόδοσή τους.

Υπάρχουν αρκετά λογισμικά αυτή την στιγμή στην αγορά, το κάθε ένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά που ανάλογα με το ζητούμενο το καθιστά περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλο [35]. Τα λογισμικά χρησιμοποιούν μεταξύ άλλων τον σχεδιασμό του ΦΒ συστήματος, την γεωγραφική τοποθεσία, τον προσανατολισμό αλλά και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν [36]. Κάποια από αυτά τα λογισμικά είναι το PVSyst, το PVGIS, το TRNSYS και το Skelion.

#### 3.1. PVSYST

Το PVSyst (Photovoltaic Systems) αρχικά δημιουργήθηκε από το Πανεπιστήμιο της Γενεύης αλλά πλέον είναι μια ανεξάρτητη εταιρεία. Εστιάζει κυρίως στην μοντελοποίηση, διαστασιολόγηση, προσομοίωση και ανάλυση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος, παρέχοντας ωστόσο και κάποια δυνατότητα οικονομικής ανάλυσης [37].

Το πρώτο βήμα κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης στο PVSyst είναι ο καθορισμός του έργου, όπου ο χρήστης επιλέγει μεταξύ άλλων την τοποθεσία του έργου, εισάγει τα μετεωρολογικά δεδομένα (είτε από δικό του αρχείο είτε χρησιμοποιώντας υπάρχουσες βάσεις δεδομένων) και φτιάχνει το επιθυμητό προς προσομοίωση έργο [36]. Στη συνέχεια ο χρήστης ορίζει τις απαραίτητες παραμέτρους (όπως για παράδειγμα την κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων) και τέλος εκτελεί την προσομοίωση και λαμβάνει τα αποτελέσματα.

Το PVSyst δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων στο περιβάλλον του ίδιου του λογισμικού και τη δημιουργία αναφορών και διαγραμμάτων ανάλογα με την επιθυμία του κάθε χρήστη, αλλά και τη δυνατότητα αποθήκευσης αυτών και εξαγωγής για επεξεργασία σε κάποιο άλλο πρόγραμμα. Επίσης δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη για επιλογή γλώσσας ανάμεσα σε αγγλικά, γερμανικά, γαλλικά, ισπανικά και ιταλικά.

### 3.2. PVGIS

Το PVGIS είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο για το Περιβάλλον και τη Βιώσιμη Ανάπτυξη με στόχο να παρέχει πληροφορίες για την ηλιακή ακτινοβολία και την απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κάθε τοποθεσία στον κόσμο [38]. Είναι διαθέσιμο στα αγγλικά, τα γαλλικά, τα ιταλικά, τα ισπανικά και τα γερμανικά, ενώ για τη χρήση του δε χρειάζεται κάποια εγγραφή.

Κατά την προσομοίωση λαμβάνει υπόψη του την τοποθεσία του έργου, την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών πλαισίων και συστημάτων και άλλα μεγέθη όπως το αζιμούθιο και την κλίση των πλαισίων. Στα αποτελέσματα της κάθε προσομοίωσης περιλαμβάνονται η ετήσια παραγωγή των φωτοβολταϊκών, σε kWh/KWp/year, όπου το KWp εκφράζει την εγκατεστημένη ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος [39]. Επιπλέον, το λογισμικό παρέχει για την επιλεγμένη τοποθεσία χάρτες ηλιοφάνειας, για τους οποίους χρησιμοποιεί τόσο την ηλιακή ακτινοβολία όσο και το περιβάλλον (ανύψωση εδάφους και σκιάσεις).

### 3.3. TRNSYS

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα, το TRNSYS (Transient System Simulation) αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Ουισκόνσιν από τα μέλη του Εργαστηρίου Ηλιακής Ενέργειας [40].

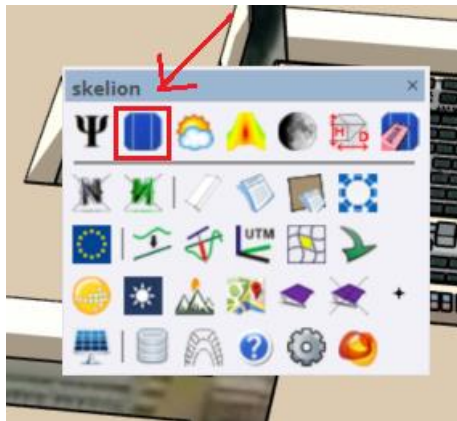
Για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι βασική η αναγνώριση όλων των στοιχείων που το αποτελούν και η μαθηματική περιγραφή τους, προκειμένου να κατασκευαστεί ένα διάγραμμα ροής πληροφοριών για το σύστημα. Έτσι κάθε στοιχείο αποτελείται από μεταβλητές εισόδου, παραμέτρους και μεταβλητές εξόδου. Στη συνέχεια το πρόγραμμα επιλύει τις εξισώσεις και παρέχει αποτελέσματα σε ημερήσια ή μηνιαία βάση [41]. Θεωρείται ιδανικό για λεπτομερείς αναλύσεις οποιουδήποτε συστήματος η συμπεριφορά του οποίου εξαρτάται από το πέρασμα του χρόνου [42].

### 3.4. SKELION

Το λογισμικό προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι το Skelion. Το Skelion δημιουργήθηκε το 2011 από τους Juan Pons ( Ισπανός μηχανικός και προγραμματιστής) και Sam Jankis σε συνεργασία με το Πολυτεχνικό Πανεπιστήμιο της Βαλένθια [43]. Χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο εργαλείο στο περιβάλλον του SketchUp με στόχο την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού των ηλιακών συστημάτων κατά τη χρήση του SketchUp [44]. Οι δημιουργοί του

κατάφεραν έτσι να μειώσουν αισθητά τον χρόνο που απαιτείται για τον σχεδιασμό και την ανάλυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, κάνοντας παράλληλα τη διαδικασία αυτόματη και άρα πιο εύκολη για όλους τους χρήστες [44].

Για να πραγματοποιήσει κάποιος την προσομοίωση, αφού πρώτα σχεδιάσει το κτίριο ή την επιφάνεια στην οποία θέλει να εισάγει τα φωτοβολταϊκά στο περιβάλλον του SketchUp, επιλέγει την επιφάνεια αυτή και στη συνέχεια από τη γραμμή εργαλείων που αντιστοιχεί στο Skelion, επιλέγει το εικονίδιο που φαίνεται στην ακόλουθη **Εικόνα 13**.



**Εικόνα 13.** Εργαλείο εισαγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων σε επιφάνεια

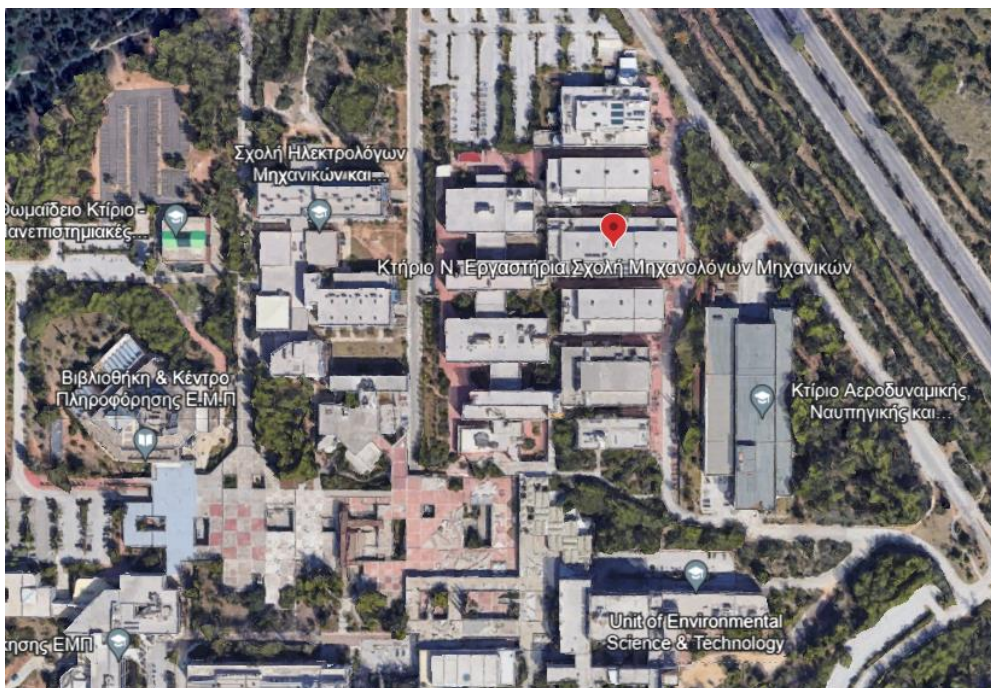
Στη συνέχεια ορίζει κάποιες παραμέτρους, όπως τον τύπο των φωτοβολταϊκών πλαισίων, την κλίση και το αζιμούθιό τους αλλά και επιλογές σχετικά με την τοποθέτησή τους (για παράδειγμα τις μεταξύ τους αποστάσεις), και αφού τελειώσει με αυτές τις επιλογές, το Skelion τοποθετεί αυτόματα όλα τα πλαίσια στην επιφάνεια. Σημειώνεται ότι ο τύπος των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί είτε να επιλεγεί από την ήδη υπάρχουσα βάση δεδομένων είτε να προστεθεί από τον χρήστη, εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα. Ιδιαίτερο είναι επίσης και το ότι τα πλαίσια μπορούν να εισαχθούν και σε μη επίπεδες επιφάνειες, αυξάνοντας έτσι τις δυνατότητες για προσομοίωση σε ακόμα περισσότερες περιπτώσεις.



## 4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

### 4.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το κτίριο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στα παρακάτω σενάρια προσομοίωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι το κτίριο N της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Το κτίριο, το οποίο φαίνεται στην **Εικόνα 14**, ολοκληρώθηκε το 2003, ενώ, μεταξύ άλλων, στεγάζει και το εργαστήριο “Ψύξης, Κλιματισμού και Ηλιακής Ενέργειας”.



**Εικόνα 14.** Κτίριο N, Εργαστήρια Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών [πηγή: Google Earth]

Οι διαστάσεις του κτιρίου αλλά και των επιμέρους χαρακτηριστικών του υπολογίστηκαν με τη χρήση του λογισμικού Google Earth, ενώ ο σχεδιασμός του έγινε στο περιβάλλον του λογισμικού SketchUp.

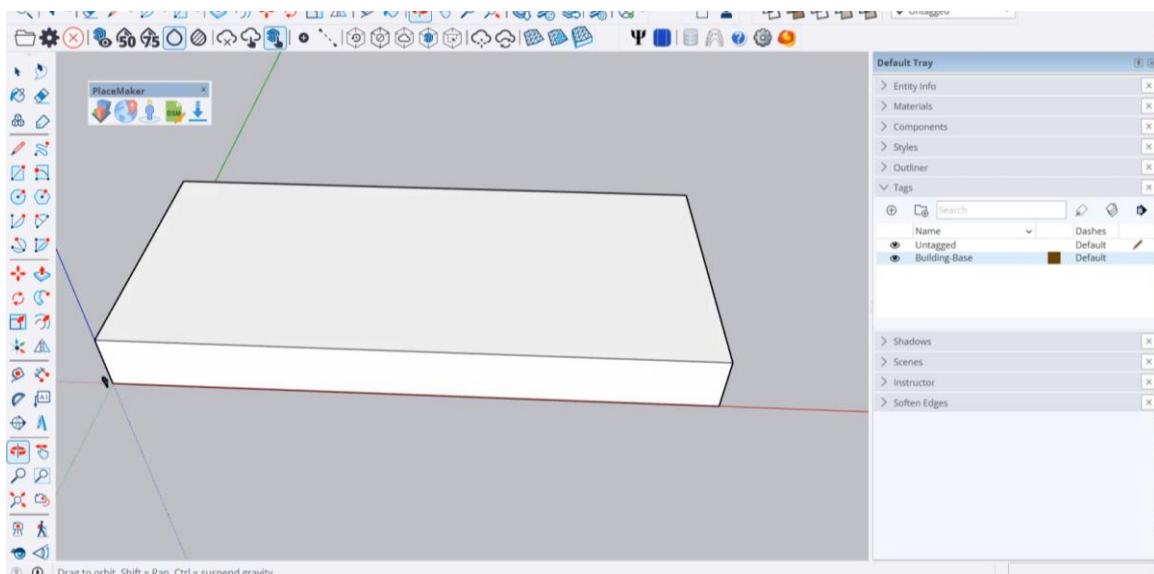
## 4.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ - SKETCHUP

Το SketchUp κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 2000, ως ένα εργαλείο τρισδιάστατης μοντελοποίησης, το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρεία “@Last Software” στο Μπόλντερ του Κολοράντο [45]. Οι καινοτομίες που εισήγαγε στον χώρο του σχεδιασμού και το ότι μείωνε κατά πολύ τον απαιτούμενο χρόνο μοντελοποίησης σχεδίων, το έκαναν γρήγορα πολύ δημοφιλές και άνοιξαν τον δρόμο για νέες επενδύσεις και συνεργασίες. Αργότερα, το 2006, η εταιρεία εξαγοράστηκε από τη Google, ενώ το 2012, πουλήθηκε στην εταιρεία Trimble, στην οποία ανήκει μέχρι και σήμερα [46].

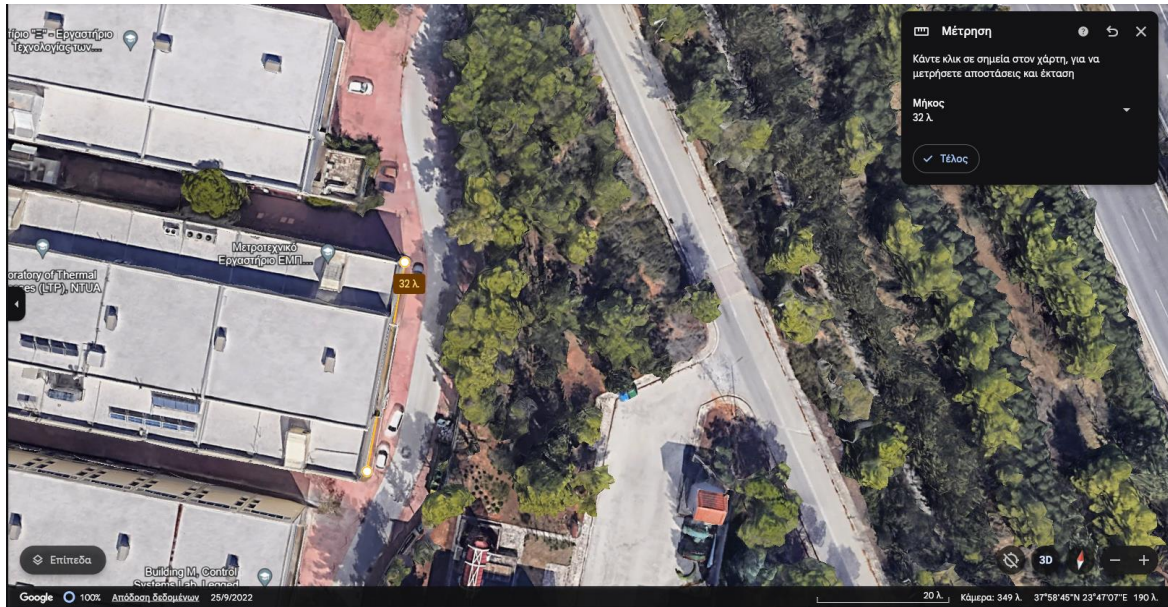
Σήμερα το SketchUp παραμένει ένα λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης, που δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να σχεδιάζουν τρισδιάστατα μοντέλα οποιασδήποτε κλίμακας [47]. Χρησιμοποιείται κυρίως στον κλάδο της αρχιτεκτονικής, αλλά σε συνδυασμό με τα πολλά πρόσθετα εργαλεία που υπάρχουν, δίνει στους χρήστες μια πληθώρα δυνατοτήτων. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε τόσο για τον σχεδιασμό του κτιρίου, όσο και κατά τη χρήση του πρόσθετου εργαλείου Skelion, το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω. Ο σχεδιασμός του κτιρίου N, έγινε σε βήματα τα οποία παρουσιάζονται ακολούθως.

### 4.2.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΥΡΙΑΣ ΔΟΜΗΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

Αρχικά έγινε ο σχεδιασμός της βάσης του κτιρίου, ο οποίος αποτυπώνεται στην **Εικόνα 15**, με διαστάσεις 72m x 32m x 7m (όπως αυτές μετρήθηκαν με τη βοήθεια του Google Earth, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 16**).

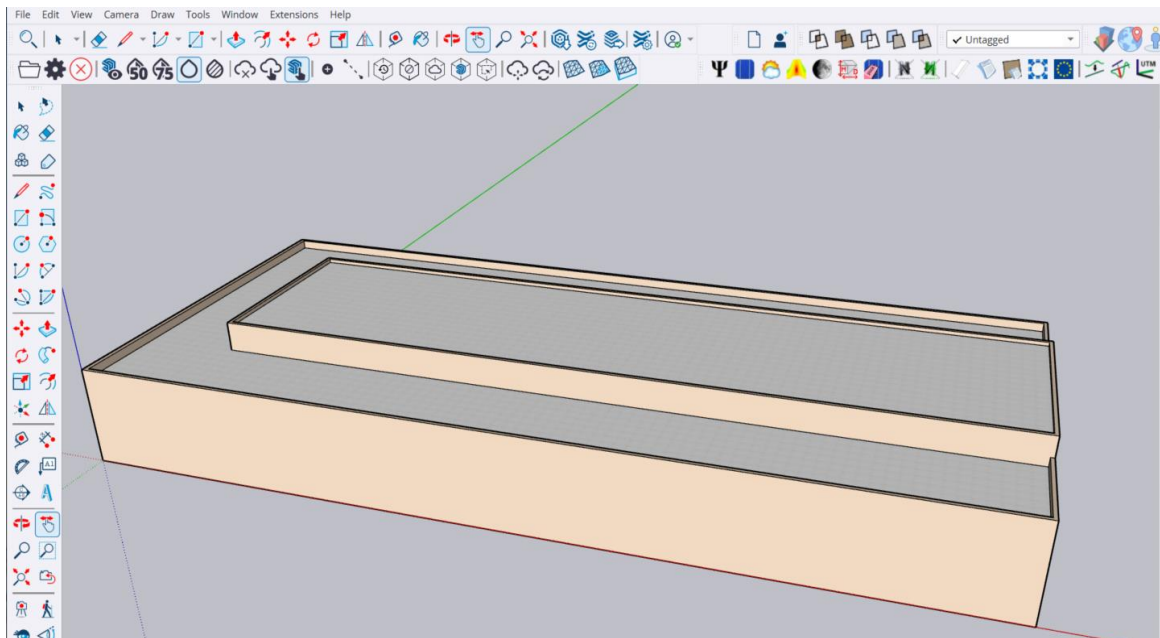


**Εικόνα 15.** Σχεδιασμός βάσης κτιρίου N



**Εικόνα 16.** Μέτρηση διαστάσεων κτιρίου N με τη χρήση του Google Earth

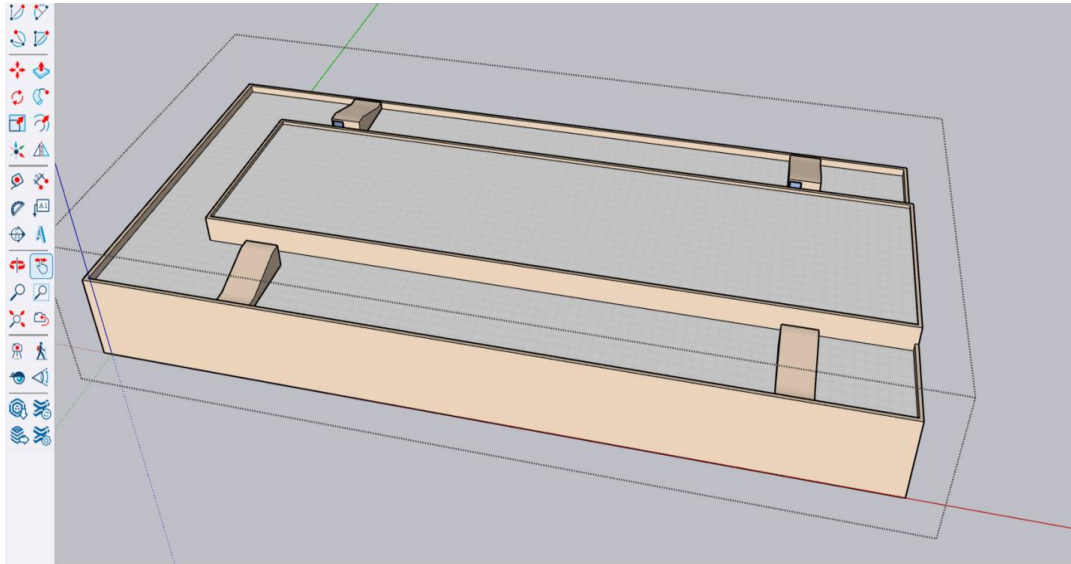
Στη συνέχεια, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 17**, σχεδιάστηκε το υπερυψωμένο κομμάτι στο κέντρο του κτιρίου αλλά και το τοίχιο περιμετρικά της οροφής, με διαστάσεις 63m x 16m x 2m και 0.3m x 0.7m αντίστοιχα. Επίσης, έγινε επιλογή του χρώματος των εξωτερικών τοίχων και του υλικού αυτών και της οροφής.



**Εικόνα 17.** Ολοκλήρωση σχεδιασμού κύριας δομής του κτιρίου

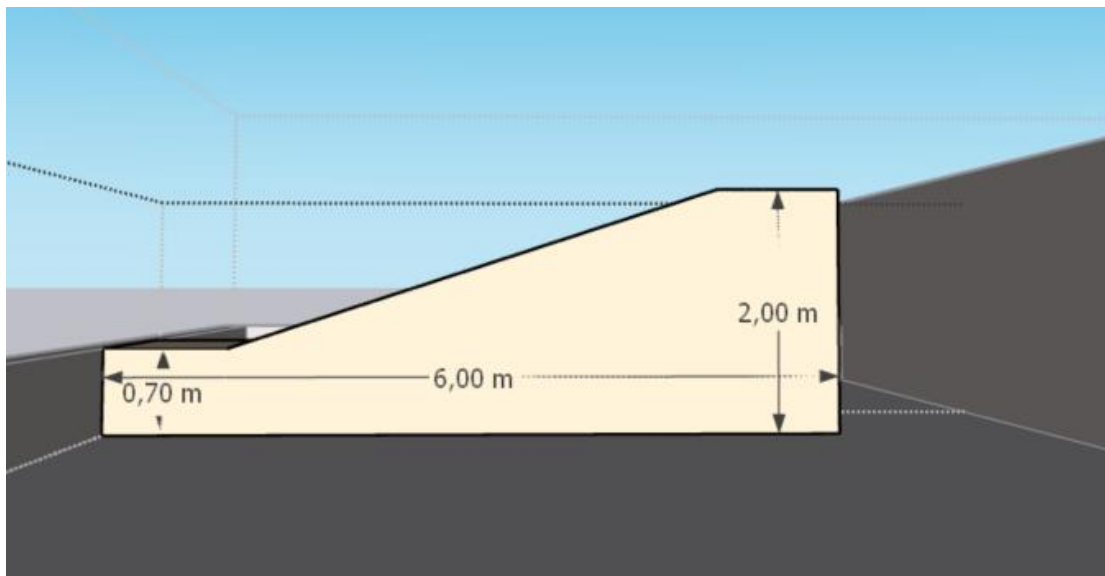
## 4.2.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΛΙΜΑΚΟΣΤΑΣΙΩΝ

Ακολούθως, έγινε ο σχεδιασμός των κλιμακοστάσιων που οδηγούν στην ταράτσα, όπως αποτυπώνεται και στην **Εικόνα 18**.



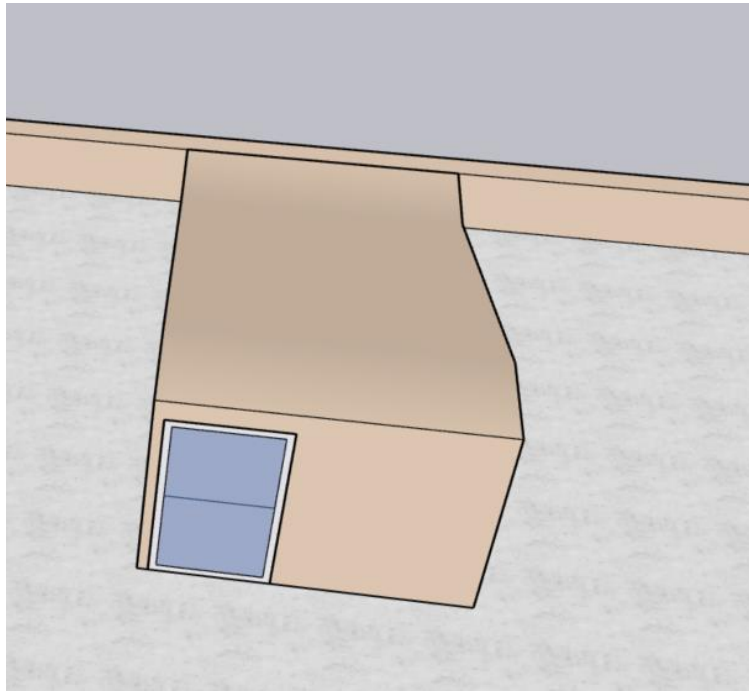
**Εικόνα 18.** Σχεδιασμός κλιμακοστάσιων

Το μήκος τους υπολογίστηκε στα 2.5m ενώ οι υπόλοιπες διαστάσεις τους φαίνονται στην **Εικόνα 19**.



**Εικόνα 19.** Διαστάσεις κλιμακοστάσιων

Τέλος, σχεδιάστηκαν για λόγους πληρότητας και οι αντίστοιχες πόρτες που οδηγούν σε αυτά, σύμφωνα με την **Εικόνα 20**, με διαστάσεις 1.9m x 1.1m.

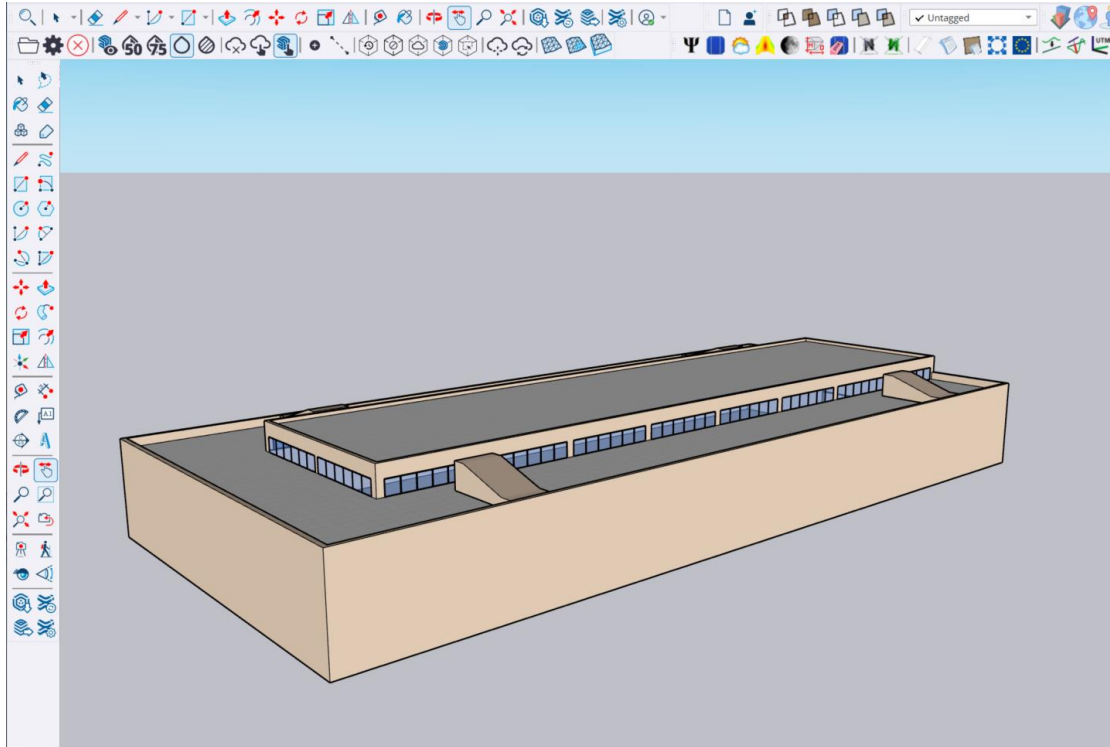


**Εικόνα 20.** Σχεδιασμός πορτών κλιμακοστάσιων

#### 4.2.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΑΡΑΘΥΡΩΝ

Ο σχεδιασμός των παραθύρων του κτιρίου έγινε σε δύο στάδια. Αρχικά έγινε αυτός των παραθύρων στο ύψος της οροφής του κτιρίου και στη συνέχεια ακολούθησαν αυτά του πρώτου ορόφου.

Για τα παράθυρα στο ύψος της οροφής του κτιρίου, η διαστασιολόγησή τους αλλά και ο καθορισμός των χαρακτηριστικών τους έγιναν με τη βοήθεια του Google Earth αλλά και από παρατήρησή τους στον χώρο του κτιρίου. Έτσι τα παράθυρα σχεδιάστηκαν όπως φαίνεται στην **Εικόνα 21**, με διαστάσεις 1m x 1m.

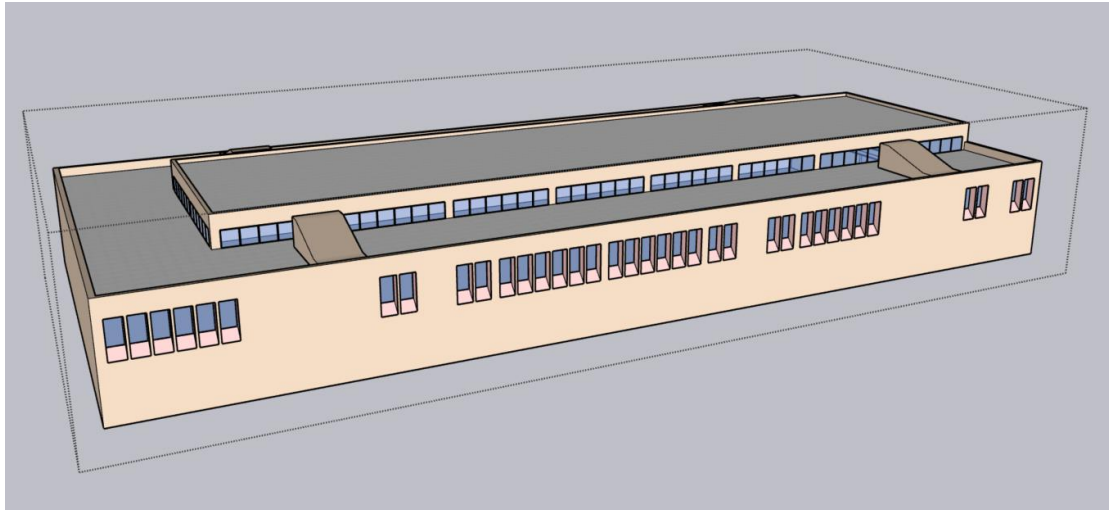


**Εικόνα 21.** Σχεδιασμός παραθύρων στο ύψος της κορυφής

Όσον αφορά τα παράθυρα του πρώτου ορόφου του κτιρίου, αυτά εμφανίζουν την ιδιαιτερότητα ότι είναι τοποθετημένα σε ειδική εσοχή στον τοίχο. Ύστερα από τον σχεδιασμό τους με τις διαστάσεις που φαίνονται στην **Εικόνα 22**, έγινε η τοποθέτησή τους στις απαραίτητες θέσεις στην περίμετρο του πρώτου ορόφου του κτιρίου σύμφωνα με την **Εικόνα 23** (συμμετρικά στις δύο πλευρές του κτιρίου).

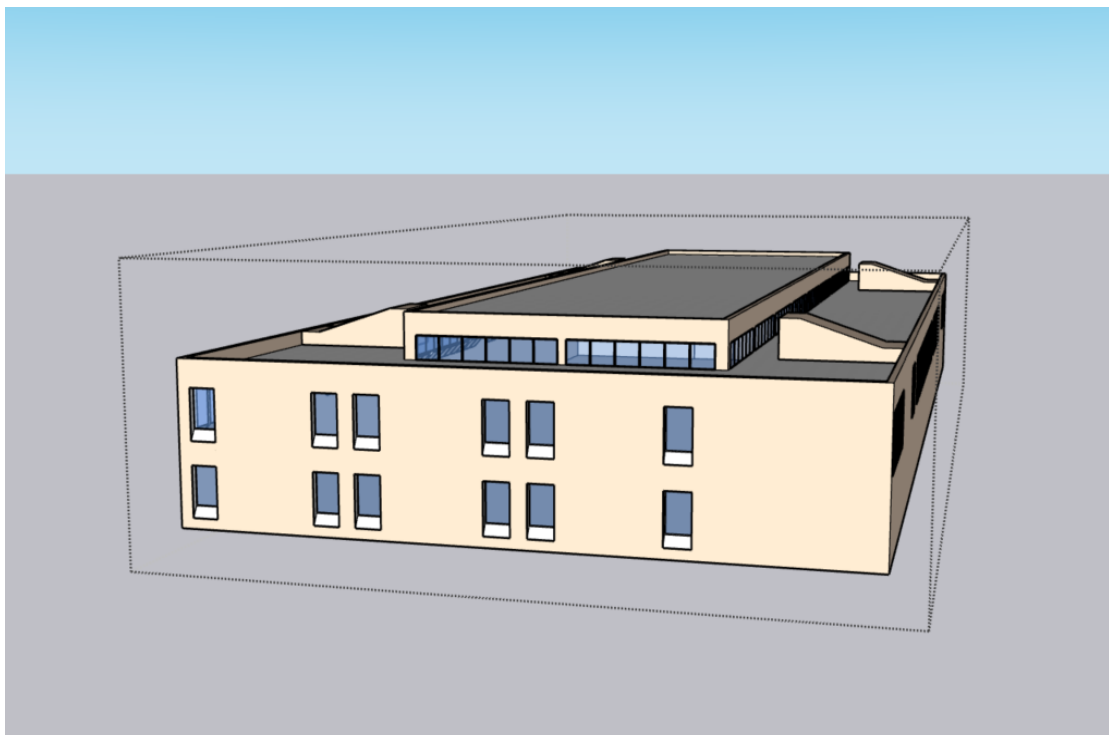


**Εικόνα 22.** Διαστάσεις παραθύρων πρώτου ορόφου



**Εικόνα 23.** Τοποθέτηση παράθυρων πρώτου ορόφου

Επιπλέον, όσον αφορά τα παράθυρα στην περίμετρο του κτιρίου, έγινε σχεδιασμός και αυτών της αριστερής πλευράς του κτιρίου σύμφωνα με την **Εικόνα 24**. Οι διαστάσεις αυτών θεωρήθηκαν ανάλογες με αυτές των παραθύρων του πρώτου ορόφου που αναλύθηκαν παραπάνω.

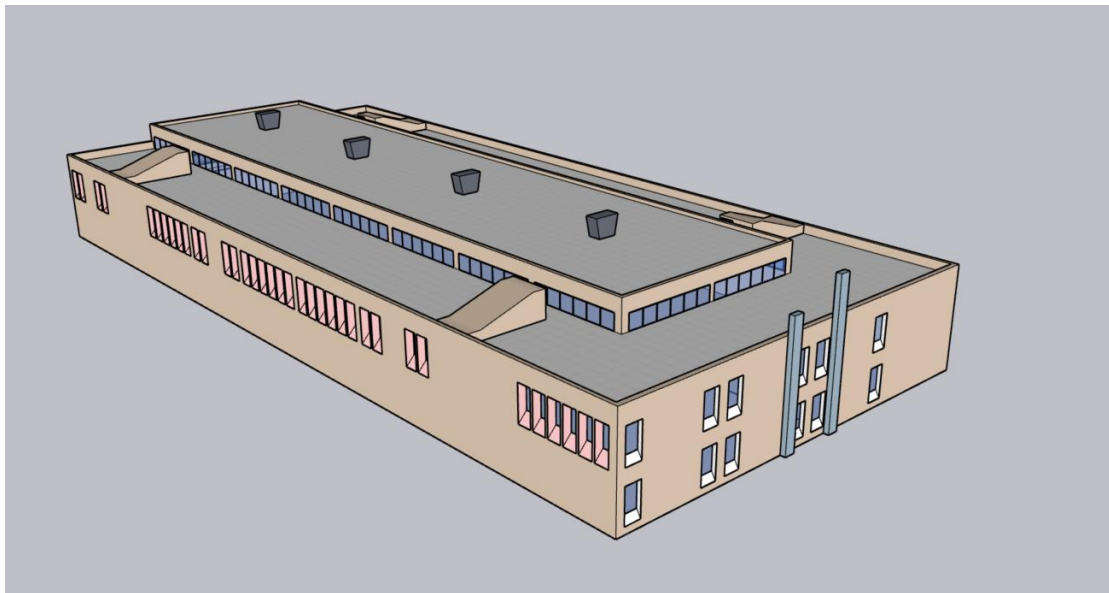


**Εικόνα 24.** Παράθυρα αριστερής πλευράς του κτιρίου

#### 4.2.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΡΟΦΗΣ

Για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει ο διαθέσιμος χώρος που υπάρχει στην υπό μελέτη επιφάνεια. Έτσι, ο σχεδιασμός των στοιχείων της οροφής είναι απαραίτητος, ενώ και η διαστασιολόγησή τους είναι πολύ σημαντική, καθώς το οποιοδήποτε λάθος θα επηρεάσει στη συνέχεια την απόδοση του συστήματος.

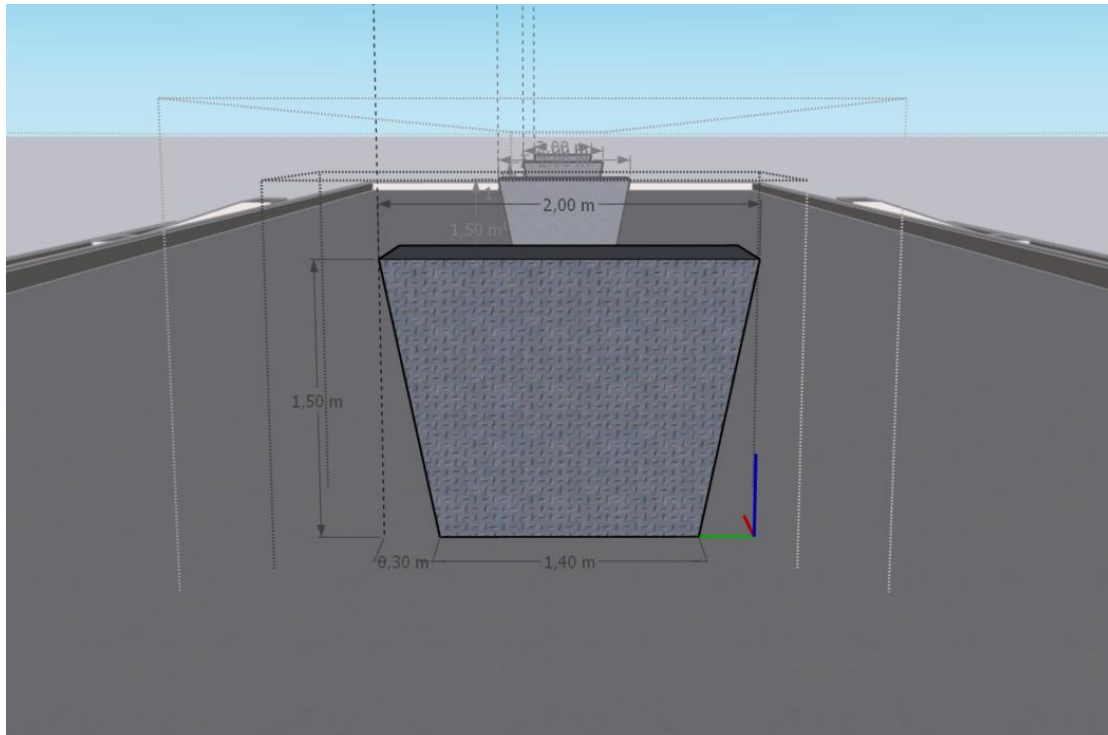
Αρχικά, έγινε ο σχεδιασμός των τεσσάρων στοιχείων στο κεντρικό υπερυψωμένο τμήμα του κτιρίου, τα οποία φαίνονται στην **Εικόνα 25**, μαζί με τις δύο καμινάδες στην πλαϊνή πλευρά του κτιρίου.



**Εικόνα 25.** Σχεδιασμός καμινάδων και στοιχείων οροφής

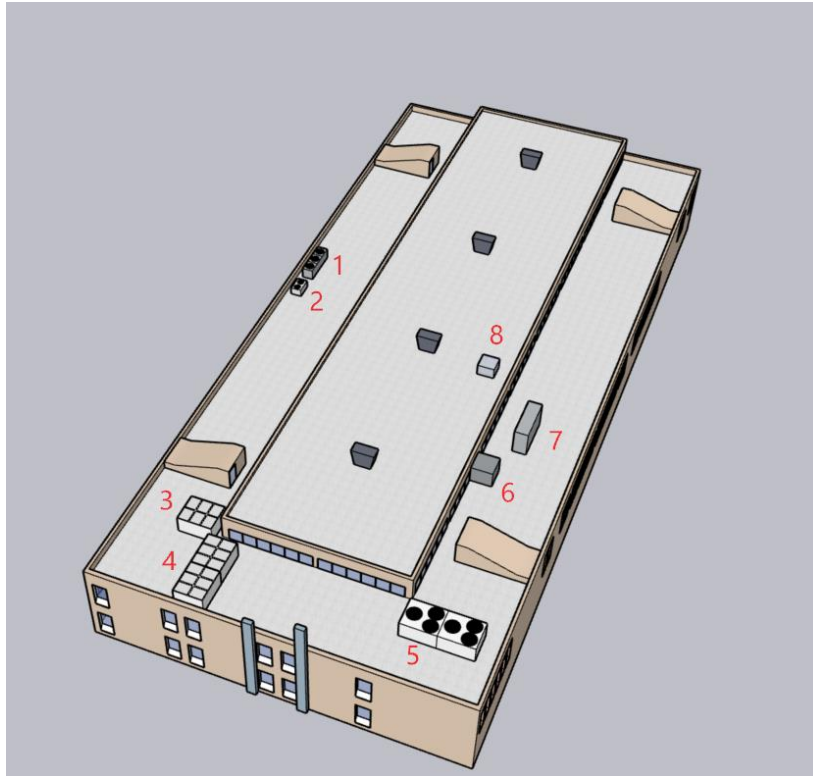
Οι διαστάσεις τους αποτυπώνονται στην **Εικόνα 26**, ενώ το πλάτος τους θεωρήθηκε περίπου ίσο με 1.5m.





**Εικόνα 26.** Διαστάσεις στοιχείων υπερυψωμένης οροφής

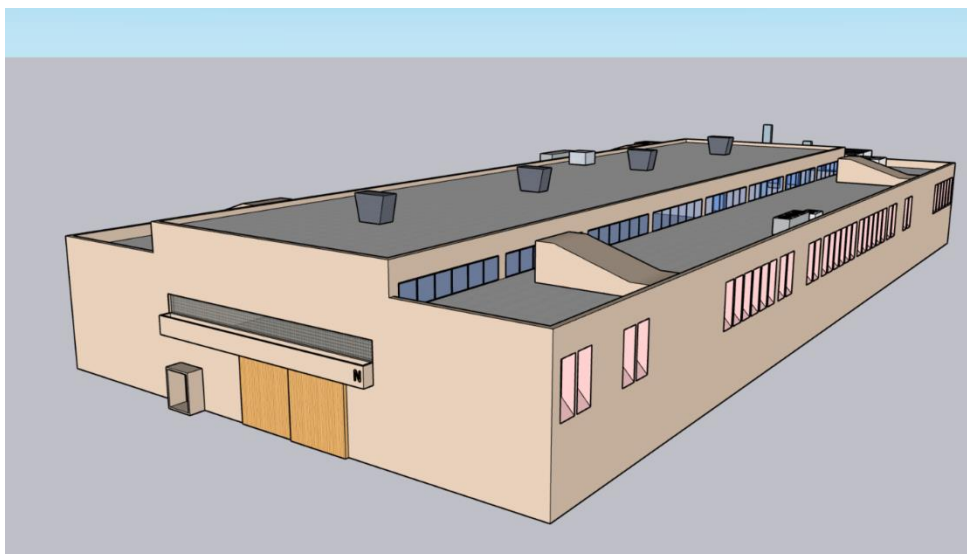
Ο σχεδιασμός των στοιχείων της οροφής του κτιρίου ολοκληρώνεται με την προσθήκη των στοιχείων 1 έως 8, όπως αυτά απεικονίζονται στην **Εικόνα 27**. Σημειώνεται ότι όπως και στα υπόλοιπα στοιχεία, οι διαστάσεις έχουν προσεγγιστεί με τη βοήθεια του Google Earth, ενώ όσον αφορά τα υλικά και τον σχεδιασμό των στοιχείων, οι επιλογές έχουν γίνει και με βάση την παρατήρηση αυτών από γειτονικό κτίριο στον χώρο του Πολυτεχνείου.



**Εικόνα 27.** Σχεδιασμός και προσθήκη υπόλοιπων στοιχείων οροφής

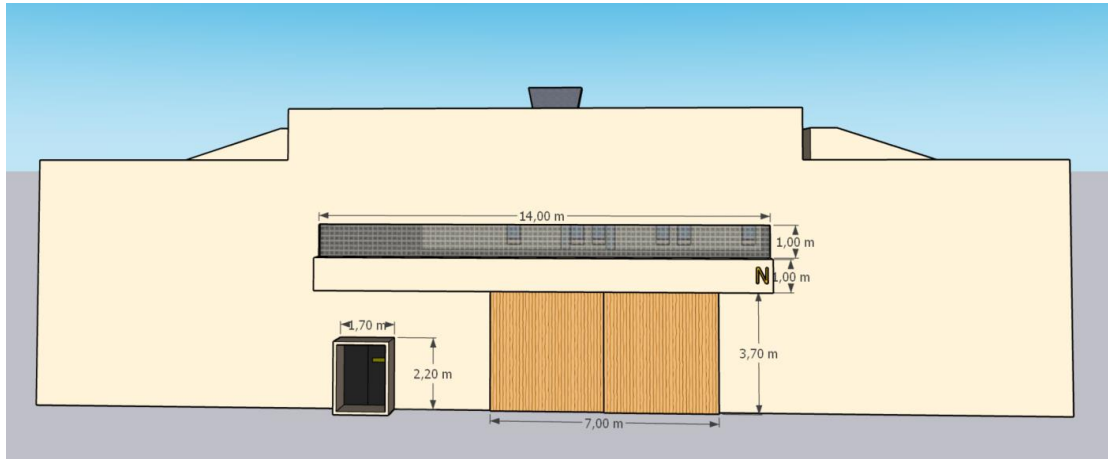
#### 4.2.5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΚΥΡΙΑΣ ΕΙΣΟΔΟΥ

Το τελευταίο μέρος του κτιρίου το οποίο σχεδιάστηκε στο τρισδιάστατο μοντέλο είναι αυτό της πλευράς της εισόδου του, όπως αυτή εμφανίζεται στην **Εικόνα 28**.



**Εικόνα 28.** Σχεδιασμός πλευράς κύριας εισόδου του κτιρίου

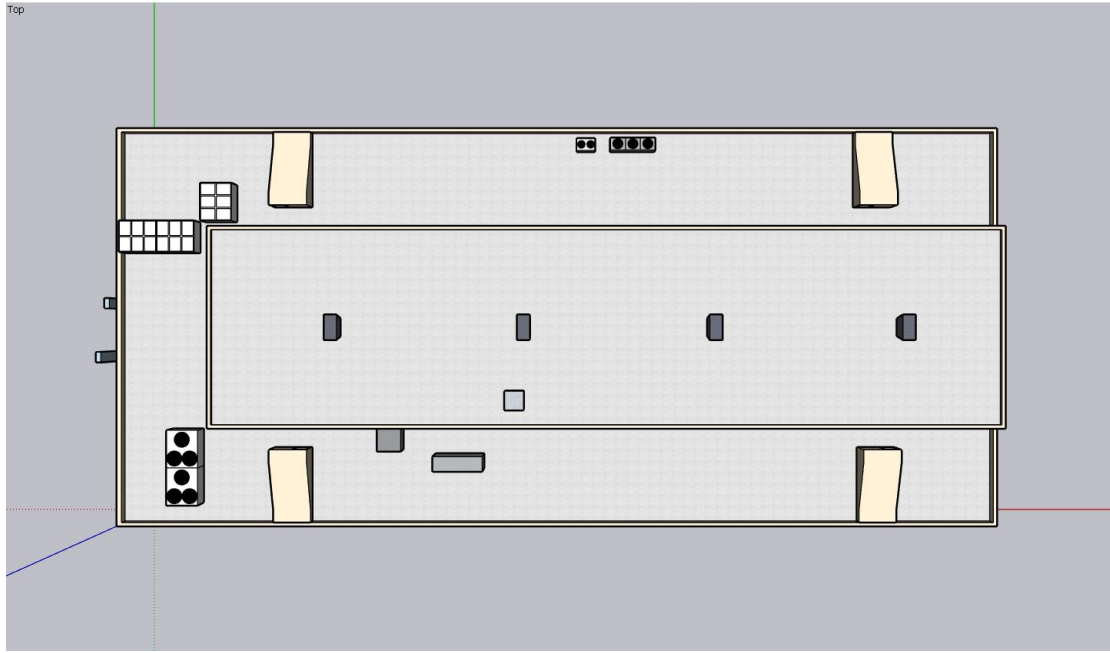
Όπως παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα, η πλευρά αυτή αποτελείται από μία δίφυλλη μεγάλη πόρτα δίπλα σε μία μικρότερη, από ένα μέρος του τοίχου αποτελούμενο από υαλότουβλα και από ένα τοίχιο πάνω στο οποίο αναφέρεται και το γράμμα Ν, ως το όνομα του κτιρίου. Οι βασικές διαστάσεις αποτυπώνονται στην **Εικόνα 29**.



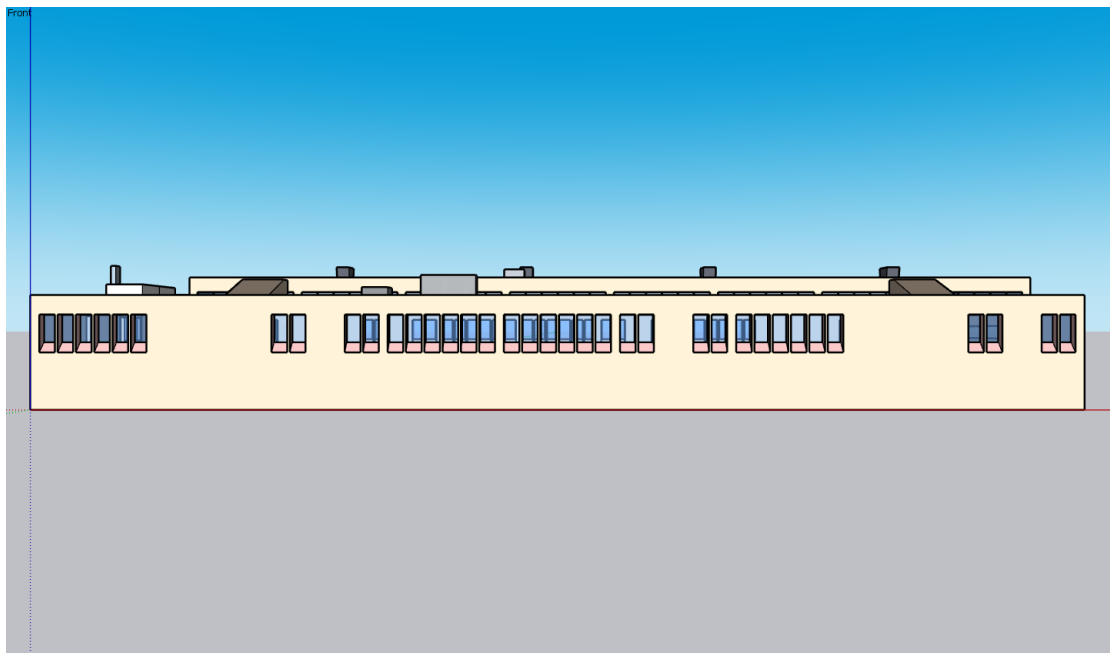
**Εικόνα 29.** Διαστάσεις στοιχείων πλευράς κύριας εισόδου του κτιρίου

#### 4.2.6. ΟΨΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

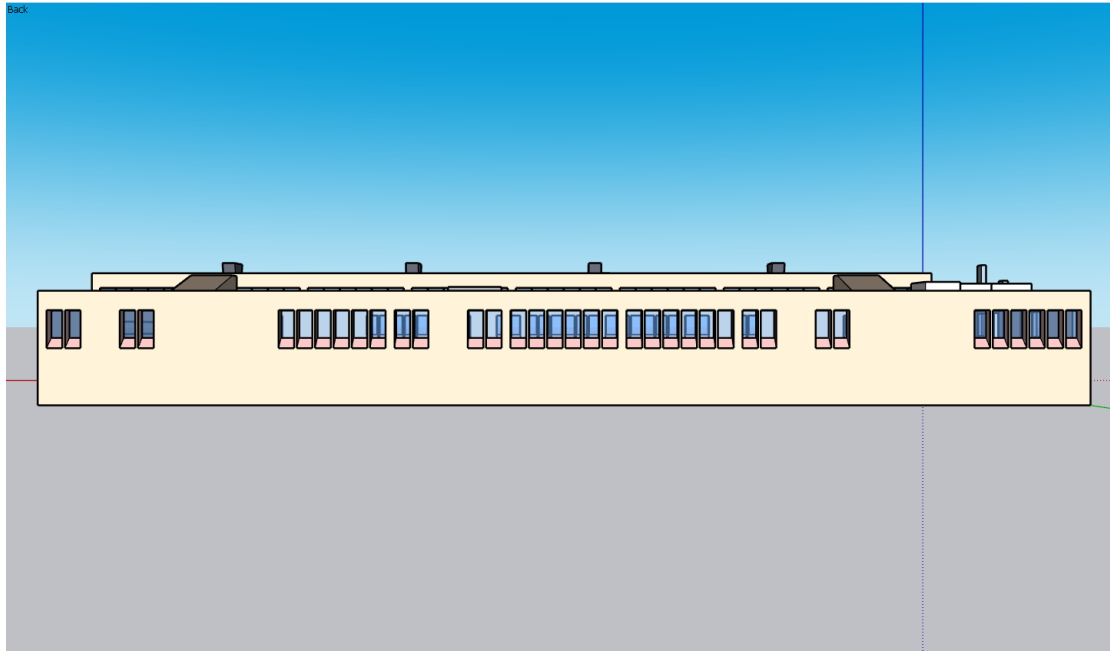
Οι βασικές όψεις του σχεδιασμένου κτιρίου στο περιβάλλον του SketchUp αποτυπώνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην **Εικόνα 30** φαίνεται η κάτοψη του κτιρίου, στην **Εικόνα 31** και την **Εικόνα 32** η πρόσοψη και η πίσω όψη, ενώ στην **Εικόνα 33** και την **Εικόνα 34** οι δύο πλαϊνές όψεις του κτιρίου.



**Εικόνα 30.** Κάτοψη κτιρίου



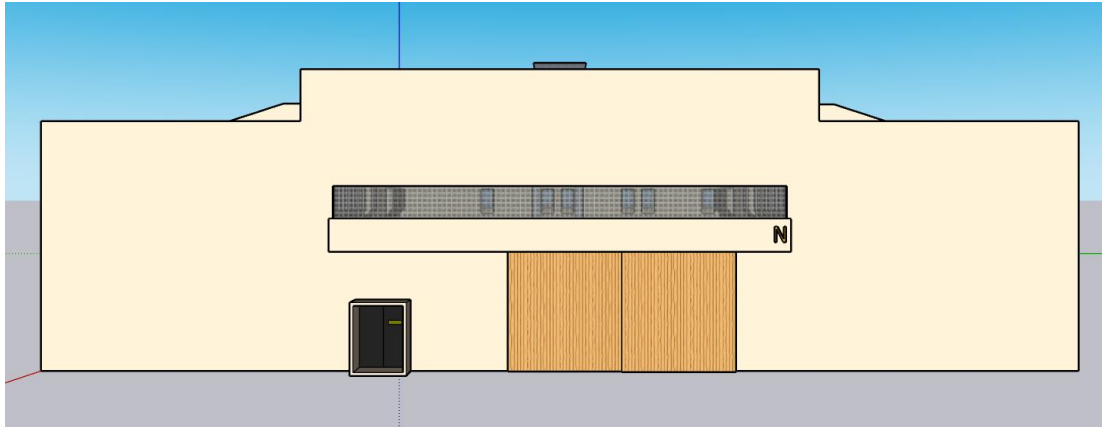
**Εικόνα 31.** Πρόσοψη κτιρίου



**Εικόνα 32.** Πίσω όψη κτιρίου



**Εικόνα 33.** Αριστερή όψη κτιρίου



**Εικόνα 34.** Δεξιά όψη κτιρίου

Αντίστοιχα, οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό του κτιρίου φαίνονται στον **Πίνακα 1** που ακολουθεί.

α/α	ΟΝΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ			ΣΧΟΛΙΑ
		ΜΗΚΟΣ [m]	ΠΛΑΤΟΣ [m]	ΥΨΟΣ [m]	
1	Βάση Κτιρίου	72	32	7	-
2	Οροφή	63	16	2	-
3	Τοιχίο	-	0.3	0.7	-
4	Κλιμακοστάσιο	6	2.5	2	Πόρτα: 1.9 x 1.1
5	Παράθυρα Οροφής	1	-	1	Πλαίσια πάχους 0.1m
6	Παράθυρα 1 <sup>ου</sup> ορόφου	0.95	-	1.8	Πλαίσια πάχους 0.1m
7	Στοιχεία οροφής	2	1.5	1.5	Μήκος βάσης 1.4 m
8	Καμινάδες	0.8	0.4	10.5 (9)	-
9	Λοιπά Στοιχεία 1	3.6	1	1	-
10	Λοιπά Στοιχεία 2	1.5	1	0.7	-
11.	Λοιπά Στοιχεία 3	3	2.5	1.5	-
12	Λοιπά Στοιχεία 4	6	2.5	1.5	-
13	Λοιπά Στοιχεία 5	6	2.5	1.5	-
14	Λοιπά Στοιχεία 6	1.9	1.9	1.5	-
15	Λοιπά Στοιχεία 7	3.9	1.2	2.3	-
16	Λοιπά Στοιχεία 8	1.5	1.5	1	-
17	Άνοιγμα υαλότουβλων	14	-	1	-
18	Πόρτα εισόδου	0.7	-	2.2	-
19	Μεγάλη κεντρική πόρτα	7	-	3.7	-

**Πίνακας 1.** Τελικές διαστάσεις σχεδιασμού του κτιρίου

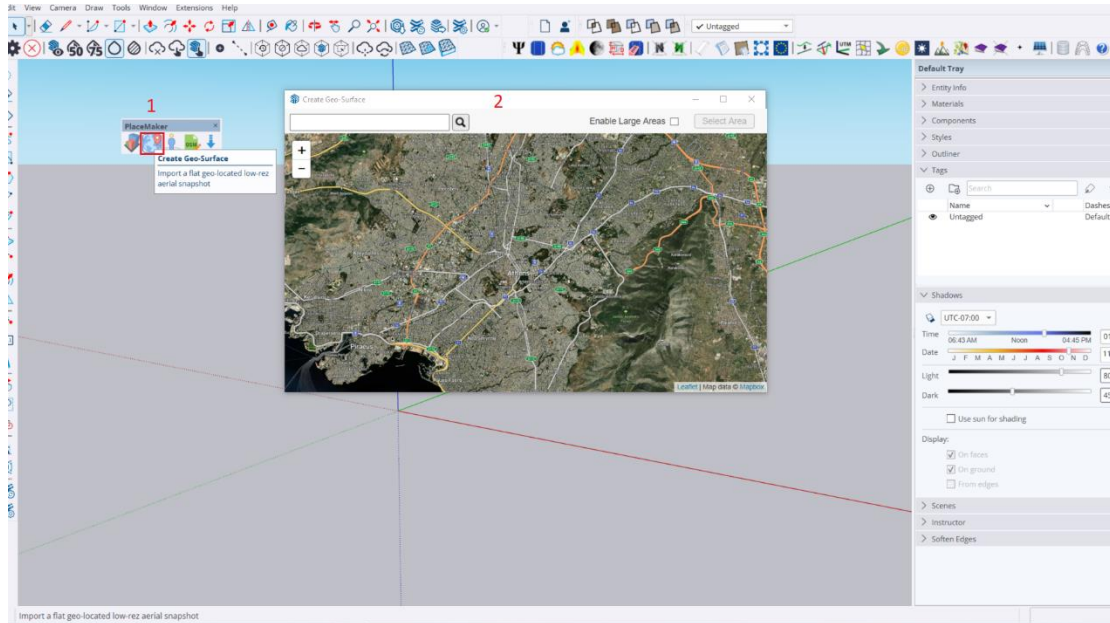
### 4.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΧΩΡΟΥ

Ύστερα από την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του κτιρίου με τη βοήθεια του λογισμικού SketchUp ακολούθησε ο σχεδιασμός του περιβάλλοντος χώρου του κτιρίου. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο καθώς κατά την ανάλυση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει η σκίαση που οφείλεται σε γειτονικά κτίρια ή άλλα εμπόδια (όπως για παράδειγμα δέντρα). Ο σχεδιασμός αυτός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πρόσθετου εργαλείου Placemaker στο περιβάλλον του SketchUp.

Το Placemaker είναι ένα πρόσθετο εργαλείο – επέκταση στο περιβάλλον του SketchUp το οποίο είναι διαθέσιμο σε 11 διαφορετικές γλώσσες και μπορεί να εισάγει στο περιβάλλον του SketchUp τρισδιάστατα δεδομένα, εναέριες εικόνες και γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα τα εισάγει από χάρτες (OpenStreetMap) & (DigitalGlobe) και τα μετατρέπει σε μοντέλα τα οποία μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα για να παραχθούν φωτορεαλιστικές απεικονίσεις ή να γίνει εξαγωγή σε άλλες εφαρμογές. Μπορεί να εισάγει με λεπτομέρεια τρισδιάστατες πόλεις ή εκτάσεις, οι οποίες θα συμπεριλαμβάνουν έδαφος, δρόμους, περιπάτους, κτίρια, σιδηροδρομικό δίκτυο, δέντρα, υδροφόρο ορίζοντα και πολλά άλλα. Η διαδικασία με την οποία πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του τρισδιάστατου μοντέλου της έκτασης των κτιρίων του Πολυτεχνείου γύρω από το κτίριο N φαίνεται παρακάτω.

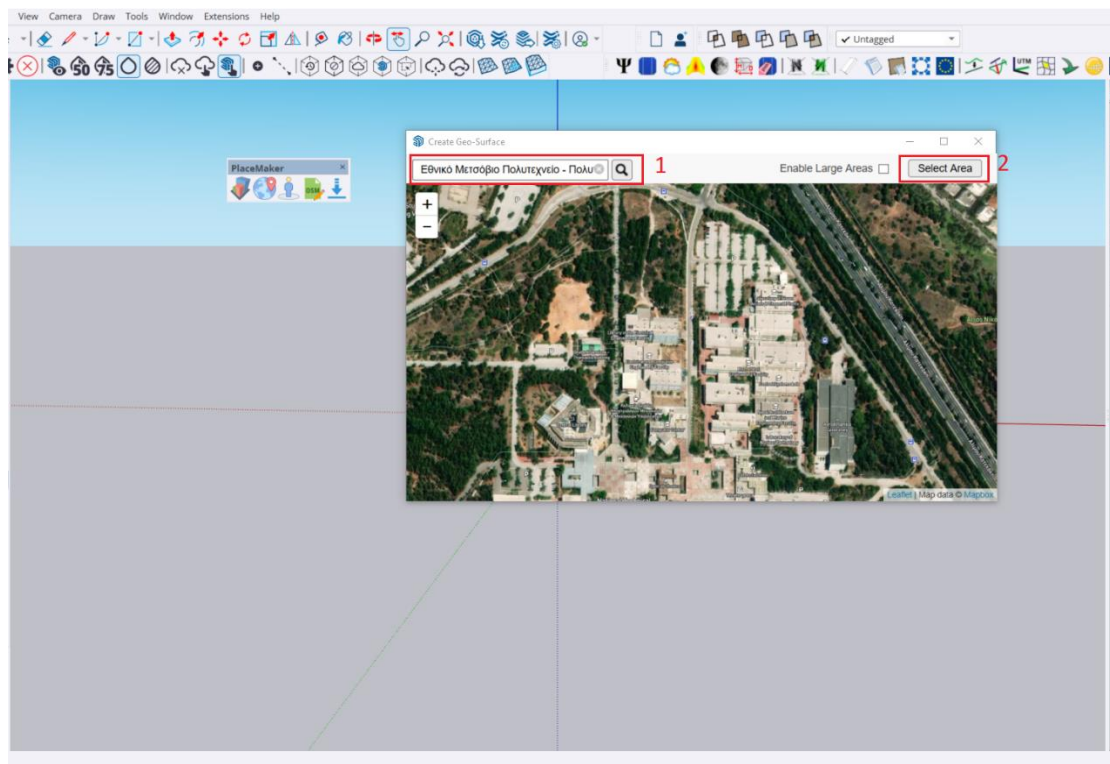
#### 4.3.1. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ

Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει κατά τη μοντελοποίηση με τη χρήση του Placemaker είναι ο γεωεντοπισμός της ζητούμενης έκθεσης, η προσθήκη δηλαδή της τοποθεσίας της στο πρόγραμμα. Αρχικά από την μπάρα εργαλείων του Placemaker επιλέγεται το αντίστοιχο εικονίδιο όπως φαίνεται στην **Εικόνα 35**.



**Εικόνα 35.** Εισαγωγή τοποθεσίας στο περιβάλλον του Placemaker

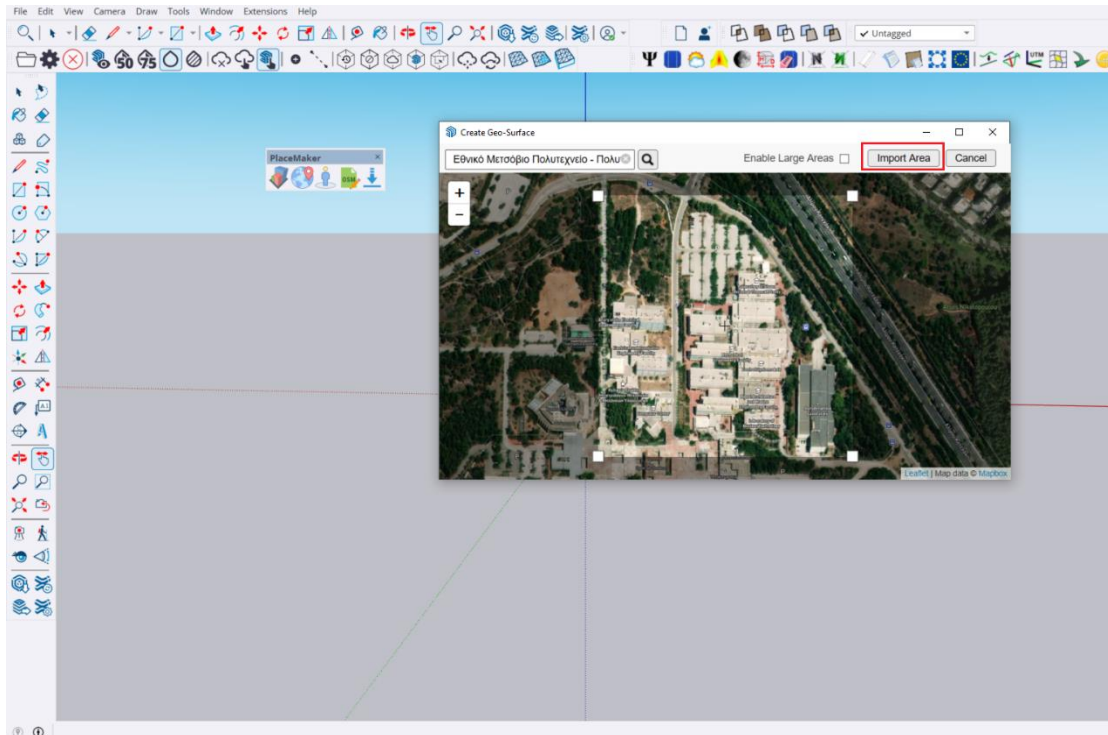
Στο παράθυρο που εμφανίζεται σύμφωνα με την **Εικόνα 36**, γίνεται αναζήτηση της τοποθεσίας (εδώ «Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο») και αφού γίνει από τα αποτελέσματα επιλογή της σωστής τοποθεσίας σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μία προτάσεις, ο χρήστης επιλέγει “Select Area”.



**Εικόνα 36.** Αναζήτηση τοποθεσίας προς εισαγωγή στο Placemaker

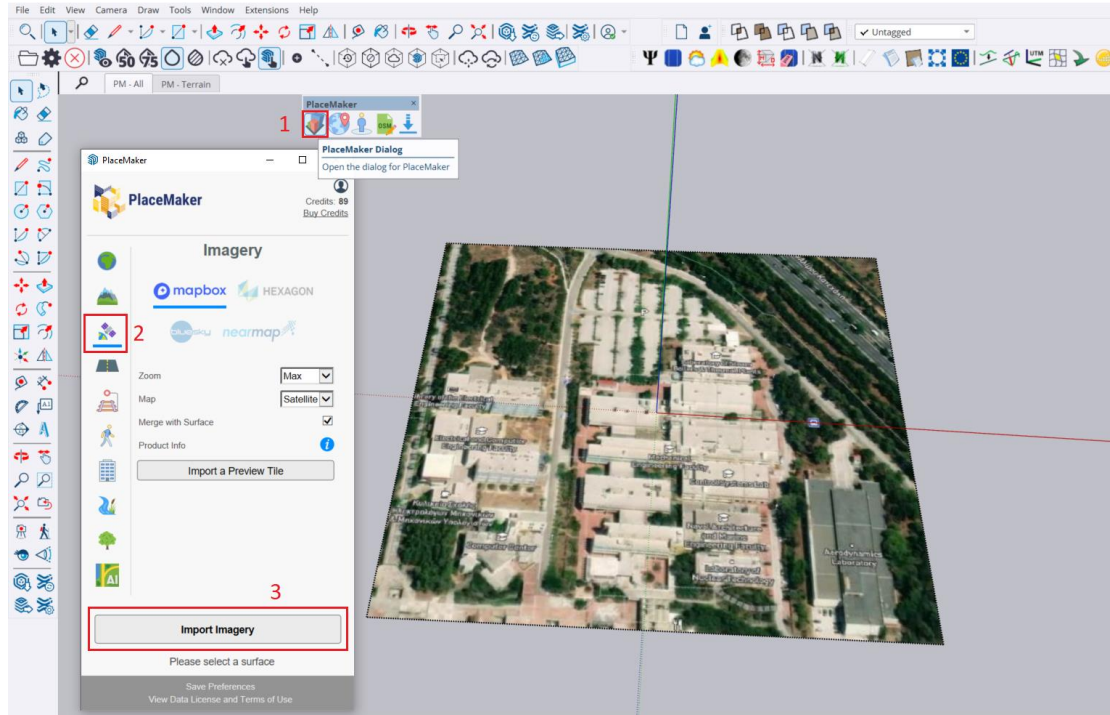


Έπειτα, αφού ο χρήστης ρυθμίσει την έκταση της επιφάνειας που θέλει να εισάγει στο περιβάλλον σχεδίασης, επιλέγει την εντολή “Import Area” σύμφωνα με την **Εικόνα 37**.



**Εικόνα 37.** Επιλογή έκτασης επιφάνειας προς εισαγωγή στο Placemaker

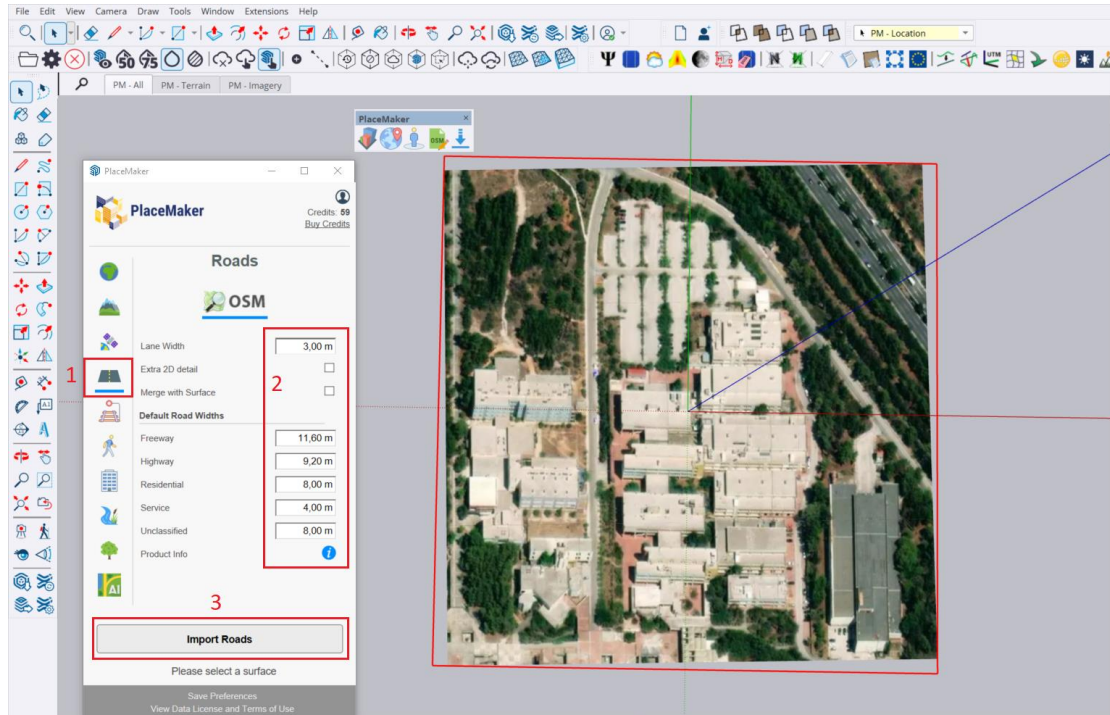
Στο επόμενο βήμα, για τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας που έχει εισαχθεί, επιλέγεται το εικονίδιο που φαίνεται στην **Εικόνα 38**, και στη συνέχεια από το παράθυρο που εμφανίζεται, ορίζονται οι παράμετροι (βάση δεδομένων, ποιότητα και είδος εικόνας) για την εισαγωγή της εικόνας της επιφάνειας.



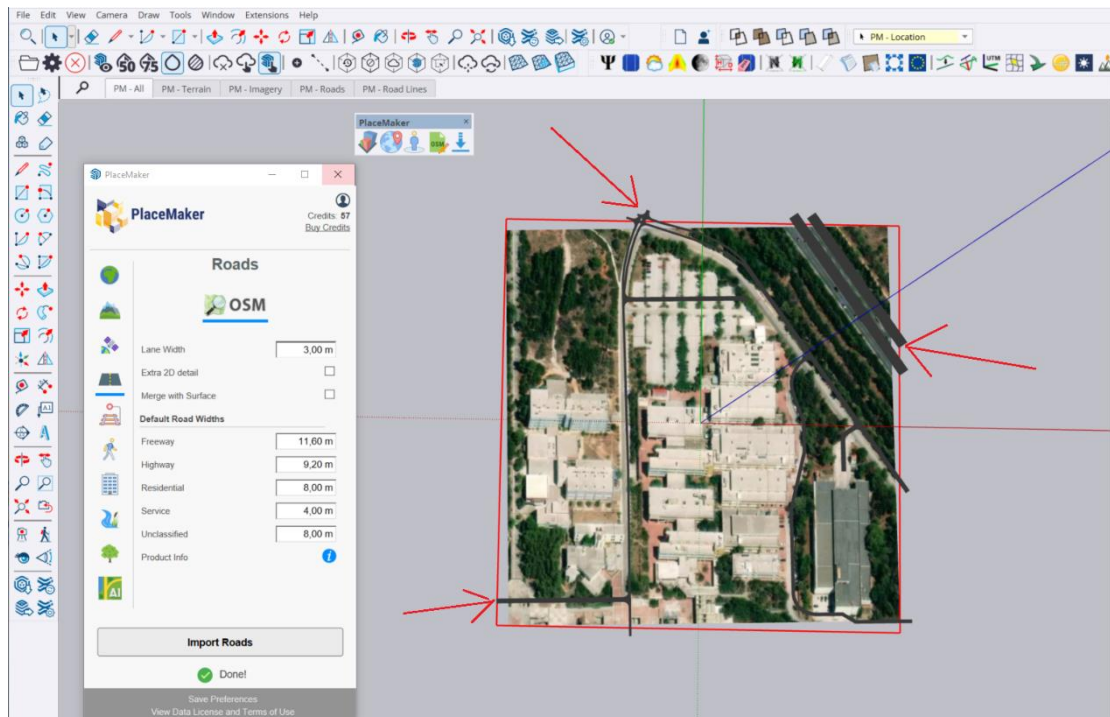
**Εικόνα 38.** Εισαγωγή - βελτίωση ποιότητας εικόνας επιφάνειας

#### 4.3.2. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΟΠΑΤΙΩΝ

Ύστερα από την ολοκλήρωση της προσθήκης της τοποθεσίας και τη βελτίωση της εικόνας της έκτασης που εισάγεται στο περιβάλλον του λογισμικού, το επόμενο βήμα είναι η προσθήκη του οδικού δικτύου και των μονοπατιών, εάν υπάρχουν. Όπως δείχνει η **Εικόνα 39**, αφού γίνει η επιλογή του κατάλληλου μενού από το παράθυρο του Placemaker, ορίζονται οι κατάλληλες παραμέτροι (δηλαδή το πλάτος της κάθε κατηγορίας του οδικού δικτύου) και μετά γίνεται εισαγωγή του οδικού δικτύου στο περιβάλλον του λογισμικού, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 40**.

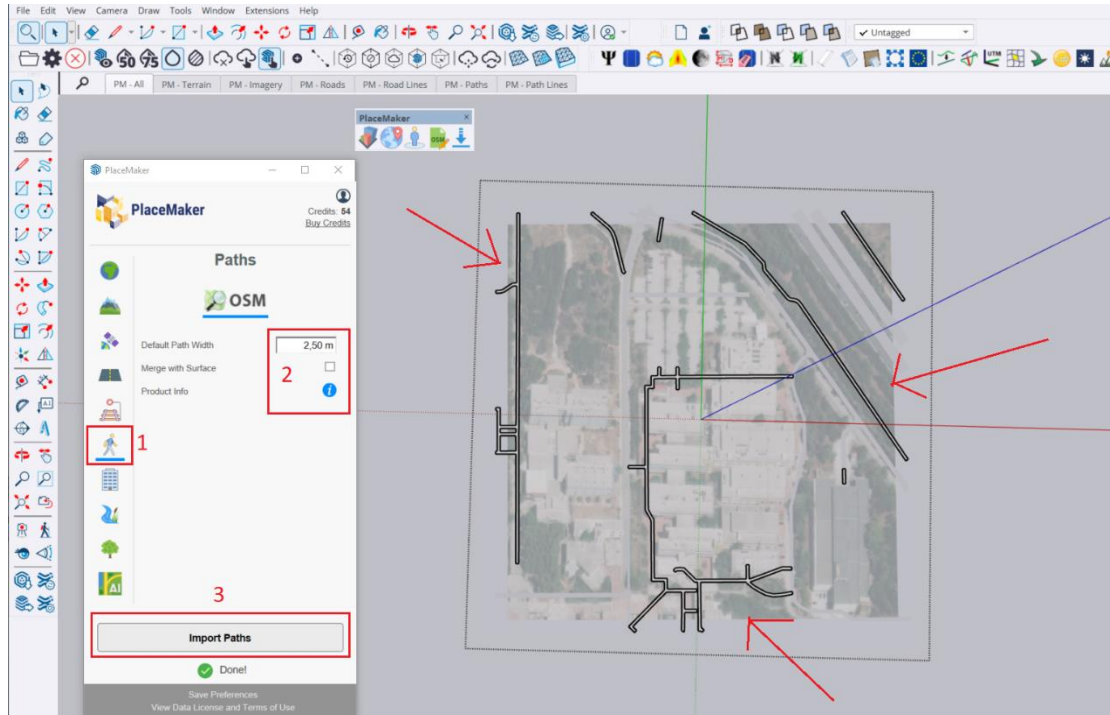


**Εικόνα 39.** Διαδικασία προσθήκης οδικού δικτύου στο περιβάλλον του λογισμικού



**Εικόνα 40.** Προσθήκη οδικού δικτύου

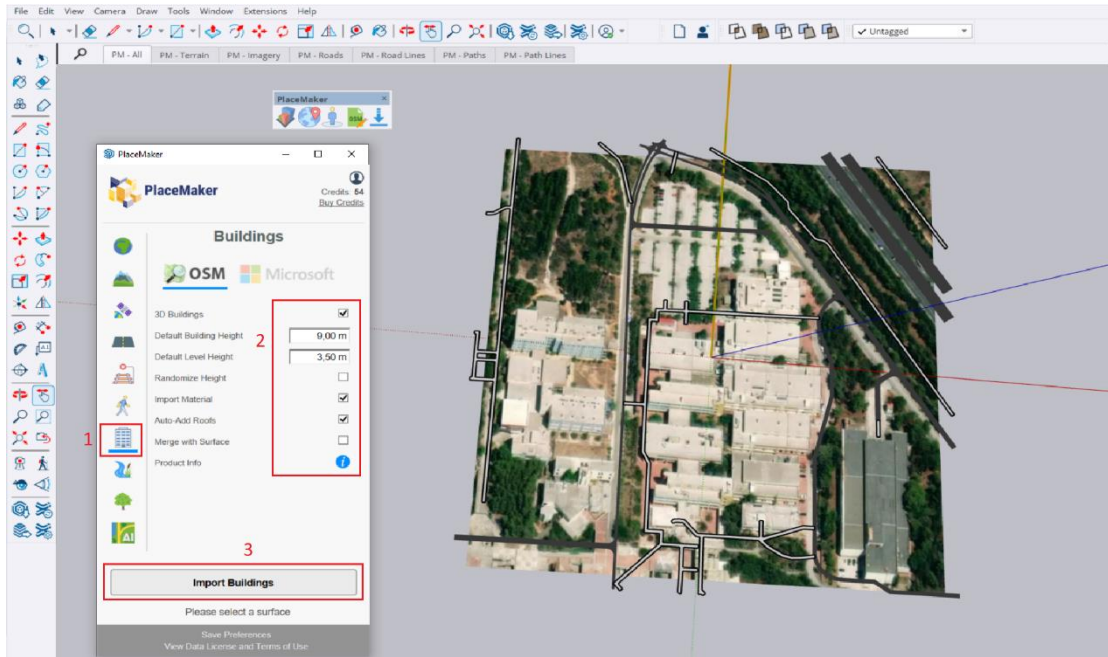
Στη συνέχεια, έγινε η προσθήκη των μονοπατιών όπως αποτυπώνεται στην **Εικόνα 41**.



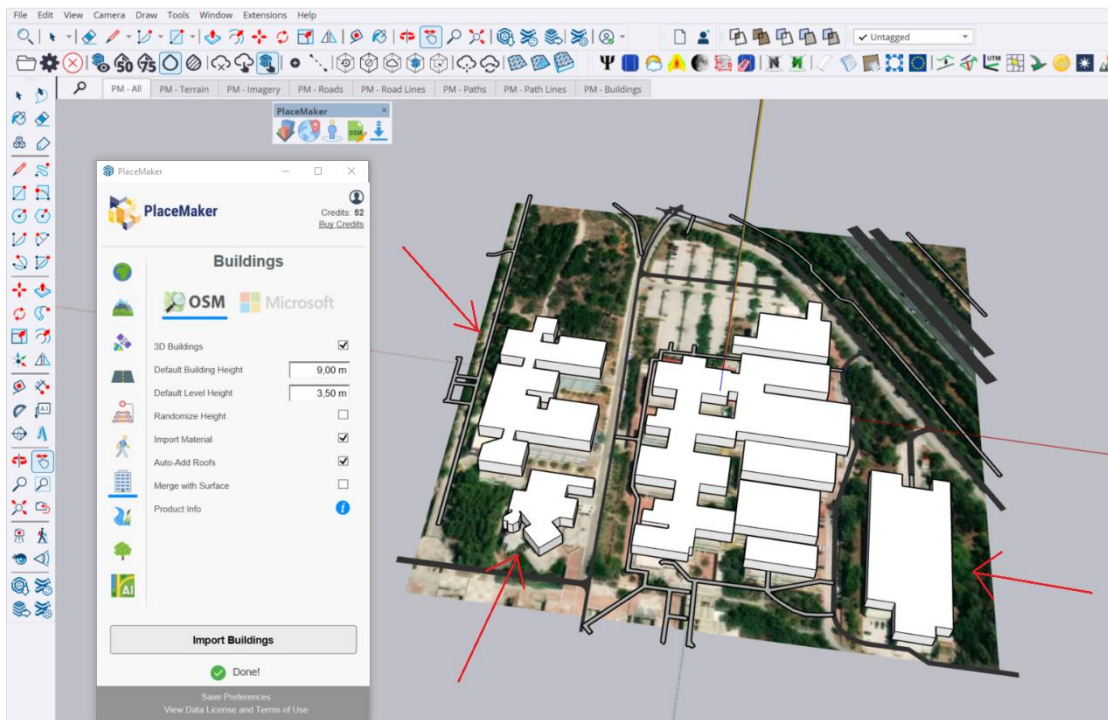
**Εικόνα 41.** Προσθήκη δικτύου μονοπατιών

#### 4.3.3. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΤΙΡΙΩΝ

Το επόμενο απαραίτητο βήμα είναι αυτό της προσθήκης των κτιρίων στην υπό σχεδίαση έκταση. Σύμφωνα με την **Εικόνα 42**, αφού γίνει η επιλογή του κατάλληλου μενού για την εισαγωγή κτιρίων, ορίζονται από τον χρήστη κάποιες παράμετροι (όπως το ύψος των κτιρίων που εδώ επιλέχτηκε στα 9 m, το ύψος των ορόφων και αν όλα τα κτίρια θα έχουν το ίδιο ή τυχαίο ύψος) και στη συνέχεια με την επιλογή “Import Buildings”, προστίθενται στο περιβάλλον του λογισμικού όπως φαίνεται στην **Εικόνα 43**. Σημειώνεται ότι και μετά την προσθήκη τους, υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας των κτιρίων (για παράδειγμα αλλαγή των διαστάσεων ή της θέσης τους ή ακόμα και προσθήκη λεπτομερειών).



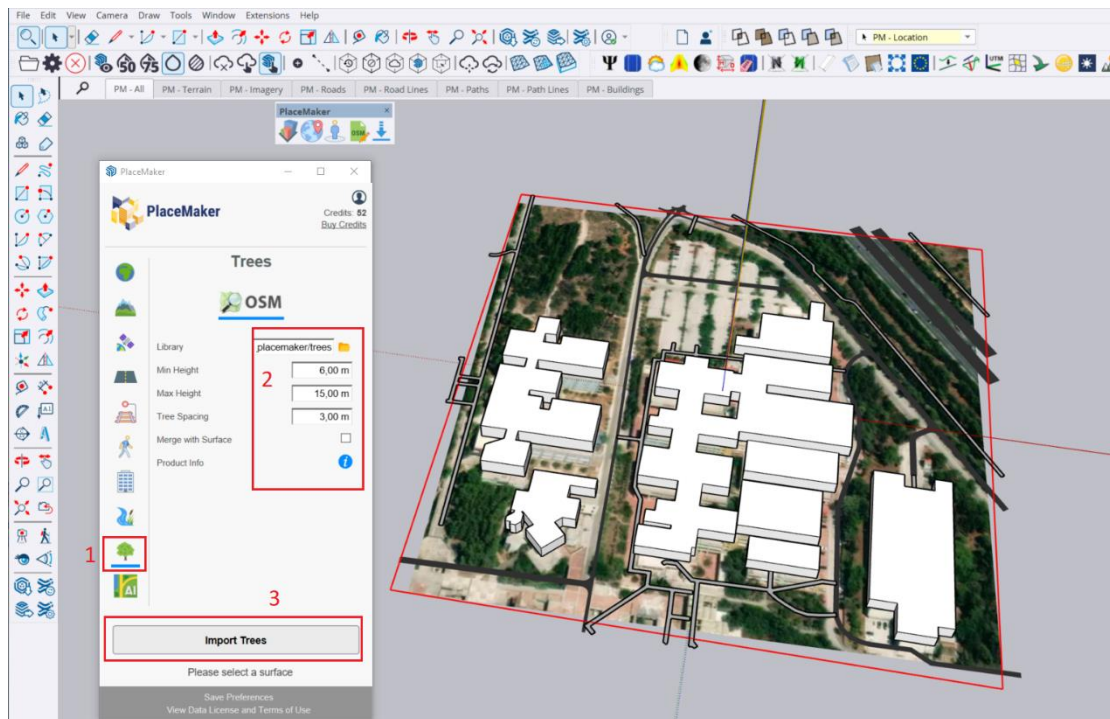
Εικόνα 42. Ορισμός παραμέτρων για την προσθήκη των κτιρίων της υπό σχεδίαση περιοχής



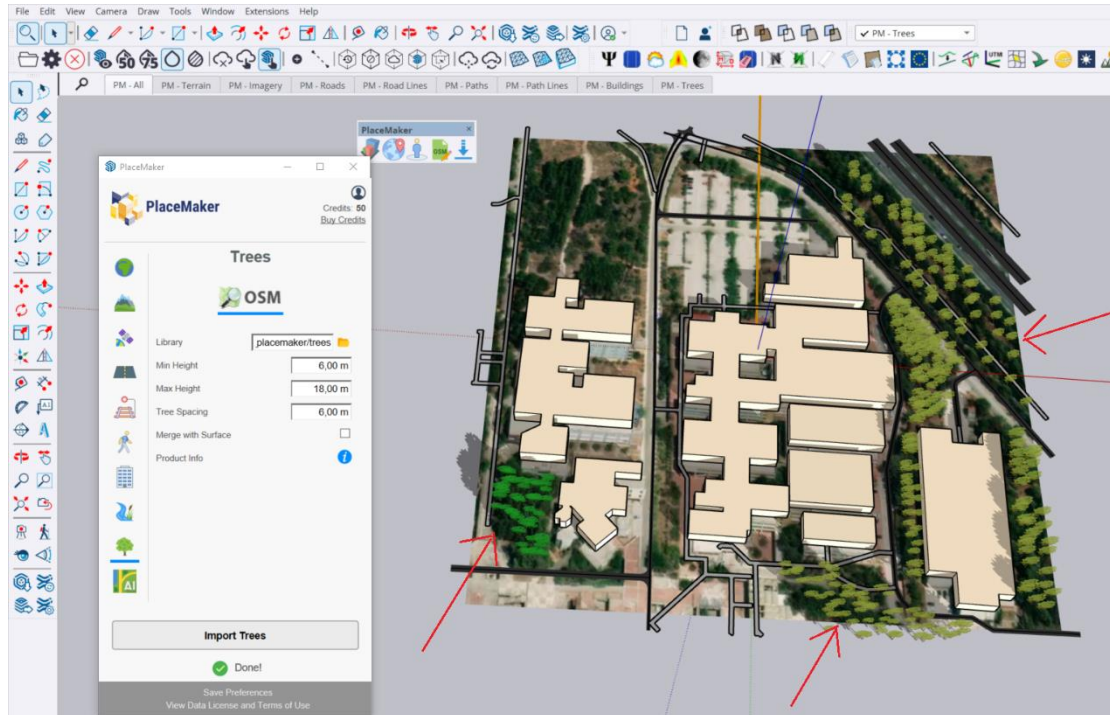
Εικόνα 43. Προσθήκη κτιρίων στο περιβάλλον του λογισμικού

## 4.3.4. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΔΕΝΤΡΩΝ

Ύστερα από την προσθήκη των κτιρίων στο περιβάλλον του λογισμικού, γίνεται προσθήκη και των δέντρων της περιοχής του Πολυτεχνείου γύρω από το κτίριο N. Αυτό γίνεται με την επιλογή από το κατάλληλο μενού του Placemaker των παραμέτρων για την προσθήκη των δέντρων (το εύρος τιμών του ύψους τους και οι μεταξύ τους αποστάσεις) όπως φαίνεται στην **Εικόνα 44**. Αφού ολοκληρωθεί και αυτό το βήμα, η περιοχή γύρω από τον χώρο του υπό μελέτη κτιρίου N αποτυπώνεται στην **Εικόνα 45**. Σημειώνεται ότι για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να χρειαστεί να κάνει κάποιες παρεμβάσεις ο χρήστης, όπως να προσθέσει κάποια μεμονωμένα δέντρα που δεν προστέθηκαν αυτόματα ή να αλλάξει το ύψος σε κάποια άλλα.



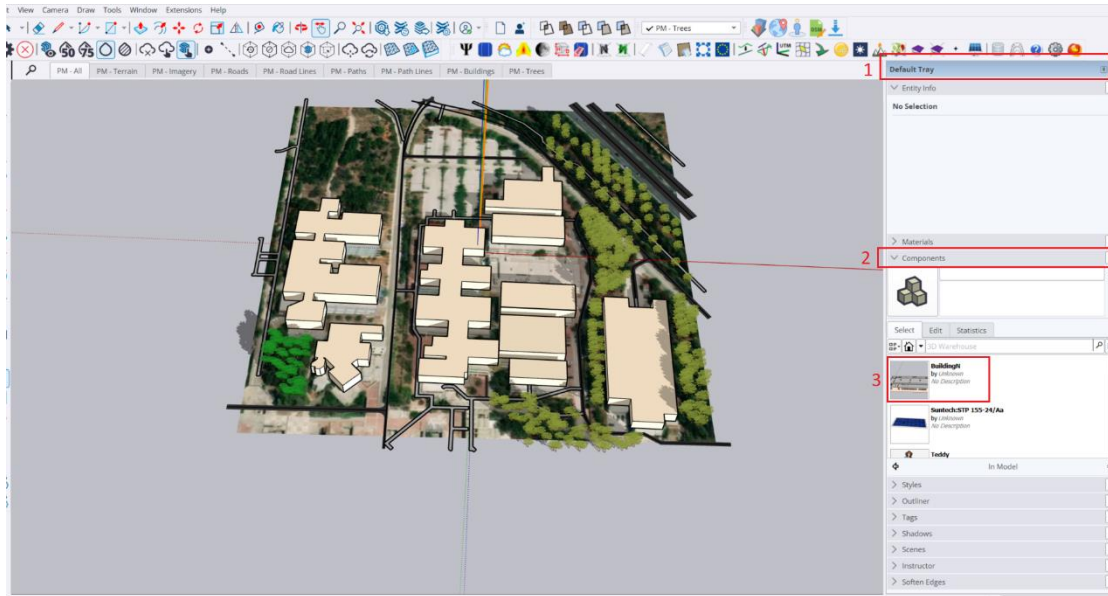
**Εικόνα 44.** Ορισμός παραμέτρων για την προσθήκη των δέντρων



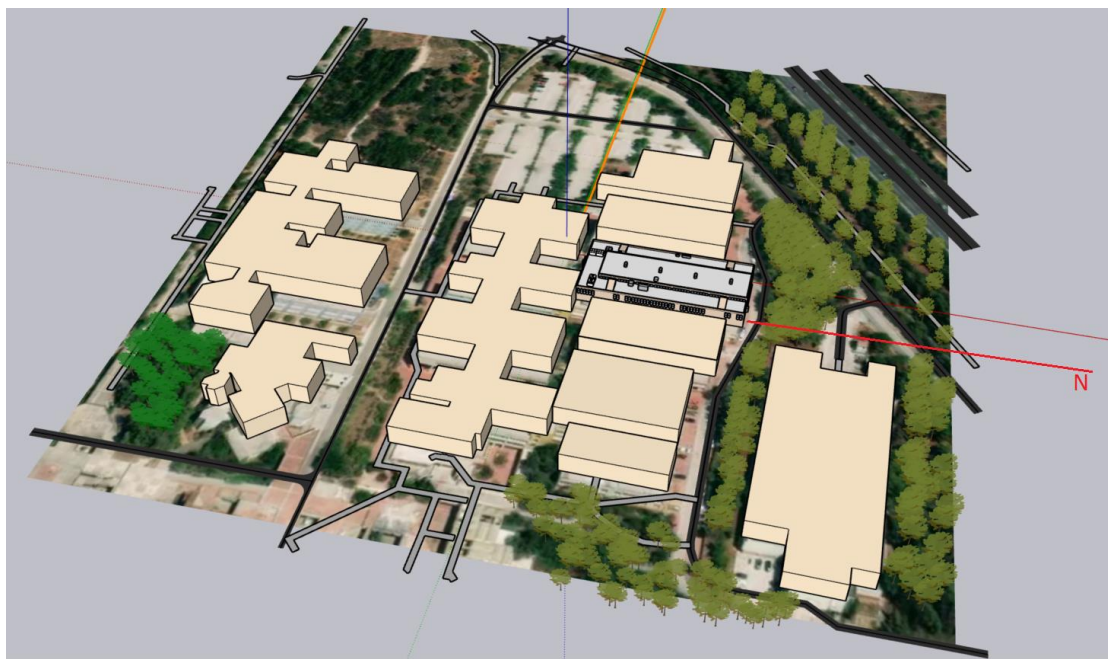
**Εικόνα 45.** Προσθήκη δέντρων

#### 4.3.5. ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ Ν

Το τελευταίο βήμα του σχεδιασμού δεν είναι άλλο από την προσθήκη του κτιρίου Ν, όπως αυτό σχεδιάστηκε με όλες τις λεπτομέρειες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για να γίνει αυτό, απομακρύνεται το αντίστοιχο κτίριο που πρόσθεσε το Placemaker (χωρίς λεπτομέρειες σχεδιασμού) και στη συνέχεια εισάγεται το κτίριο που σχεδιάστηκε, μέσω της επιλογής του από την καρτέλα των “Components” από το παράθυρο “Default Tray” σύμφωνα με την **Εικόνα 46**. Αφού προστεθεί αυτό, γίνεται η τοποθέτησή του στην σωστή θέση στην υπάρχουσα επιφάνεια και το αποτέλεσμα εμφανίζεται στην **Εικόνα 47**.



**Εικόνα 46.** Βήματα προσθήκης σχεδιασμένου κτιρίου N



**Εικόνα 47.** Προσθήκη κτιρίου N και ολοκλήρωση σχεδιασμού περιβάλλοντος χώρου

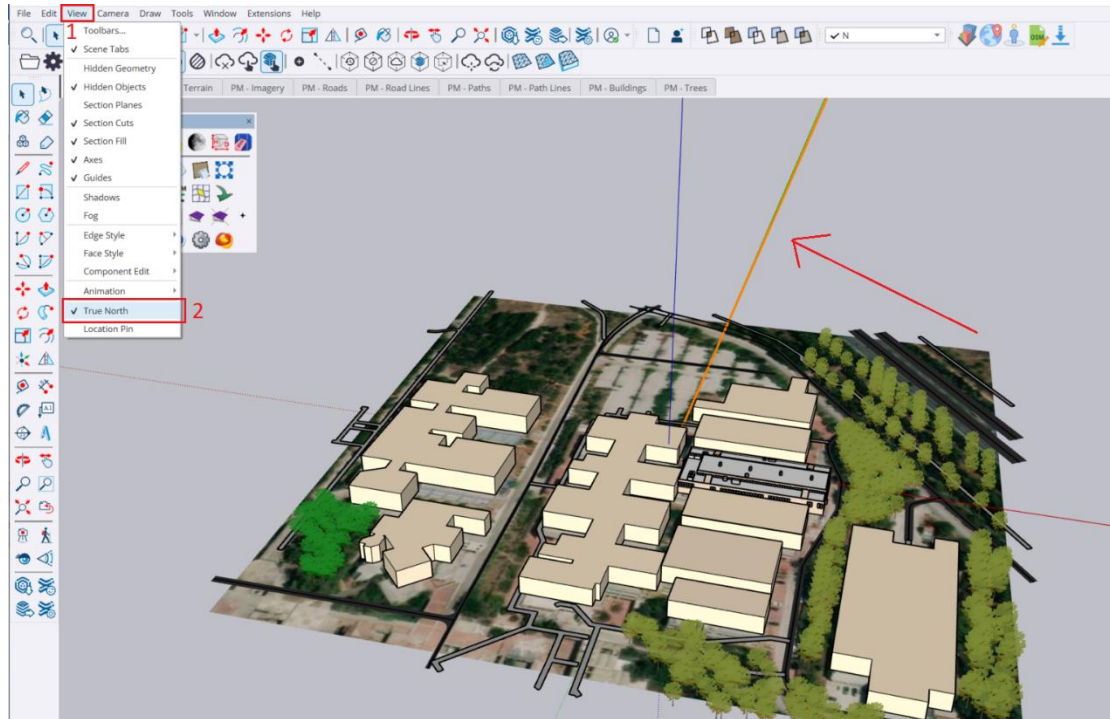


## 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

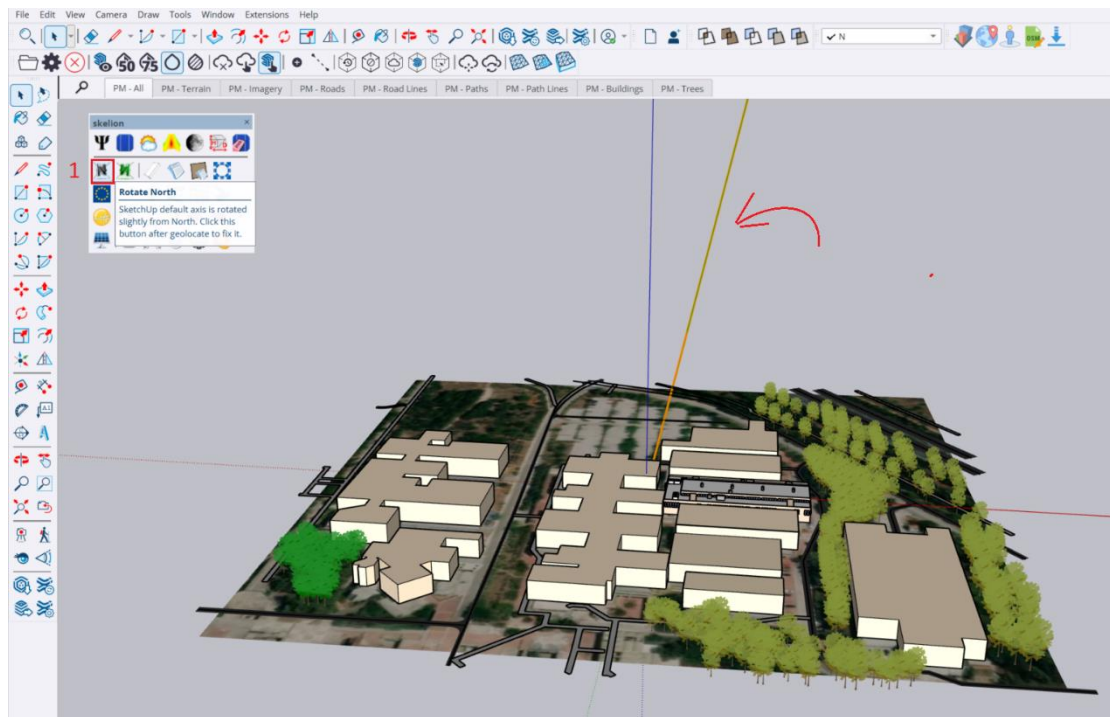
### 5.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του κτιρίου N αλλά και του περιβάλλοντος χώρου αυτού, ακολουθεί η ανάλυση της σκίασης στις επιφάνειες στις οποίες θα τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η σκίαση είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς είναι ένας από τους σημαντικότερους λόγους απωλειών σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Οι απαιτήσεις χώρου και οι απώλειες σκίασης μπορούν να ελαχιστοποιηθούν μέσω της βελτιστοποίησης των γωνιών κλίσης και των αποστάσεων μεταξύ των σειρών των μονάδων.

Αρχικά γίνεται επιλογή εμφάνισης του άξονα του Βορρά όπως φαίνεται στην **Εικόνα 48** (από το μενού View > True North). Ο άξονας αυτός μπορεί να μην ταυτίζεται και να εμφανίζει μικρή απόκλιση σε σχέση με τον έναν από τους δύο άξονες του οριζοντίου επιπέδου του περιβάλλοντος σχεδιασμού στο SketchUp. Παρόλα αυτά, το Skelion δίνει την επιλογή, σύμφωνα με την **Εικόνα 49**, για την περιστροφή του άξονα του Βορρά, έτσι ώστε αυτός να ταυτίζεται με τον πράσινο άξονα του περιβάλλοντος σχεδιασμού. Αντίστοιχα, ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη, υπάρχει και η δυνατότητα για εκ νέου περιστροφή του άξονα του Βορρά στην αρχική του θέση. Εδώ, γίνεται επιλογή ο άξονας του Βορρά να ταυτίζεται με τον πράσινο άξονα σχεδιασμού, καθώς έτσι το κτίριο N θα έχει τον σωστό προσανατολισμό, όπως αυτός προκύπτει από τους χάρτες του Google Earth.



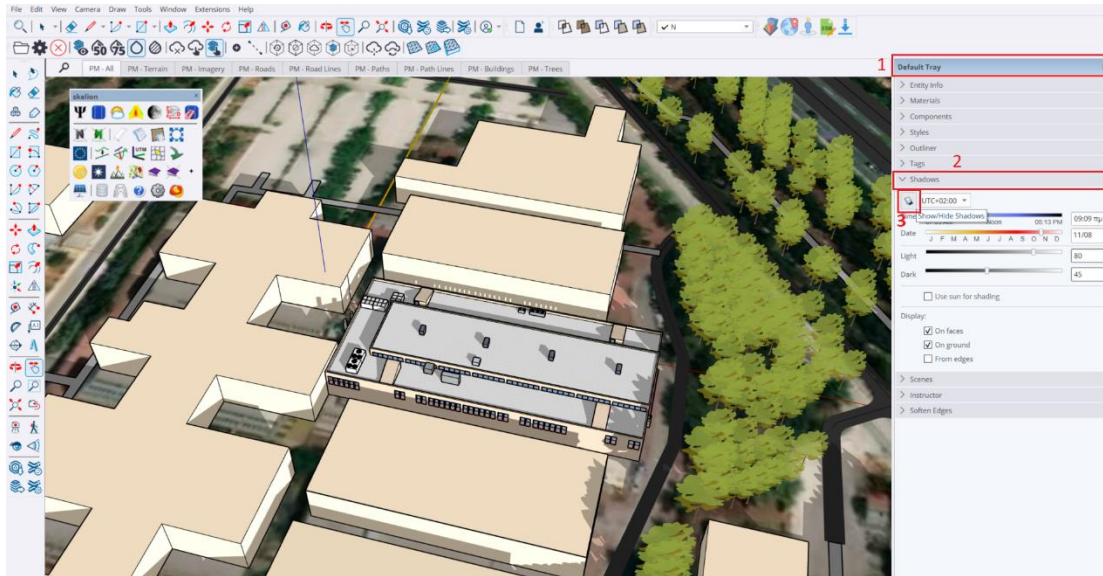
**Εικόνα 48.** Εμφάνιση άξονα του Βορρά στο περιβάλλον του λογισμικού (άξονας με πορτοκαλί χρώμα)



**Εικόνα 49.** Περιστροφή (πορτοκαλί) άξονα του Βορρά προκειμένου να ταυτίζεται με τον πράσινο άξονα σχεδίασης

Στη συνέχεια, από την καρτέλα “Default Tray”, από το μενού “Shadows” γίνεται επιλογή εμφάνισης των σκιών στο μοντέλο, σύμφωνα με την **Εικόνα 50**. Στο μενού

“Shadows”, μπορεί να γίνει επιλογή της ζώνης ώρας στην οποία βρίσκεται το μοντέλο (εδώ: UTC +02.00), καθώς και επιλογή της μέρας του έτους αλλά και της χρονικής στιγμής μέσα στη μέρα, της οποίας η σκίαση θα προβληθεί στην επιφάνεια.



**Εικόνα 50.** Εμφάνιση σκιών στο μοντέλο

Για να πραγματοποιηθεί ανάλυση της επίδρασης της σκίασης από γειτονικά εμπόδια στο κτίριο N, επιλέγεται όπως φαίνεται στην **Εικόνα 51** σαν ημέρα του έτους η 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, ημέρα κατά την οποία ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά στον ορίζοντα και έτσι παρατηρούνται οι μεγαλύτερες σκιές το μεσημέρι. Οι ώρες ανατολής και δύσης του ήλιου τη συγκεκριμένη μέρα δίνονται από το λογισμικό και είναι 07:42 και 05:04 αντίστοιχα. Στη συνέχεια, αλλάζοντας την ώρα της ημέρας, μεταβάλλονται και οι σκιές οι οποίες εμφανίζονται. Ενδεικτικά, στην **Εικόνα 52**, **Εικόνα 53** και **Εικόνα 54** αποτυπώνονται οι σκιάσεις στις 9 το πρωί (09:00), το μεσημέρι (12:00) καθώς και στις 3 το απόγευμα (15:00) αντίστοιχα.



**Εικόνα 51.** Επιλογή ημέρας του έτους για προβολή σκιών



**Εικόνα 52.** Προβολή σκιών στο κτίριο N στις 09:00



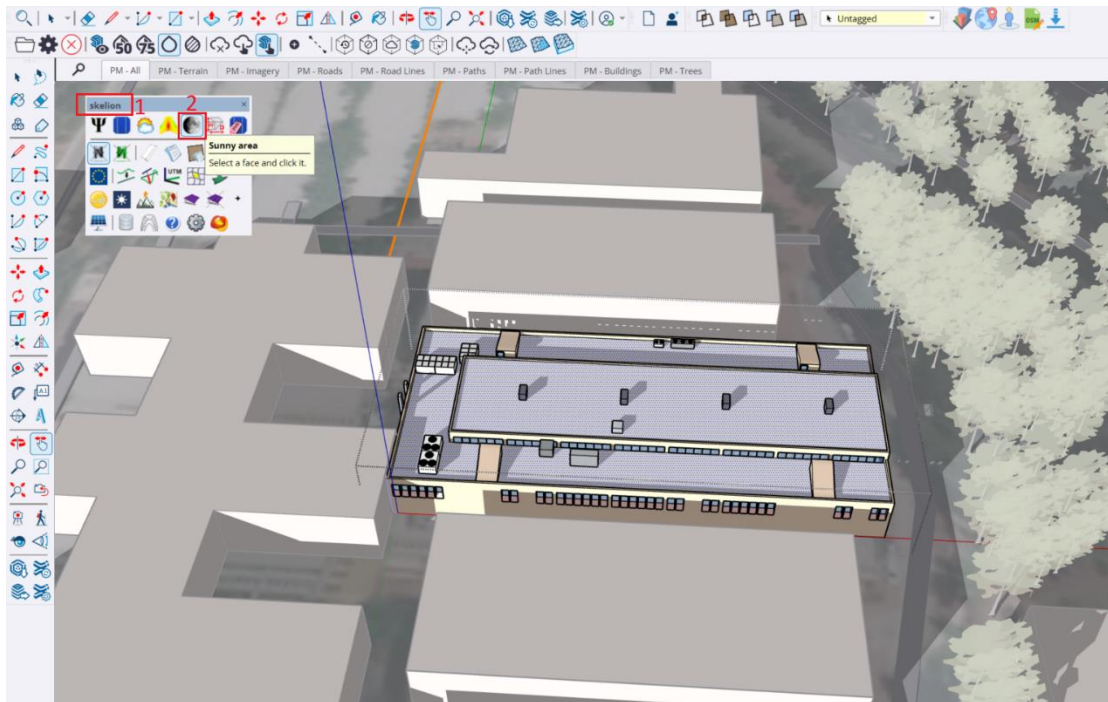
**Εικόνα 53.** Προβολή σκιών στο κτίριο N στις 12:00



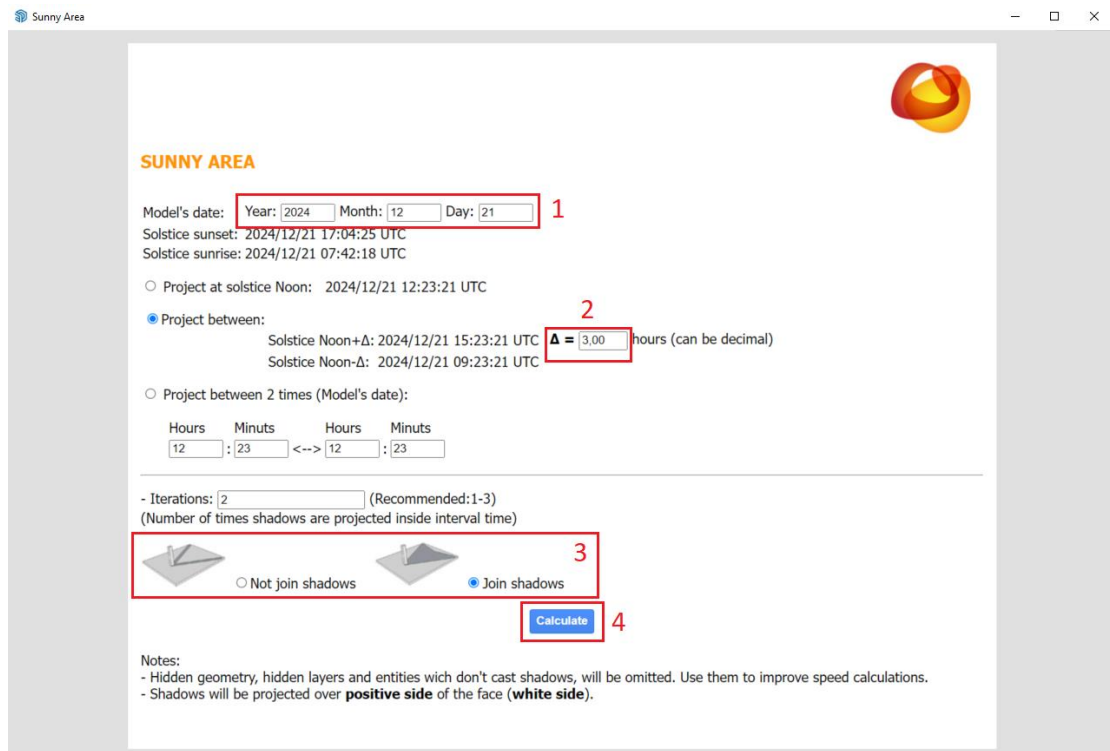
**Εικόνα 54.** Προβολή σκιών στο κτίριο N στις 15:00

Εκτός από την προβολή αυτή, το Skelion διαθέτει ακόμα ένα εργαλείο για τον υπολογισμό και την εμφάνιση των σκιασμένων επιφανειών. Αυτό λέγεται “Sunny area”, και υπολογίζει και σχεδιάζει το περίγραμμα των σκιών πάνω σε μία επιφάνεια που επιλέγει ο χρήστης, για κάποιο χρονικό διάστημα που ορίζει ο ίδιος γύρω από το ηλιακό μεσημέρι. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 55**, αφού γίνει επιλογή των επιφανειών της οροφής του κτιρίου N, επιλέγεται το εικονίδιο που αντιστοιχεί στο εργαλείο

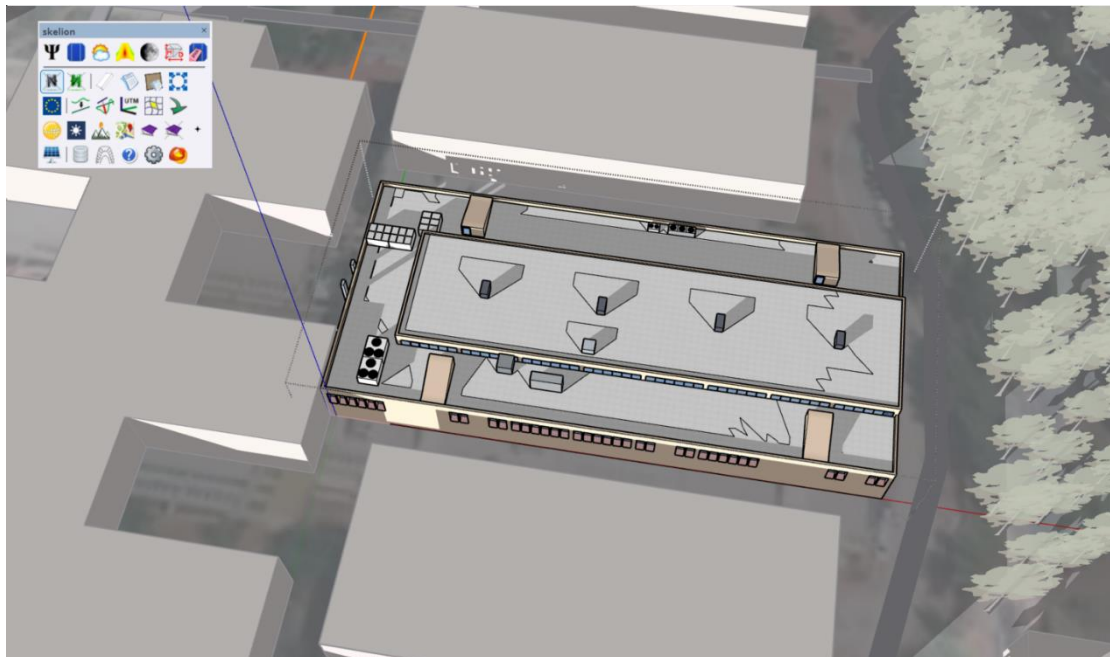
“Sunny area” από τη γραμμή εργαλείων του “Skelion”. Στη συνέχεια, στο παράθυρο που εμφανίζεται, σύμφωνα με την **Εικόνα 56**, γίνεται αρχικά επιλογή της ημέρας του έτους και στη συνέχεια του εύρους των ωρών γύρω από το ηλιακό μεσημέρι κατά το οποίο επιθυμεί ο χρήστης να προβληθούν οι σκιές. Τέλος, ορίζεται ο τρόπος προβολής των σκιών και αφού γίνει η επιλογή “Calculate”, το αποτέλεσμα εμφανίζεται στην **Εικόνα 57**, όπου εμφανίζεται το περίγραμμα των σκιών πάνω στις επιφάνειες της οροφής του κτιρίου N. Σημειώνεται ότι το περίγραμμα αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα μεγάλο στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς ήταν μεγάλο και το εύρος των ωρών γύρω από το ηλιακό μεσημέρι ( $\Delta=3.00$ ).



**Εικόνα 55.** Επιλογή εργαλείου "Sunny area" αφού γίνει επιλογή επιφανειών



Εικόνα 56. Ορισμός παραμέτρων για την προβολή των σκιών στο περιβάλλον του "Sunny area"

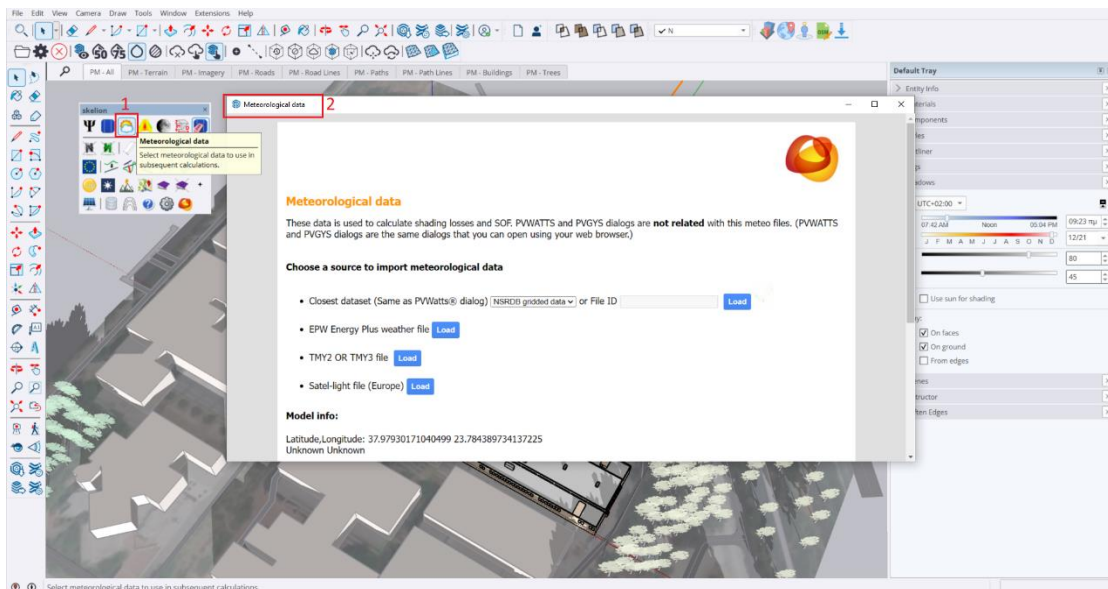


Εικόνα 57. Προβολή σκιών πάνω στις επιφάνειες της οροφής του κτιρίου N για το χρονικό διάστημα 09:23 - 15:23, την 21/12

## 5.2. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΙΔΑΝΙΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

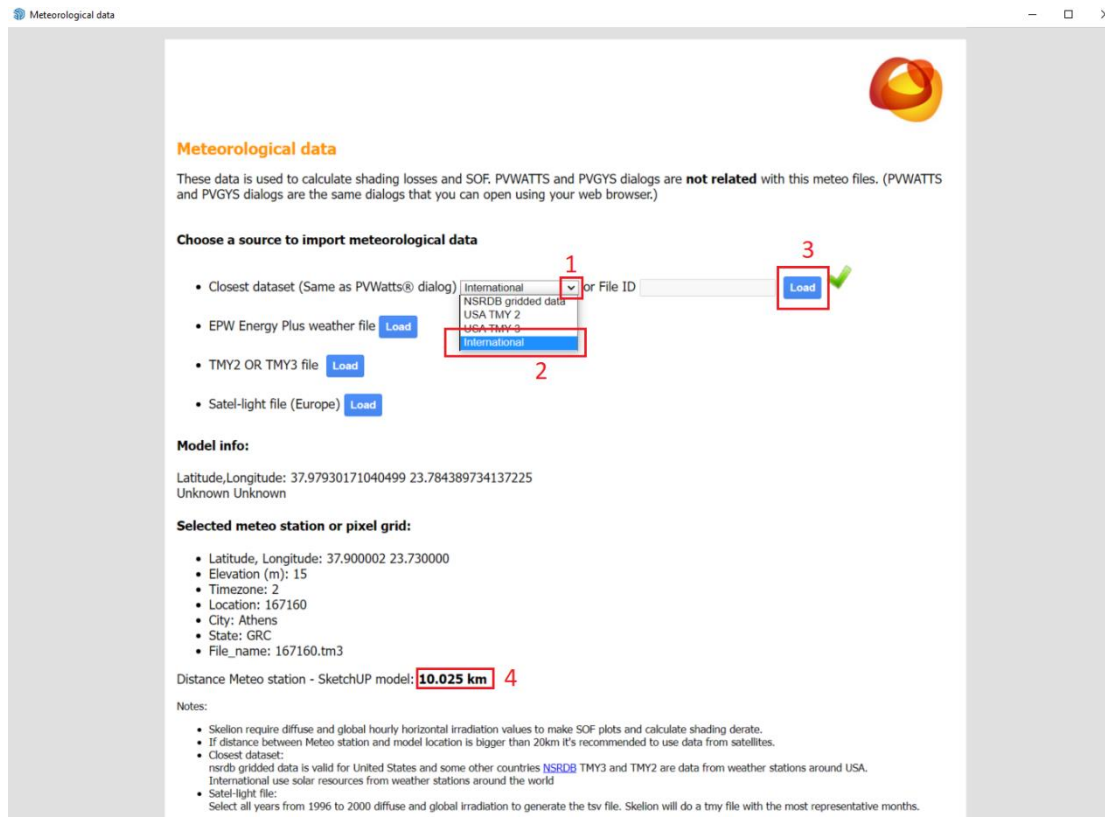
Εκτός από την σκίαση της επιφάνειας, η οποία θα επηρεάσει την συνολική διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαίσιων, σημαντικό ρόλο παίζουν και οι γωνίες τοποθέτησής τους, το αζιμούθιο και η κλίση τους. Το Skelion, προκειμένου να βοηθήσει τον χρήστη να κάνει τη βέλτιστη δυνατή επιλογή αυτών των γωνιών, ανάλογα με τις απαιτήσεις του, διαθέτει το εργαλείο “Optimum Orientation”, η χρήση του οποίου γίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία.

Αρχικά γίνεται εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων για την τοποθεσία του μοντέλου, σύμφωνα με την **Εικόνα 58**. Μετά την επιλογή του κατάλληλου εικονιδίου από την γραμμή εργαλείων του Skelion, όπως φαίνεται στην εικόνα, ο ορισμός των μετεωρολογικών δεδομένων μπορεί να γίνει είτε με την επιλογή κάποιας διαδικτυακής βάσης δεδομένων είτε με το ανέβασμα κάποιοι σχετικού αρχείου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αφού έγινε επιλογή της βάσης δεδομένων “International” όπως αποτυπώνεται στην **Εικόνα 59** και φόρτωση των δεδομένων αυτών, έγινε έλεγχος της απόστασης της τοποθεσίας του κτιρίου N από τον σταθμό που παρείχε τα δεδομένα. Σημειώνεται, ότι η επιλογή της βάσης δεδομένων “International” έγινε καθώς η συγκεκριμένη απόσταση ήταν πολύ μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες.



**Εικόνα 58.** Πρώτο βήμα εισαγωγής μετεωρολογικών δεδομένων

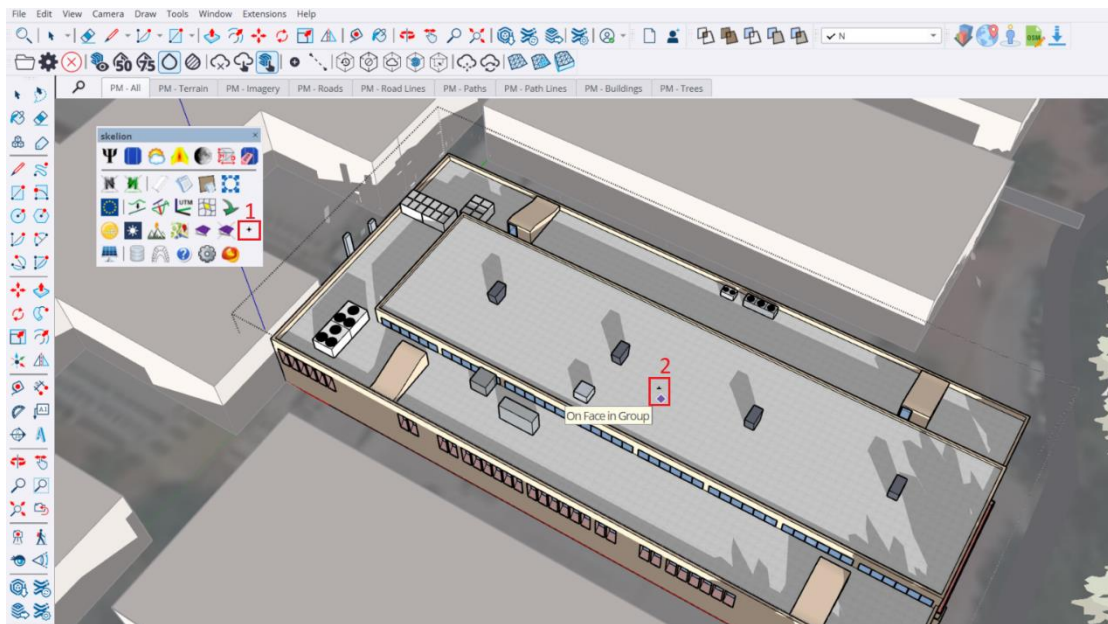




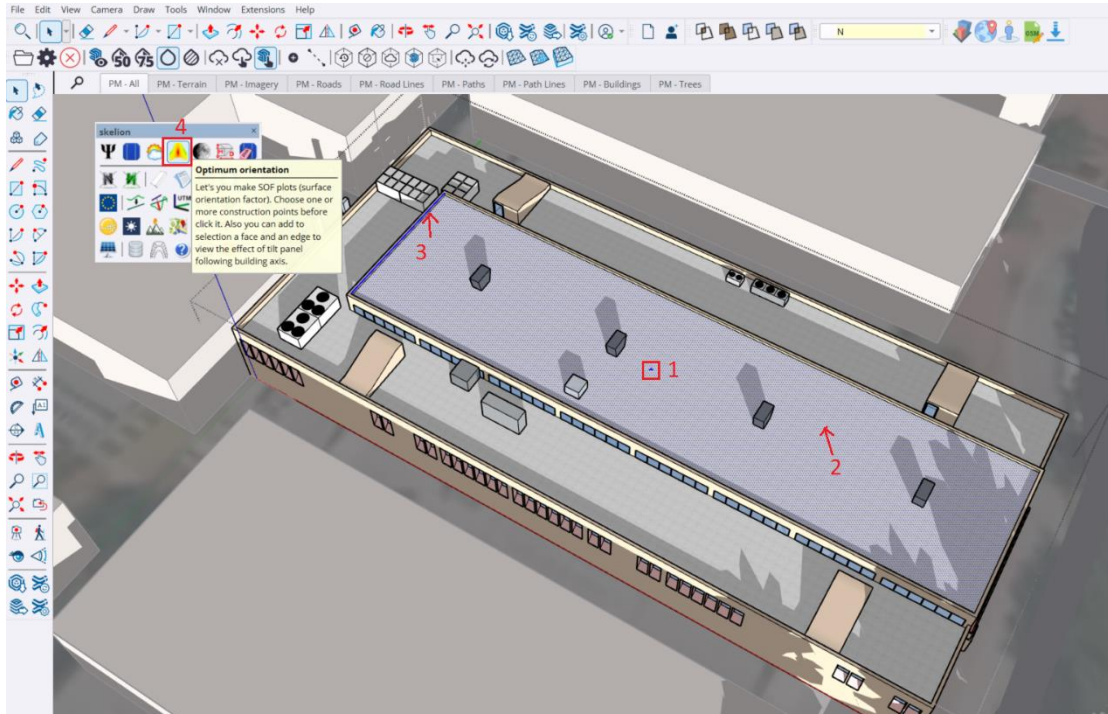
**Εικόνα 59.** Επιλογή βάσης δεδομένων και φόρτωση μετεωρολογικών δεδομένων

Στη συνέχεια είναι απαραίτητη η προσθήκη σημείου σχεδιασμού (“Construction point”) στην επιφάνεια της οποίας ο χρήστης επιθυμεί να βρει τη βέλτιστη κλίση και προσανατολισμό. Αυτό γίνεται σύμφωνα με την **Εικόνα 60**, με την χρήση του κατάλληλου εργαλείου από το Skelion. Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του σημείου αυτού, της επιφάνειας καθώς και μίας ακμής (η οποία είναι ενδεικτική του αζιμούθιου των πλαισίων) και στη συνέχεια η επιλογή του εργαλείου “Optimum Orientation” του Skelion, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 61**. Έπειτα ο χρήστης ορίζει την περίοδο του έτους για την οποία επιθυμεί το προς εγκατάσταση σύστημα φωτοβολταϊκών να έχει την μέγιστη απόδοση και δίνει στο σύστημα την εντολή να υπολογίσει τις ζητούμενες γωνίες, σύμφωνα με την **Εικόνα 62**. Η βέλτιστη κλίση και προσανατολισμός των πλαισίων εμφανίζονται στο παράθυρο των αποτελεσμάτων, μαζί με 2 διαγράμματα που αντιστοιχούν στον παράγοντα SOF (Surface Orientation Factor), όπως αποτυπώνονται στην **Εικόνα 63**. Ο παράγοντας SOF παίρνει τιμές από 0 έως 100, ανάλογα με την κλίση και των προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων μιας επιφάνειας, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν στην καλύτερη απόδοση των πλαισίων. Το πρώτο διάγραμμα που φαίνεται στην **Εικόνα 64**, εμφανίζει περιοχές με διαφορετικές τιμές του SOF ανάλογα την κλίση και τον προσανατολισμό, ενώ το δεύτερο που αποτυπώνεται στην **Εικόνα 65**, τις τιμές του SOF συναρτήσει μόνο της κλίσης (αν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετηθούν κατά μήκος της επιλεγμένης ακμής). Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για όλες τις

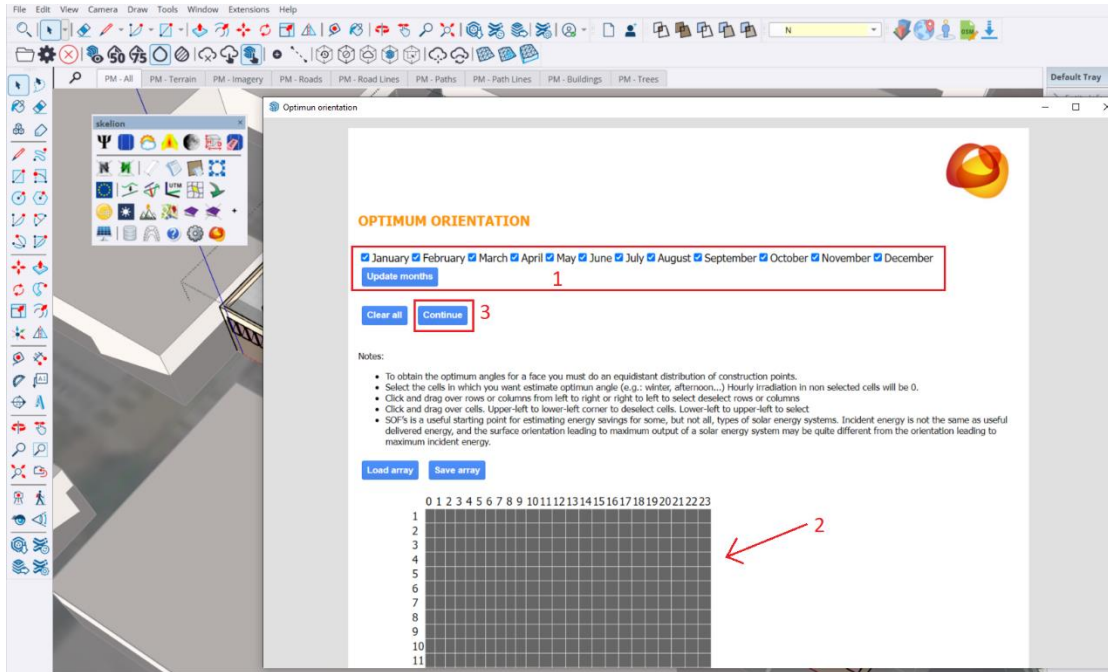
επιφάνειες στις οποίες θα τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, διαφορετικές σε κάθε σενάριο προσομοίωσης που ακολουθεί.



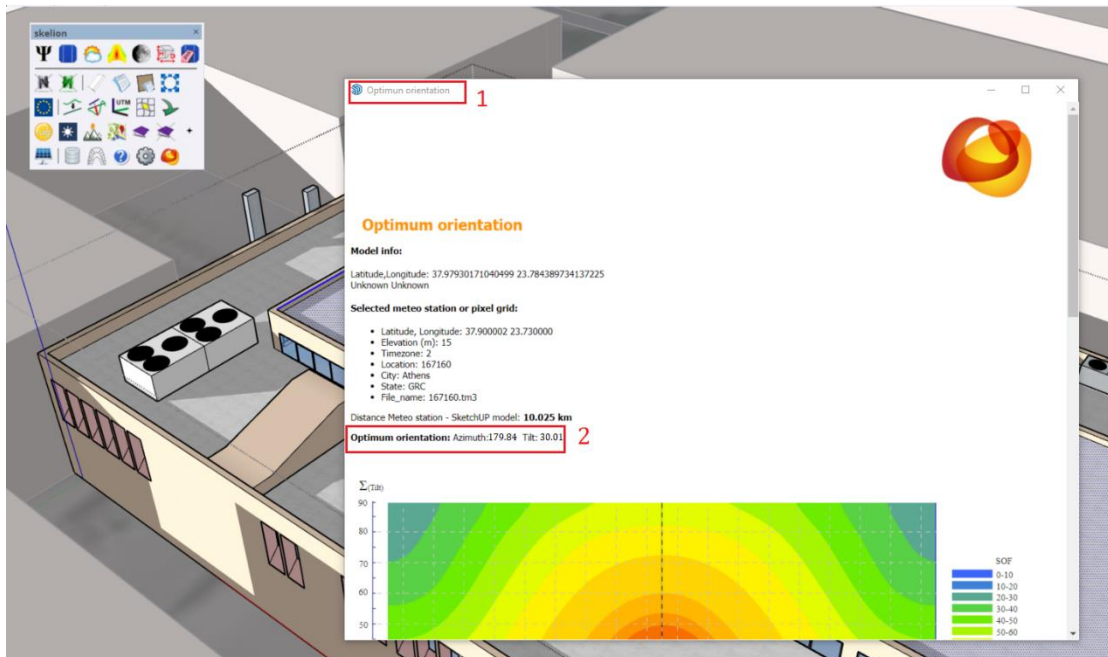
**Εικόνα 60.** Προσθήκη σημείου σχεδιασμού στην επιφάνεια της οροφής



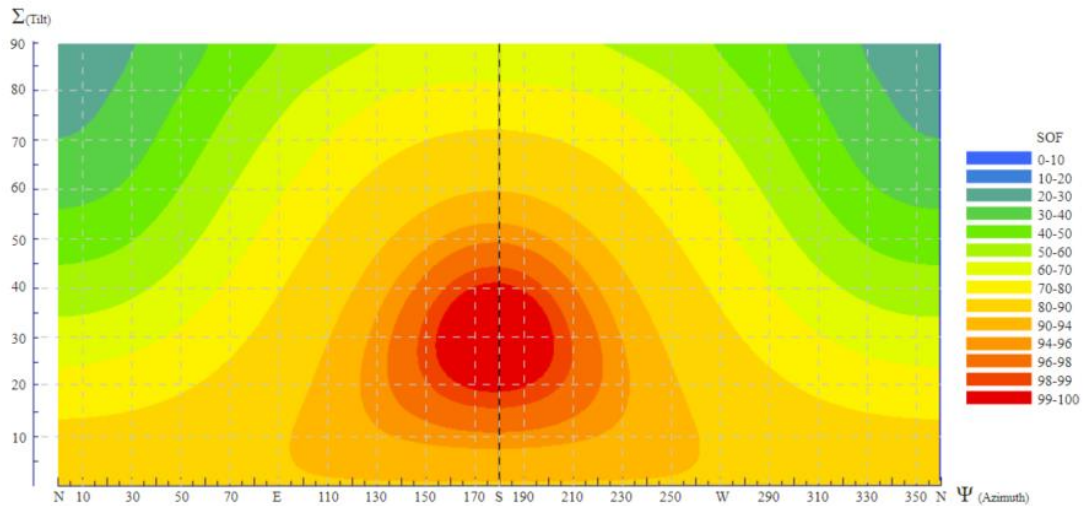
**Εικόνα 61.** Επιλογή επιφάνειας, ακμής και σημείου σχεδιασμού για το εργαλείο "Optimum orientation" του Skelion



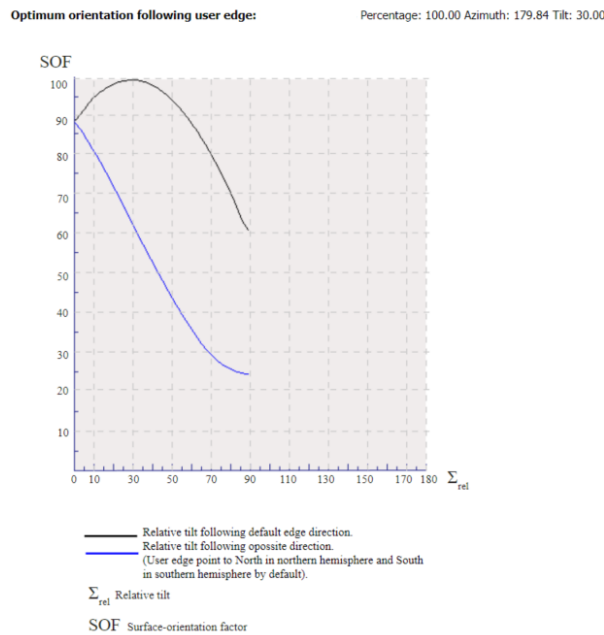
**Εικόνα 62.** Επιλογή μηνών καθώς και ωρών μέσα στη μέρα κάθε μήνα για υπολογισμό βέλτιστων γωνιών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων



**Εικόνα 63.** Παράθυρο αποτελεσμάτων και ιδανικές γωνίες τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων



**Εικόνα 64.** Διάγραμμα παράγοντα SOF συναρτήσει αζιμούθιου και γωνίας κλίσης πλαισίων στην επιλεγμένη επιφάνεια του κτιρίου



**Εικόνα 65.** Παράγοντας SOF συναρτήσει της κλίσης, στην περίπτωση που τα πλαίσια τοποθετηθούν κατά τον προσανατολισμό της επιλεγμένης ακμής

Παρατηρείται, ότι στην περίπτωση που τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετηθούν με προσανατολισμό σύμφωνο με την επιλεγμένη ακμή, τότε ο παράγοντας SOF για κλίση ίση με 30 μοίρες, θα πάρει τη μέγιστη δυνατή τιμή ίση με 100.

### 5.3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

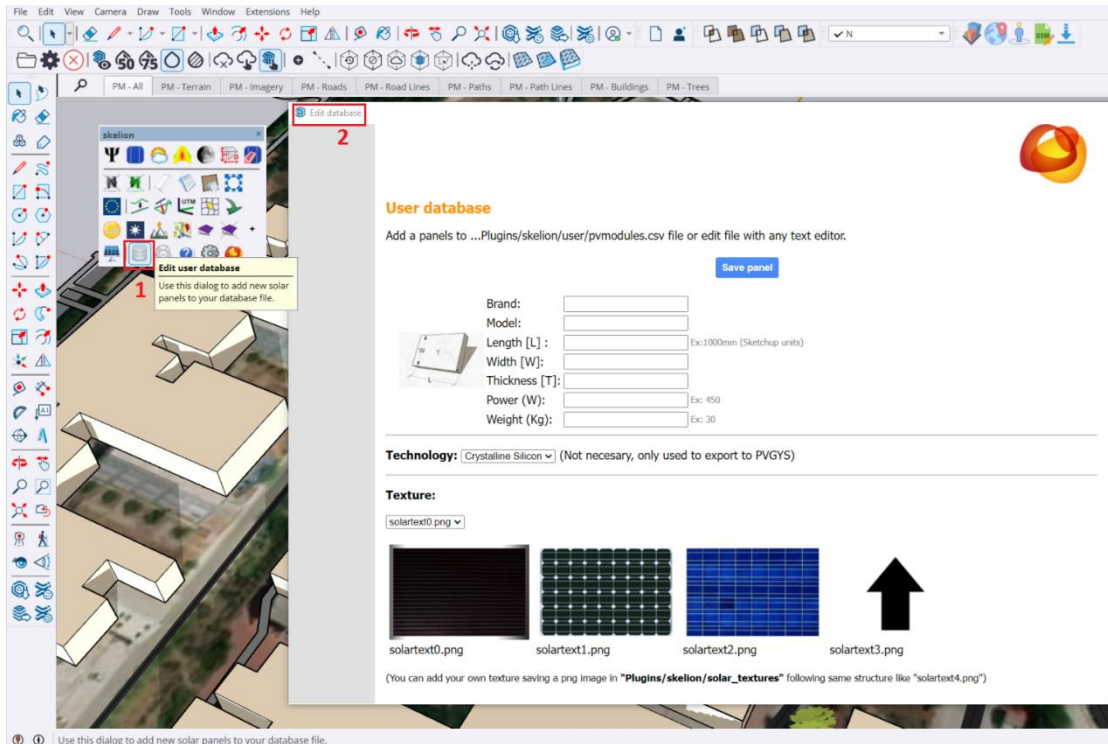
Παρόλο που το Skelion διαθέτει μια βάση δεδομένων με αρκετά φωτοβολταϊκά πλαίσια από αρκετές διαφορετικές εταιρείες ενσωματωμένα σε αυτή, δίνει τη δυνατότητα και στον χρήστη να προσθέσει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο της επιλογής του. Ύστερα από σχετική αναζήτηση στην βιβλιογραφία έγινε επιλογή τριών διαφορετικών πλαισίων [48], με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια, με τη σύγκριση της ενεργειακής παραγωγής τους να παρουσιάζεται στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης. Τα πλαίσια αυτά είναι το “SunPower M series SPR-M440-H-AC”, “Longi LR4-72HPH 455M” και “SunPower E Series Residential AC SPR-E20-327-D-AC”. Ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά τους αποτυπώνονται στον **Πίνακα 2** που ακολουθεί.

Χαρακτηριστικά	Τύπος πλαισίου		
	SunPower M series SPR-M440-H-AC	Longi LR4-72HPH 455M	SunPower E Series Residential AC SPR-E20-327-D-AC
Μήκος [mm]	1872	2094	1558
Πλάτος [mm]	1032	1038	1046
Πάχος [mm]	40	35	46
Ονομαστική Ισχύς [W]	440	455	327
Υλικό	Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο	Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο	Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο
Βάρος [Kg]	21.8	23.5	20.6
Βαθμός απόδοσης [%]	22.8	20.9	20.4
Κόστος [€]	190.6	147.5	167.7
Κόστος ανά εγκατεστημένη επιφάνεια [€/m <sup>2</sup> ]	98.7	67.9	102.9
Κόστος ανά εγκατεστημένη ισχύ [€/W]	0.43	0.32	0.51

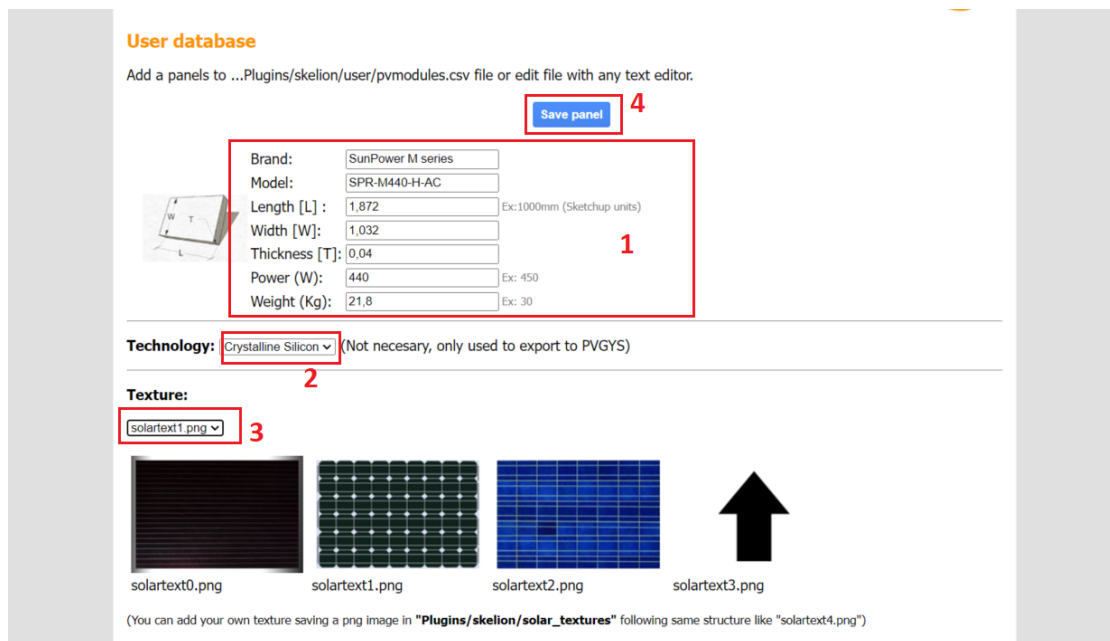
**Πίνακας 2.** Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων πλαισίων [48]

Για την εισαγωγή των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων στη βάση δεδομένων του Skelion, ο χρήστης επιλέγει αρχικά το κατάλληλο εικονίδιο από τη γραμμή εργαλείων του Skelion, σύμφωνα με την **Εικόνα 66**. Στο παράθυρο που εμφανίζεται, ορίζει τις παραμέτρους που απαιτούνται και αποθηκεύει το πλαίσιο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 67** (για το πλαίσιο “SunPower M series SPR-M440-H-AC”). Σημειώνεται

ότι η ίδια διαδικασία που αποτυπώνεται στις συγκεκριμένες εικόνες ακολουθείται και για την εισαγωγή και των 3 διαφορετικών φωτοβολταϊκών πλαισίων.



**Εικόνα 66.** Εμφάνιση παραθύρου για την εισαγωγή φωτοβολταϊκού πλαισίου με νέα χαρακτηριστικά στη βάση δεδομένων του Skelion



**Εικόνα 67.** Ορισμός παραμέτρων φωτοβολταϊκού πλαισίου προς εισαγωγή στη βάση δεδομένων

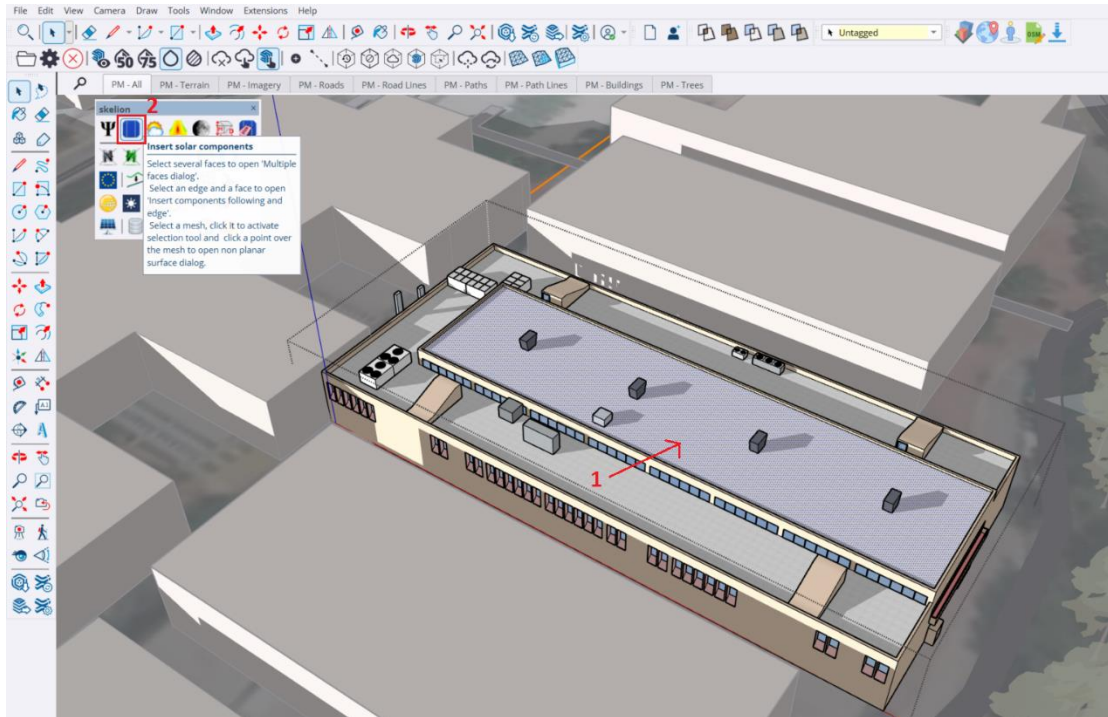
## 5.4. ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Ύστερα από την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του κτιρίου N αλλά και του γειτονικού του περιβάλλοντος, καθώς και τον ορισμό των υπόλοιπων απαραίτητων παραμέτρων, πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στα ακόλουθα κεφάλαια.

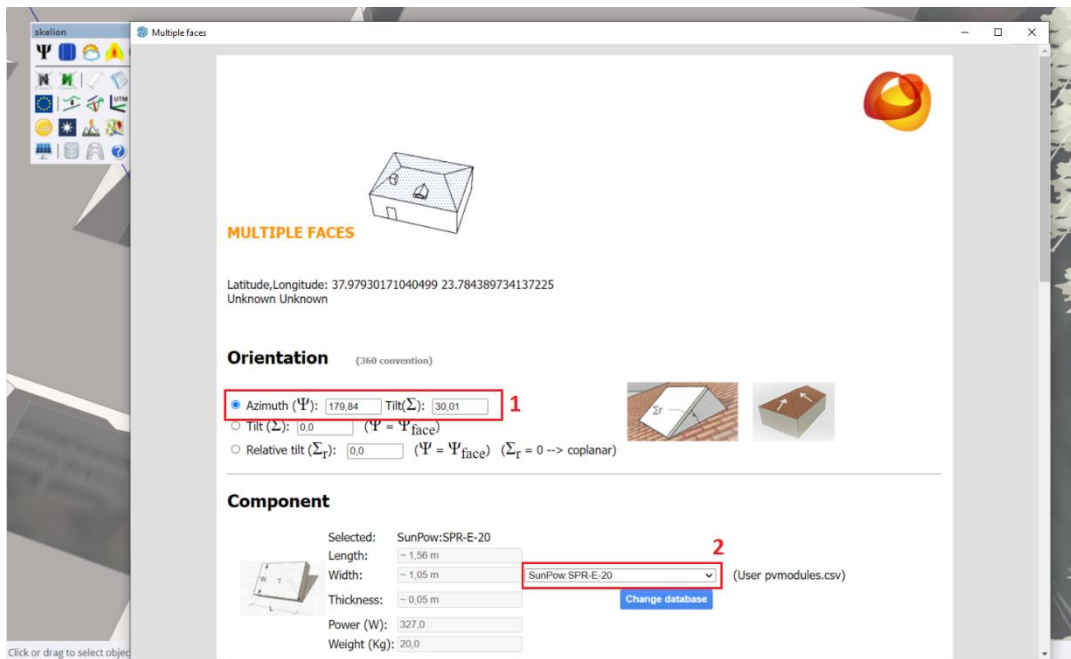
### 5.4.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Κατά το πρώτο σενάριο προσομοίωσης, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων που παρουσιάστηκαν στο **Κεφάλαιο 5.3**. Η σύγκριση αυτή έχει ως σκοπό να εξετάσει τη σχέση μεταξύ της ονομαστικής ισχύος και των διαστάσεων των πλαισίων, ως δύο ανταγωνιστικά μεταξύ τους χαρακτηριστικά. Για να γίνει αυτό, επιλέγεται μια συγκεκριμένη επιφάνεια, αυτή της υπερυψωμένης οροφής του κτιρίου N, και με τη βοήθεια του Skelion εισάγονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κάθε τύπου σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, ενώ στη συνέχεια συγκρίνεται η παραγόμενη ενέργεια κάθε μιας περίπτωσης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σύμφωνα με τα ακόλουθα βήματα.

Αρχικά γίνεται επιλογή της επιφάνειας στην οποία θα τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και στη συνέχεια επιλέγεται το αντίστοιχο εικονίδιο από την γραμμή εργαλείων του Skelion, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 68**. Στη συνέχεια, στο παράθυρο που εμφανίζεται ορίζονται παράμετροι σχετικά με τον προσανατολισμό, τον τύπο των πλαισίων που θα τοποθετηθούν, τον τρόπο τοποθέτησης και τα μεταξύ τους διάκενα σύμφωνα με τις **Εικόνες 69, 70 και 71**. Ο προσανατολισμός λαμβάνεται σύμφωνα με την ανάλυση που αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 5.2**, ενώ ο τύπος των πλαισίων επιλέγεται κάθε φορά ανάμεσα σε εκείνους που αναφέρθηκαν στο **Κεφάλαιο 5.3**. Σχετικά με τις αποστάσεις μεταξύ των πλαισίων, αυτές λαμβάνονται σύμφωνα με το λογισμικό, ενώ για το διάκενο μεταξύ τους, αυτό ορίζεται να λάβει υπόψη τη μέγιστη σκίαση στις 21 Δεκεμβρίου, 3 ώρες πριν ή μετά το ηλιακό μεσημέρι ( $\Delta=3.00$ ). Η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ολοκληρώνεται στη συνέχεια όπως αποτυπώνεται στην **Εικόνα 72**.

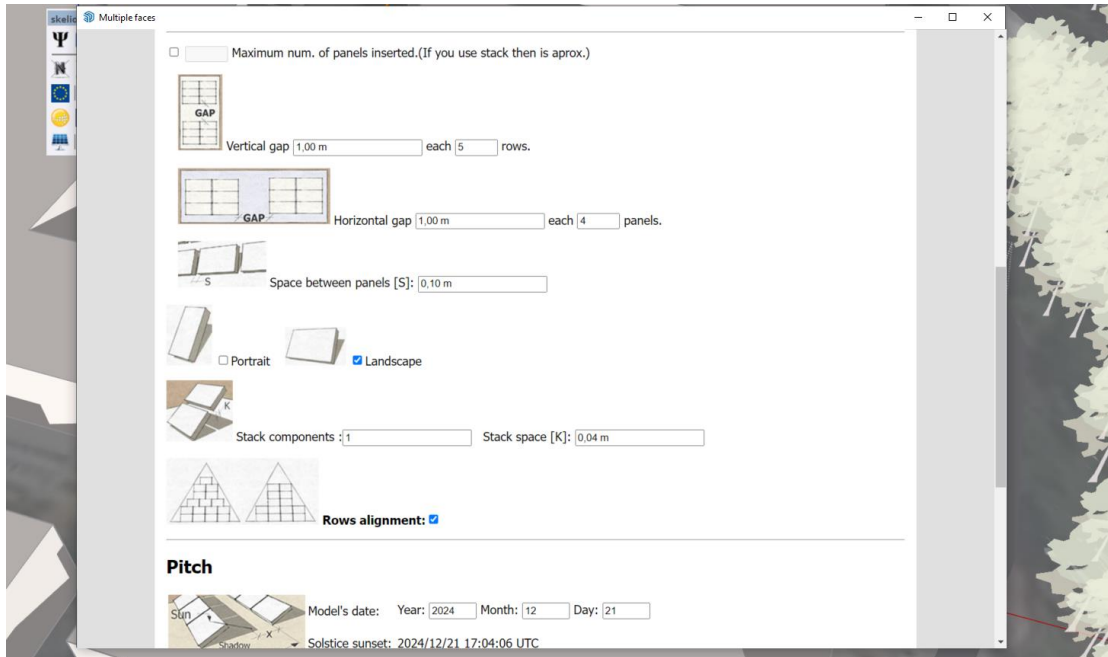


Εικόνα 68. Επιλογή επιφάνειας και εργαλείου για εισαγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων

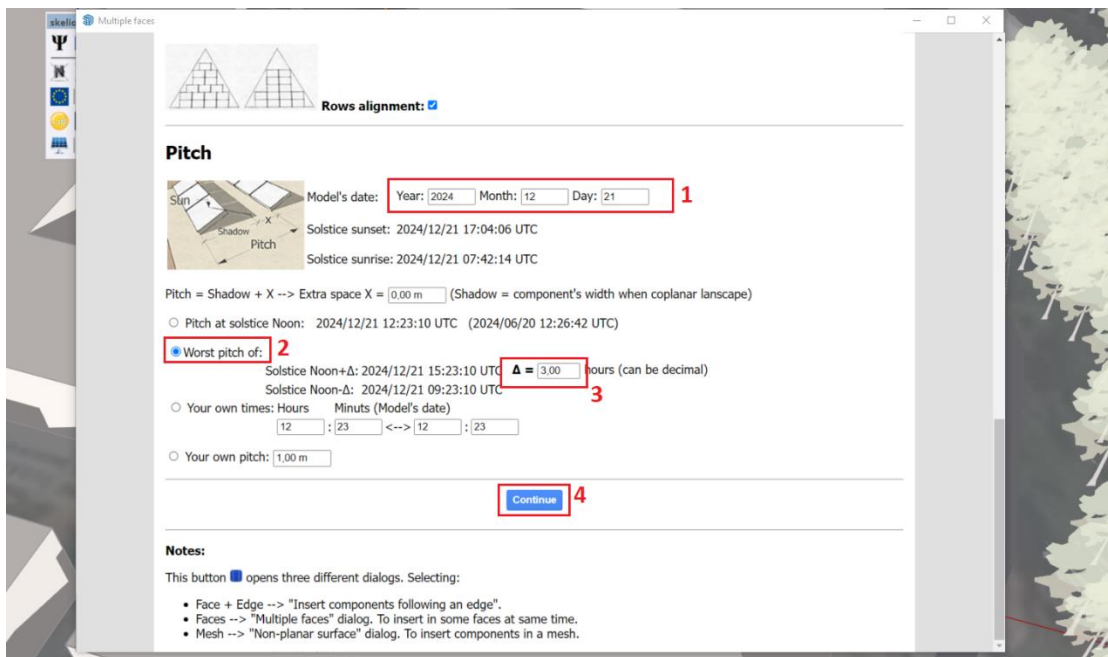


Εικόνα 69. Ορισμός αζιμούθιου, κλίσης και τύπου φωτοβολταϊκών πλαισίων





Εικόνα 70. Ορισμός παραμέτρων τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων

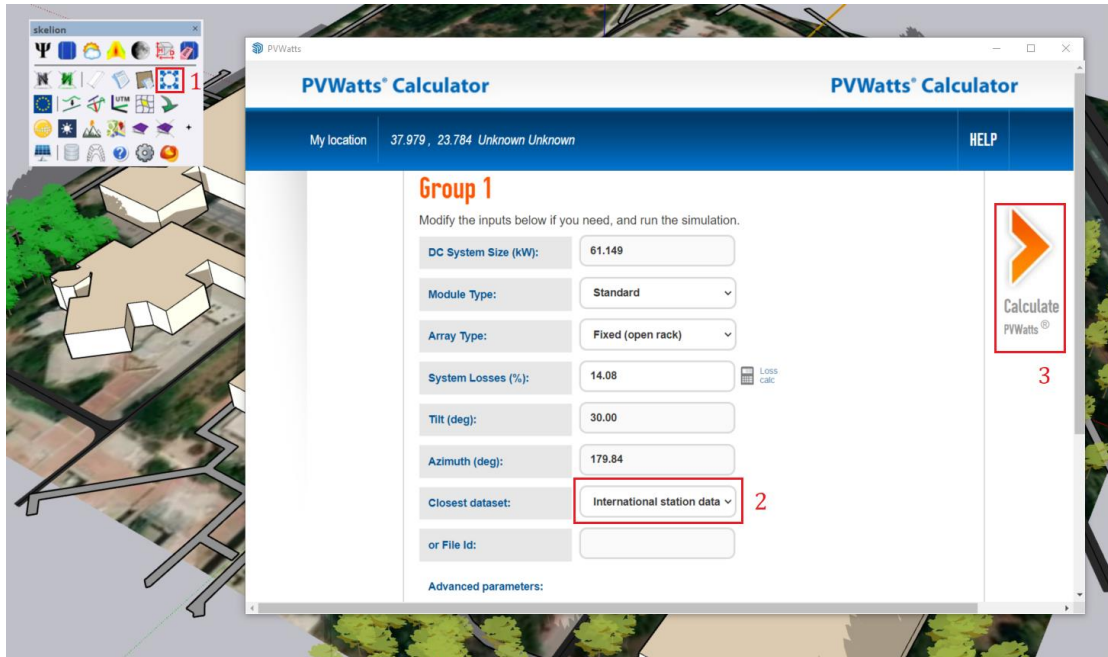


Εικόνα 71. Επιλογή παραμέτρων διάκενων, σύμφωνα με τη μέγιστη σκίαση




**Εικόνα 72.** Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων στην υπερυψωμένη οροφή του κτιρίου N

Ακολουθως, γίνεται επιλογή του εργαλείου “PVWatts report”, και στο παράθυρο που εμφανίζεται γίνεται έλεγχος των παραμέτρων και ορισμός της βάσης δεδομένων των μετεωρολογικών δεδομένων όπως φαίνεται στην **Εικόνα 73**. Στο παράθυρο των αποτελεσμάτων αναφέρονται τα μεγέθη που υπολογίζει το λογισμικό σύμφωνα με την **Εικόνα 74**. Σε αυτά περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων η συνολική εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή ενέργειας, καθώς και αναλυτικά σε κάθε μήνα, η μέση ημερήσια παραγωγή κάθε μήνα αλλά και οι παραγωγές ανά μονάδα επιφάνειας (εδώ  $m^2$ ). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τρεις φορές με τους διαφορετικούς τύπους των φωτοβολταϊκών πλαισίων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3**.



Εικόνα 73. Επιλογή εργαλείου "PVWatts report" και μετεωρολογικών δεδομένων



### Results

**Station and Model info**

Station or Grid	Lat	Lon	Elevation (m)	TZ	City	Country	Resource file
37.979302 23.784390	37.979302	23.784390	15.00	2.0	Athens	GRC	167160_lm3
Model	37.979302	23.784390	0,00	2,0	Unknown	Unknown	
Distance (km)	10,025						

**Faces analysis**

**Faces global results**

Solar panels	P <sub>nom</sub> (Wp)	P <sub>nom</sub> (kWp)	Weight (kg)	DC c. (kWp)	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)
SunPower E series-SPR-E20-327-D-AC	187 327,00	20,60	61,15	86495,43	1414,50	

**Results for solar modules in each face**

Face	Model	P <sub>nom</sub> (Wp)	DC c. (kWp)	Weight (kg)	Azimuth (deg)	Tilt (deg)	Relative tilt	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	ΣH <sub>m</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /year)
8	SunPower E series-SPR-E20-327-D-AC	187 327,00	61,15	3852,20	179,84	30,00	30,00	86495,43	1414,50	1820,59

**E<sub>g</sub> (kWh/day)**

Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	149,59	179,10	225,47	256,73	282,07	324,09	331,64	315,37	293,84	213,52	139,13	129,65
Σ	149,59	179,10	225,47	256,73	282,07	324,09	331,64	315,37	293,84	213,52	139,13	129,65

**E<sub>tot</sub> (kWh/month)**

Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	4637,29	5014,79	6989,53	7702,04	8744,27	9722,59	10280,94	9776,59	8815,23	6619,07	4173,79	4019,30
Σ	4637,29	5014,79	6989,53	7702,04	8744,27	9722,59	10280,94	9776,59	8815,23	6619,07	4173,79	4019,30

**H<sub>1</sub> (kWh/m<sup>2</sup>/day)**

Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	3,00	3,59	4,58	5,36	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62
Mean	3,00	3,59	4,58	5,36	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62

H <sub>2</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /month)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	92,90	100,56	141,99	160,65	185,37	210,06	223,55	213,37	189,31	138,05	86,03	81,34
Mean	92,90	100,56	141,99	160,65	185,37	210,06	223,55	213,37	189,31	138,05	86,03	81,34

Yearly average				
Face	E <sub>g</sub> (kWh/day)	E <sub>tot</sub> (kWh/month)	H <sub>1</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /day)	H <sub>2</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /month)
8	236,97	7207,95	4,99	151,72
Σ or Mean	236,97	7207,95	4,99	151,72

Εικόνα 74. Αποτελέσματα προσομοίωσης κατά την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων "SunPower E Series Residential AC SPR-E20-327-D-AC"

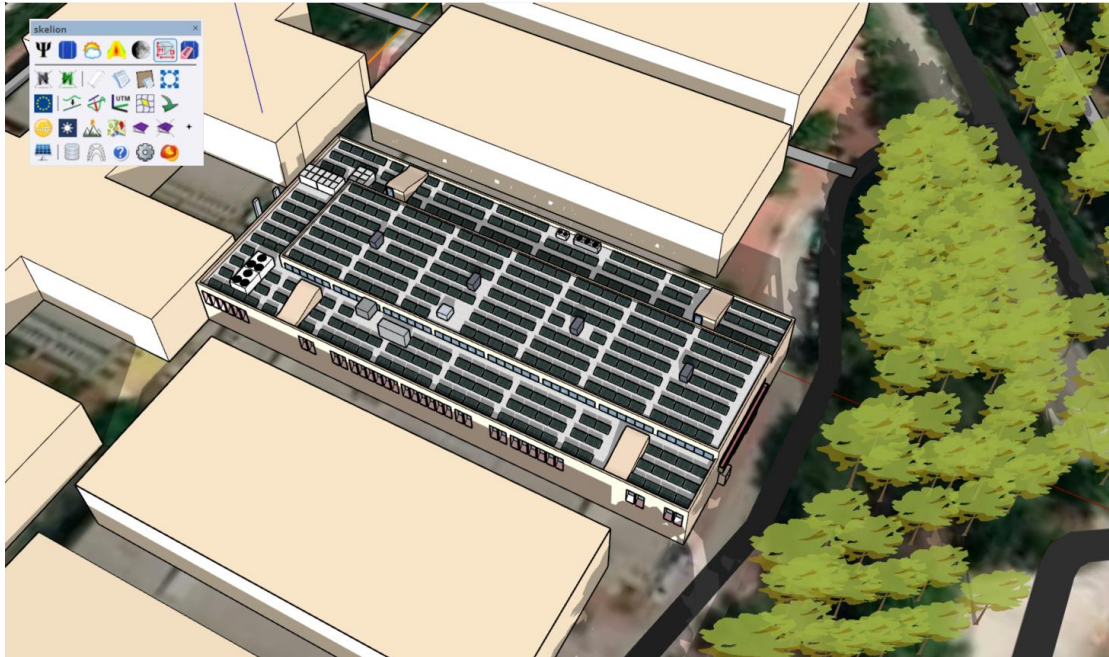
Μέγεθος	Αποτελέσματα		
Τύπος πλαισίου	SunPower M series SPR-M440-H-AC	Longi LR4-72HPH 455M	SunPower E Series Residential AC SPR-E20-327-D-AC
Εμβαδόν επιφάνειας κάθε πλαισίου [m <sup>2</sup> ]	1.93	2.17	1.63
Ονομαστική ισχύς πλαισίου [W]	440	455	327
Συνολικός αριθμός εγκατεστημένων πλαισίων	159	147	187
Συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια [kWh]	98657.07	94607.54	86495.43

**Πίνακας 3.** Σύγκριση αποτελεσμάτων εγκατάστασης των τριών διαφορετικών τύπων πλαισίων

Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η τοποθέτηση πλαισίων τύπου “SunPower M series SPR-M440-H-AC” είναι η βέλτιστη επιλογή καθώς στην ίδια επιφάνεια έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Στα ακόλουθα σενάρια γίνεται χρήση του συγκεκριμένου τύπου φωτοβολταϊκών πλαισίων.

#### 5.4.2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΤΗ ΣΤΕΓΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το επόμενο σενάριο προσομοίωσης είναι εκείνο της τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε όλη την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου N. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ο ορισμός των παραμέτρων, όπως αυτός παρουσιάστηκε στο προηγούμενο σενάριο προσομοίωσης, και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (τύπου “SunPower M series SPR-M440-H-AC”) τοποθετήθηκαν στο κτίριο όπως αποτυπώνεται στην **Εικόνα 75**. Με τη βοήθεια του εργαλείου “PVWatts report” λαμβάνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σύμφωνα με την **Εικόνα 76**, όπου παρατηρείται συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια ίση με περίπου 116 MWh για την κεντρική υπερυψωμένη οροφή και περίπου 106 MWh για την υπόλοιπη, ενώ ο συνολικός αριθμός πλαισίων είναι ίσος με 187 και 170 αντίστοιχα.



Εικόνα 75. Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων τύπου “ SunPower M series SPR-M440-H-AC” στην οροφή του κτιρίου N

**Faces analysis**

Faces global results						
Solar panels	N°P.	P. power (Wp)	R.weight (kg)	DC r. (kWp)	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)
SunPower M series:SPR-M440-H-AC	357	440,00	21,80	157,08	222130,85	1414,13

Results for solar modules in each face											
Face	Model	N°P.	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Weight (kg)	Azimuth	Tilt	Relative tilt	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	$\Sigma H_m$ (kWh/m <sup>2</sup> /year)
8	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	170	440,00	74,80	3706,00	179,84	30,00	30,00	105776,60	1414,13	1820,05
9	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	187	440,00	82,28	4076,60	179,84	30,00	30,00	116354,26	1414,13	1820,05

E <sub>d</sub> (kWh/day)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	182,76	219,02	275,78	314,03	345,02	396,40	405,64	385,75	359,41	261,16	170,10	158,26
9	201,04	240,92	303,36	345,43	379,52	436,04	446,21	424,32	395,35	287,28	187,11	174,09
$\Sigma$	383,81	459,94	579,15	659,46	724,54	832,45	851,85	810,07	754,76	548,44	357,21	332,35

E <sub>m</sub> (kWh/month)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	5665,70	6132,53	8549,30	9420,82	10695,59	11892,10	12574,97	11958,16	10782,29	8096,08	5102,93	4906,13
9	6232,27	6745,78	9404,23	10362,91	11765,15	13081,31	13832,46	13153,98	11860,52	8905,68	5613,22	5396,74
$\Sigma$	11897,96	12878,31	17953,53	19783,73	22460,75	24973,40	26407,43	25112,14	22642,82	17001,76	10716,15	10302,87

H <sub>d</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /day)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62
9	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62
Mean	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62

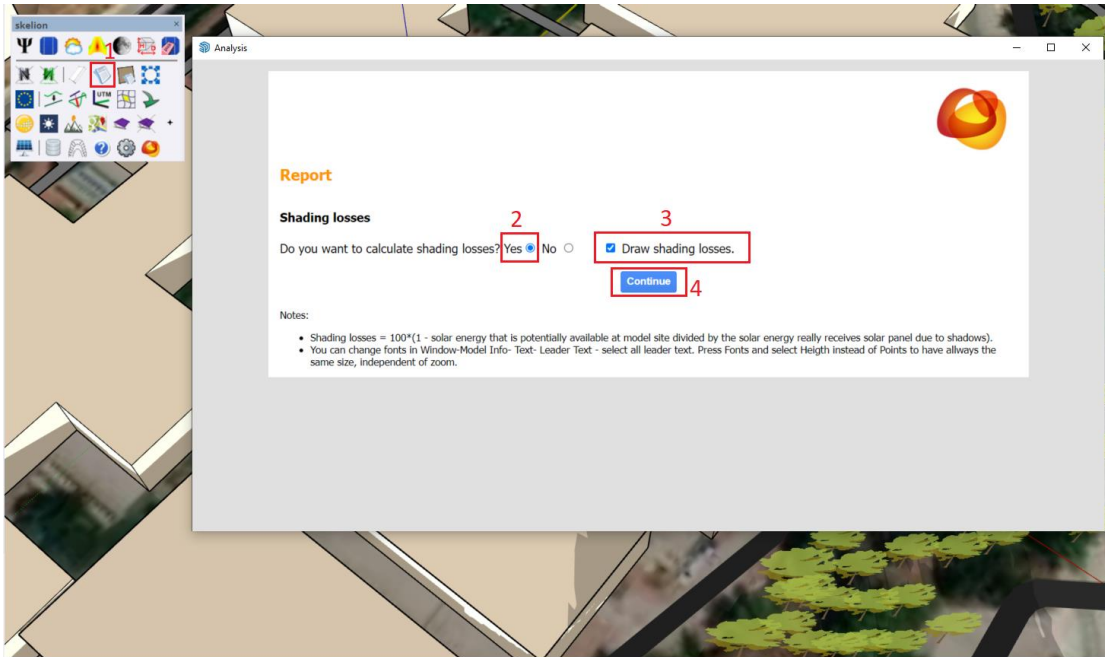
Εικόνα 76. Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή του κτιρίου N. (επιφάνεια 9 είναι η υπερυψωμένη οροφή του κτιρίου ενώ επιφάνεια 8 η υπόλοιπη)

Στη συνέχεια, με στόχο τη βελτιστοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος εξετάζεται το ενδεχόμενο αφαίρεσης πλαισίων με απώλειες σκίασης, σύμφωνα με

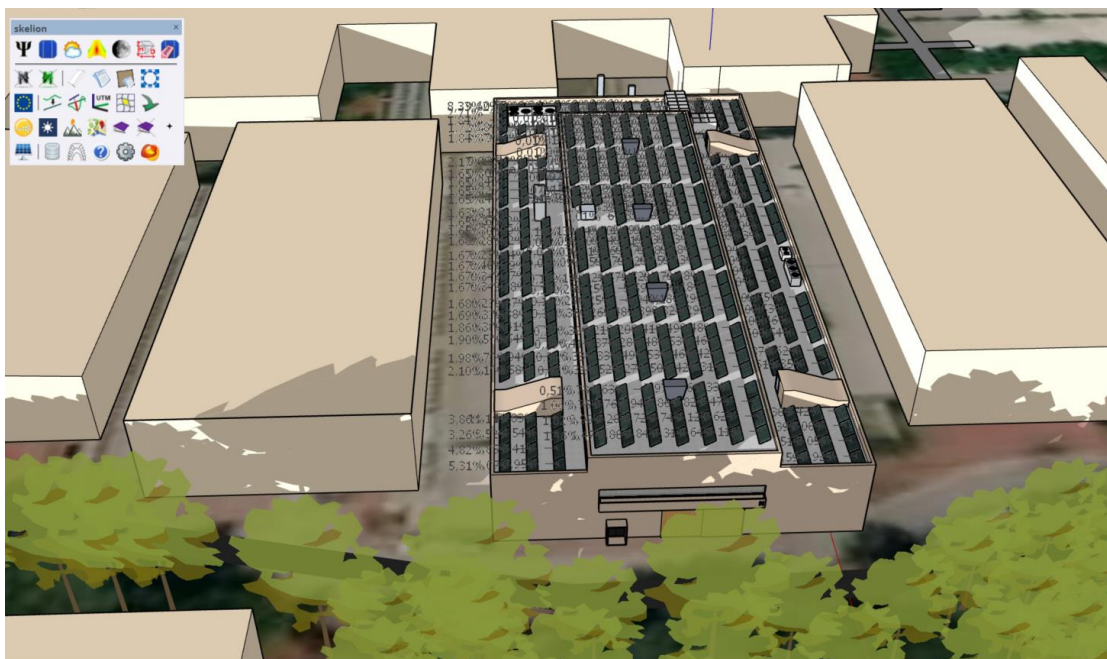
την ακόλουθη διαδικασία. Αφού γίνει επιλογή του εργαλείου “Report” από τα διαθέσιμα εργαλεία του Skelion, στη συνέχεια στο εμφανιζόμενο παράθυρο δίνεται η εντολή για υπολογισμό και σχεδίαση των απωλειών σκίασης σύμφωνα με την **Εικόνα 77**. Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού φαίνονται στην **Εικόνα 78**, όπου σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο αντιστοιχεί και ένα ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης. Έπειτα με τη χρήση του εργαλείου “Erase panels” ορίζεται ένα ποσοστό απωλειών σκίασης (εδώ αυτό είναι 10%) σύμφωνα με την **Εικόνα 79**, το οποίο όποια πλαίσια υπερβαίνουν θα διαγραφούν όπως φαίνεται στην **Εικόνα 80**. Το επόμενο βήμα είναι η εκ νέου προσομοίωση των εναπομεινάντων φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη χρήση του “PVWatts report”, της οποίας τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στην **Εικόνα 81**, με την συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια να είναι περίπου 116 MWh για την υπερυψωμένη κεντρική οροφή και περίπου 82 MWh για την υπόλοιπη, ενώ ο νέος αριθμός πλαισίων 187 και 131 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για την κεντρική υπερυψωμένη οροφή, τόσο ο αριθμός των πλαισίων όσο και η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια δεν επηρεάστηκαν, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος και δεν υπάρχουν τόσα εμπόδια να τη σκιάζουν. Αντίθετα στην υπόλοιπη οροφή παρατηρήθηκε μείωση περίπου 23% τόσο στον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όσο και στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για αφαίρεση πλαισίων με ποσοστά απωλειών σκίασης μεγαλύτερα από 8.5%, 7% και 5%, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4** για την υπερυψωμένη οροφή και στον **Πίνακα 5** για την υπόλοιπη. Επιπλέον στην **Εικόνα 82** παρουσιάζεται το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ανά εγκατεστημένη μονάδα επιφάνειας φωτοβολταϊκών πλαισίων, για όλη την οροφή του κτιρίου N.

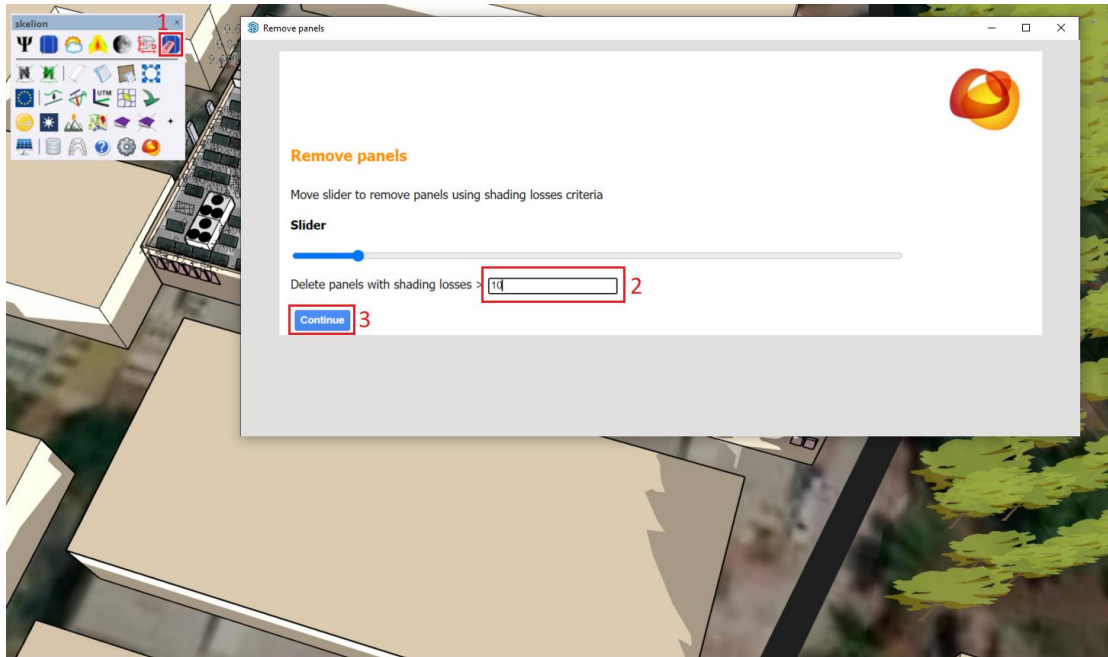
Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρείται ότι η αφαίρεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες λόγω σκίασης μεγαλύτερες του 10% επηρέασε σημαντικά την παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, ενώ η περαιτέρω μείωση του μέγιστου επιτρεπόμενου ποσοστού απωλειών μπορεί να είχε θετική επίδραση αλλά σε μικρότερο βαθμό. Η σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων αυτών ολοκληρώνεται στο Κεφάλαιο 6, όπου παρουσιάζεται και η οικονομική ανάλυση τους.



**Εικόνα 77.** Επιλογή εργαλείου για υπολογισμό και σχεδίαση απωλειών λόγω σκίασης



**Εικόνα 78.** Αποτελέσματα σχεδίασης απωλειών λόγω σκίασης



**Εικόνα 79.** Επιλογή εργαλείου "Erase panels" και ορισμός ελάχιστου επιτρεπτού ποσοστού απωλειών σκίασης



**Εικόνα 80.** Αφαίρεση φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες λόγω σκίασης πάνω από 10% (ενδεικτικά σημειώνονται κάποια με κόκκινα βέλη)



## Faces analysis

Faces global results												
Solar panels	N°P	P. power (Wp)	P.weight (kg)	DC r. (kWp)	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	Shading L. (%)					
SunPower M series:SPR-M440-H-AC	319	440,00	21,80	140,36	202420,25	1442,15	1,10					
Results for solar modules in each face												
Face	Model	N°P	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Weight (kg)	Azimuth	Tilt	Relative tilt	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	$\Sigma H_m$ (kWh/m <sup>2</sup> /year)	Shading L. (%)
8	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	132	440,00	58,08	2877,60	179,84	30,00	30,00	83760,11	1442,15	1820,07	1,85
9	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	187	440,00	82,28	4076,60	179,84	30,00	30,00	116354,26	1414,13	1820,05	0,57
Monthly Shading Losses (%)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	7,75	2,63	1,63	0,88	0,45	0,47	0,46	0,67	1,19	1,63	4,40	9,31
9	2,20	1,21	0,36	0,27	0,18	0,13	0,19	0,23	0,30	0,76	1,41	2,29
Mean	4,97	1,92	0,99	0,58	0,32	0,30	0,32	0,45	0,75	1,19	2,91	5,80
$E_d$ (kWh/day)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	144,73	173,44	218,38	248,67	273,20	313,89	321,20	305,44	284,59	206,81	134,71	125,33
9	205,04	245,71	309,38	352,28	387,04	444,67	455,03	432,71	403,17	292,97	190,84	177,56
$\Sigma$	349,77	419,15	527,76	600,94	660,24	758,56	776,23	738,16	687,76	499,78	325,54	302,89
$E_m$ (kWh/month)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	4486,70	4856,34	6769,88	7459,99	8469,31	9416,63	9957,21	9468,78	8537,72	6410,96	4041,22	3885,37
9	6356,16	6879,81	9590,66	10568,32	11998,19	13340,22	14106,05	13414,11	12095,10	9082,19	5725,07	5504,27
$\Sigma$	10842,86	11736,15	16360,53	18028,31	20467,51	22756,85	24063,26	22882,89	20632,82	15493,14	9766,29	9389,64

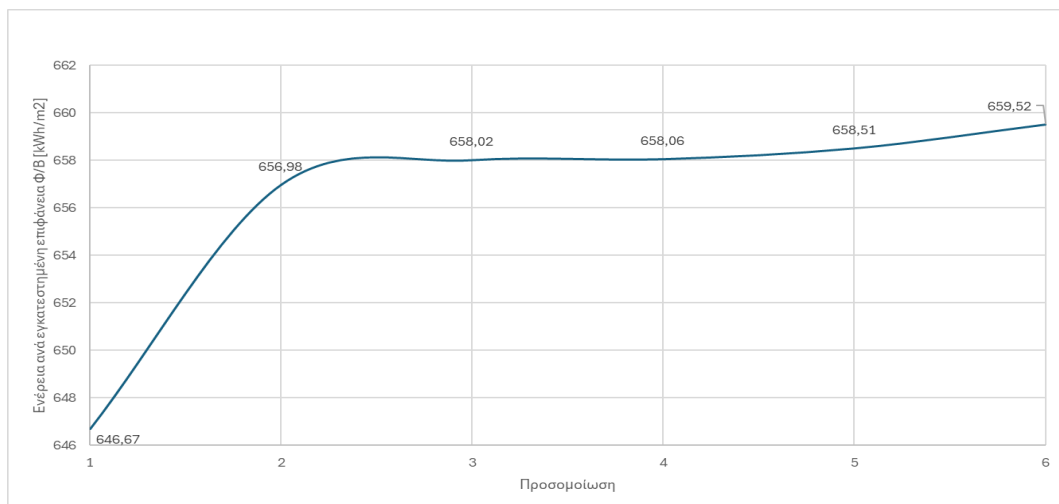
**Εικόνα 81.** Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά την απομάκρυνση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες λόγω σκίασης μεγαλύτερες από 10%

Προσομοίωση	Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης [%]	Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	Ετήσια παραγόμενη ενέργεια [MWh]	Ενέργεια ανά εγκατεστημένη επιφάνεια φωτοβολταϊκών πλαισίων [kWh/m <sup>2</sup> ]
1	100	187	116.36	323.32
2	10	187	116.36	328.20
3	8.5	185	115.47	329.00
4	7	184	114.85	329.04
5	5	182	113.68	329.33
6	4	180	112.56	329.76

**Πίνακας 4.** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για την υπερυψωμένη οροφή του κτιρίου N, μετά την απομάκρυνση φωτοβολταϊκών πλαισίων με διαφορετικό κάθε φορά μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης

Προσομοίωση	Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης [%]	Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	Ετήσια παραγόμενη ενέργεια [MWh]	Ενέργεια ανά εγκατεστημένη επιφάνεια φωτοβολταϊκών πλαισίων [kWh/m <sup>2</sup> ]
1	100	170	105.78	323.35
2	10	132	83.76	328.78
3	8.5	124	78.74	329.02
4	7	124	78.74	329.02
5	5	122	77.51	329.19
6	4	112	71.28	329.76

**Πίνακας 5.** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για την υπόλοιπη οροφή του κτιρίου N, μετά την απομάκρυνση φωτοβολταϊκών πλαισίων με διαφορετικό κάθε φορά μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης

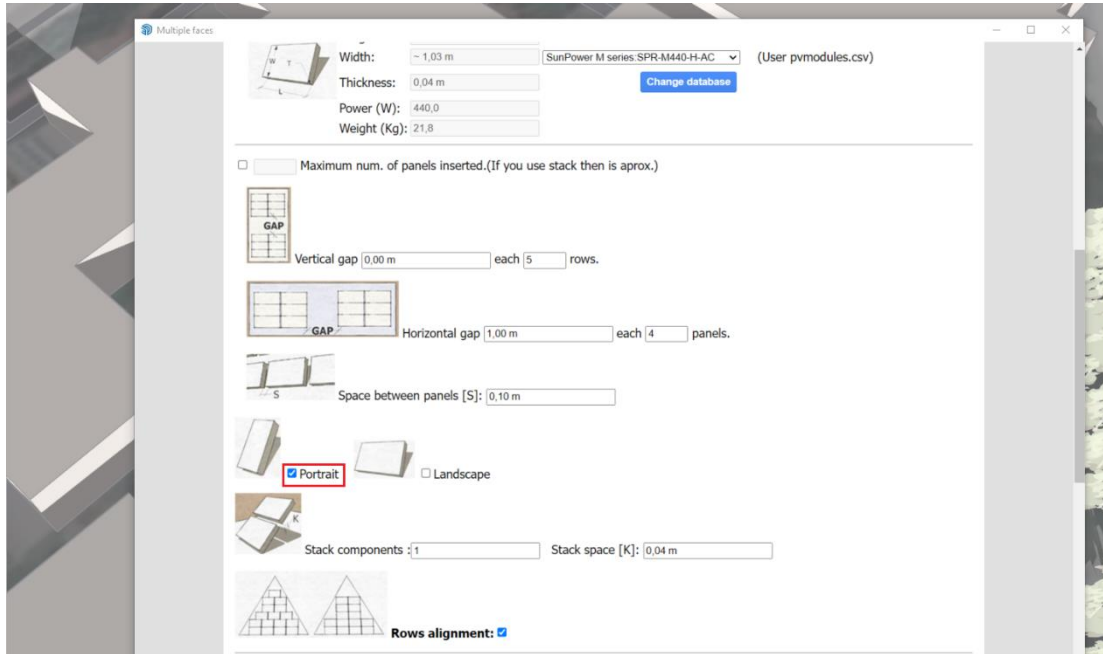


**Εικόνα 82.** Διάγραμμα ενέργειας ανά εγκατεστημένη επιφάνεια φωτοβολταϊκών πλαισίων για όλη την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου N, σε κάθε προσομοίωση

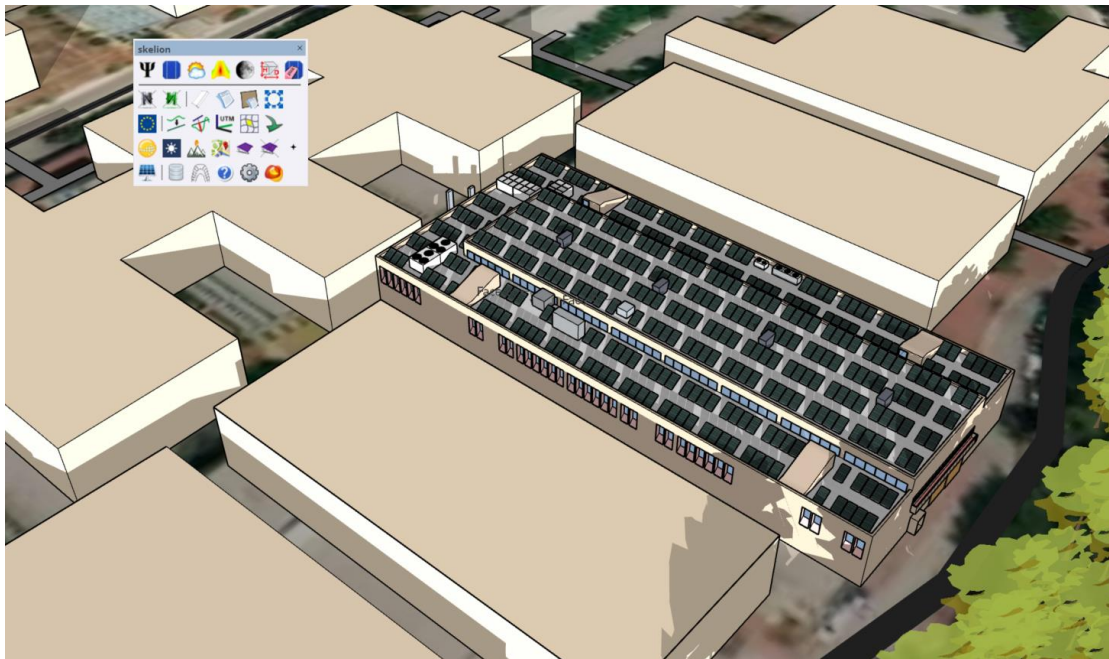
### 5.4.3. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Παράλληλα, ένας άλλος παράγοντας που εξετάζεται είναι αυτός της αλλαγής του τρόπου τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ενώ στις παραπάνω περιπτώσεις τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνταν με τη μεγαλύτερή τους διάσταση να ακουμπά την οροφή του κτιρίου, στην περίπτωση αυτή εξετάστηκε η επιλογή της τοποθέτησης “Portrait”, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 83**, όπου τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται με την μικρότερη σε διάσταση πλευρά να συνδέεται με την οροφή. Η τοποθέτηση των πλαισίων με τον συγκεκριμένο τρόπο αποτυπώνεται στην **Εικόνα 84**, ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη χρήση

του “PVWatts report” παρουσιάζονται στην **Εικόνα 85**, με τη συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια να είναι ίση με περίπου 113 MWh για την κεντρική υπερυψωμένη οροφή και περίπου 114 MWh για την υπόλοιπη, ενώ ο συνολικός αριθμός πλαισίων είναι ίσος με 182 και 184 αντίστοιχα.



**Εικόνα 83.** Επιλογή τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη μικρότερη σε διάσταση πλευρά τους να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου



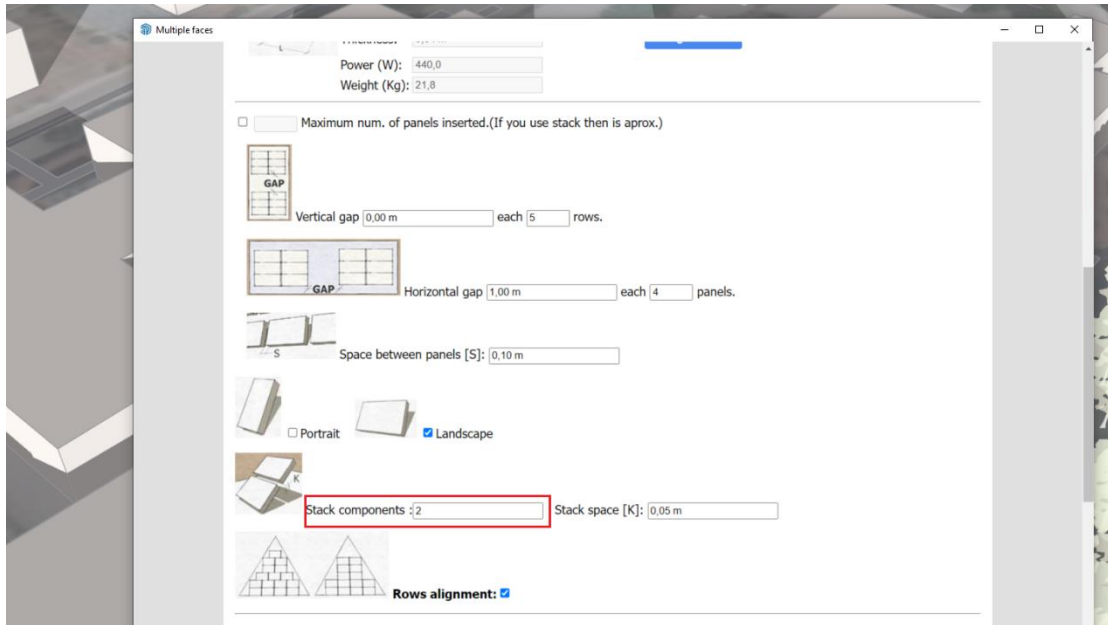
**Εικόνα 84.** Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη μικρότερη σε διάσταση πλευρά τους να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου N

## Faces analysis

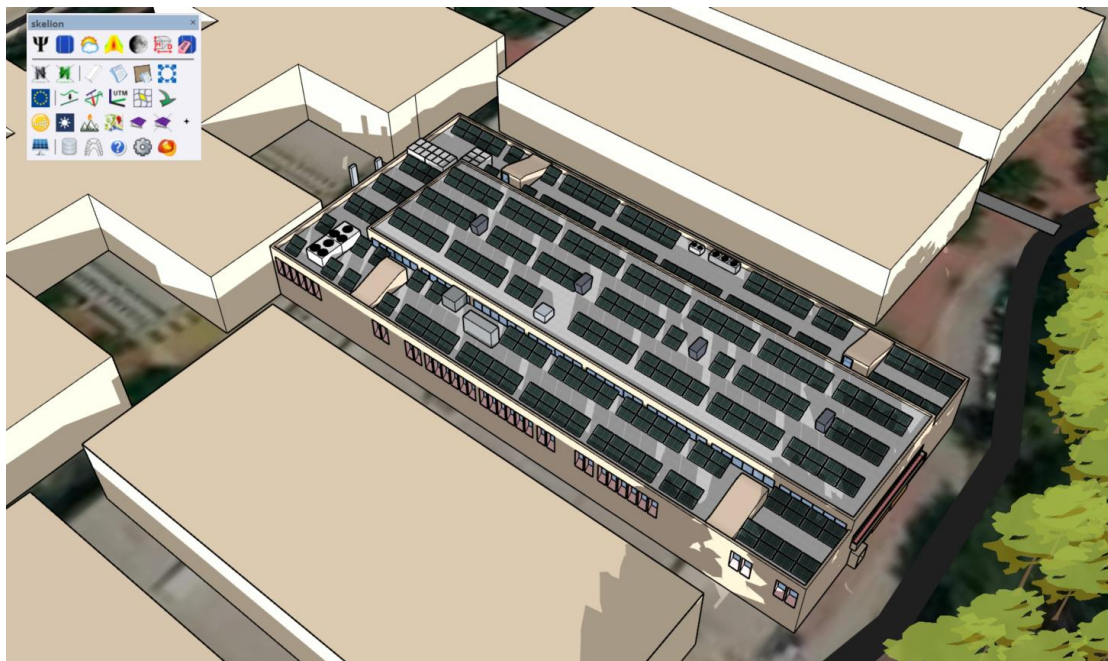
Faces global results												
Solar panels		N°P.	P. power (Wp)	P.weight (kg)	DC r. (kWp)	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)					
SunPower M series:SPR-M440-H-AC		366	440,00	21,80	161,04	227730,79	1414,13					
Results for solar modules in each face												
Face	Model	N°P.	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Weight (kg)	Azimuth	Tilt	Relative tilt	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	ΣH <sub>m</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /year)	
8	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	184	440,00	80,96	4011,20	179,84	30,00	30,00	114487,61	1414,13	1820,05	
9	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	182	440,00	80,08	3967,60	179,84	30,00	30,00	113243,18	1414,13	1820,05	
E <sub>d</sub> (kWh/day)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	197,82	237,06	298,50	339,89	373,43	429,05	439,05	417,51	389,01	282,67	184,11	171,30
9	195,67	234,48	295,25	336,19	369,37	424,38	434,28	412,98	384,78	279,60	182,10	169,43
Σ	393,48	471,53	593,75	676,08	742,81	853,43	873,33	830,49	773,79	562,27	366,21	340,73
E <sub>m</sub> (kWh/month)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	6132,28	6637,56	9253,36	10196,66	11576,41	12871,45	13610,55	12942,95	11670,25	8762,81	5523,17	5310,16
9	6065,63	6565,41	9152,78	10085,82	11450,58	12731,54	13462,61	12802,27	11543,40	8667,56	5463,14	5252,44
Σ	12197,91	13202,98	18406,14	20282,48	23026,99	25602,98	27073,16	25745,22	23213,64	17430,38	10986,31	10562,61
H <sub>d</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /day)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62
9	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62
Mean	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62

**Εικόνα 85.** Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη μικρότερη σε διάσταση πλευρά τους να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου

Εκτός αυτών, έγινε μελέτη και της τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στοιβαγμένα ανά 2 σύμφωνα με την **Εικόνα 86**. Η τελική τοποθέτησή τους στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στην **Εικόνα 87**, ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη χρήση του “PVWatts report” παρουσιάζονται στην **Εικόνα 88**, με τη συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια να είναι ίση με περίπου 96 MWh για την κεντρική υπερυψωμένη οροφή και περίπου 131 MWh για την υπόλοιπη, ενώ ο συνολικός αριθμός πλαισίων είναι ίσος με 154 και 210 αντίστοιχα. Με τον συγκεκριμένο δηλαδή τρόπο τοποθέτησης των πλαισίων, υπάρχει αισθητή μείωση της παραγόμενης ενέργειας από την κεντρική υπερυψωμένη οροφή, ωστόσο παρατηρείται σημαντική αύξηση σε αυτήν που παράγεται από την υπόλοιπη οροφή του κτιρίου N.



**Εικόνα 86.** Επιλογή τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων στοιβαγμένα ανά 2



**Εικόνα 87.** Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων στοιβαγμένα ανά 2 στην οροφή του κτιρίου N

## Faces analysis

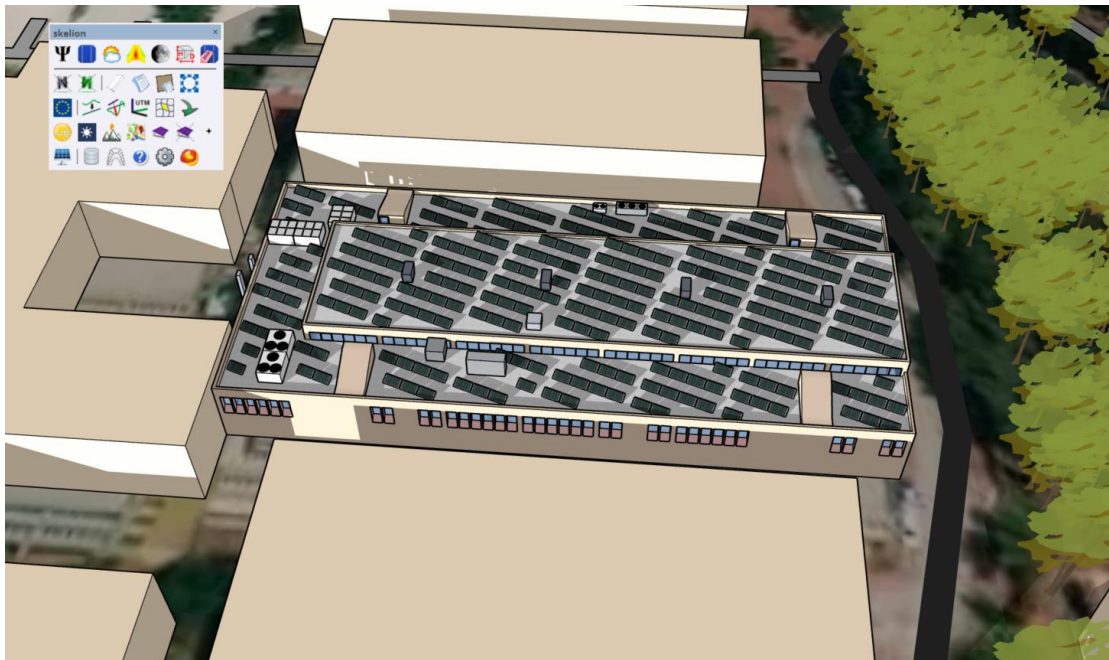
Faces global results												
Solar panels	N°P.	P. power (Wp)	P.weight (kg)	DC r. (kWp)	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)						
SunPower M series:SPR-M440-H-AC	364	440,00	21,80	160,16	226486,36	1414,13						
Results for solar modules in each face												
Face	Model	N°P.	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Weight (kg)	Azimuth	Tilt	Relative tilt	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	$\Sigma H_m$ (kWh/m <sup>2</sup> /year)	
8	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	210	440,00	92,40	4578,00	179,84	30,00	30,00	130665,21	1414,13	1820,05	
9	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	154	440,00	67,76	3357,20	179,84	30,00	30,00	95821,15	1414,13	1820,05	
$E_g$ (kWh/day)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	225,77	270,55	340,67	387,92	426,20	489,67	501,09	476,51	443,98	322,61	210,12	195,50
9	165,56	198,41	249,83	284,47	312,55	359,09	367,47	349,44	325,58	236,58	154,09	143,37
$\Sigma$	391,33	468,96	590,50	672,39	738,75	848,77	868,56	825,95	769,56	559,20	364,21	338,87
$E_m$ (kWh/month)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	6998,80	7575,48	10560,90	11637,49	13212,21	14690,24	15533,78	14771,85	13319,30	10001,04	6303,62	6060,51
9	5132,45	5555,35	7744,66	8534,16	9688,95	10772,84	11391,44	10832,69	9767,49	7334,09	4622,65	4444,38
$\Sigma$	12131,25	13130,83	18305,56	20171,64	22901,16	25463,08	26925,22	25604,53	23086,79	17335,13	10926,28	10504,89
$H_d$ (kWh/m <sup>2</sup> /day)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62
9	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62
Mean	2,99	3,59	4,58	5,35	5,98	7,00	7,21	6,88	6,31	4,45	2,87	2,62

**Εικόνα 88.** Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων στοιβαγμένων ανά 2 στην επιφάνεια της οροφής του κτιρίου N

#### 5.4.4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΠΡΟΣ ΤΑ ΔΥΤΙΚΑ

Το επόμενο σενάριο προσομοίωσης φωτοβολταϊκού συστήματος, ήταν αυτό της τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων με προσανατολισμό προς τη δύση. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια, καθώς μπορεί με τον τρόπο αυτό η συνολική παραγωγή του συστήματος να είναι μειωμένη, ωστόσο αυξάνεται η παραγωγή μετά το μεσημέρι και μέχρι τη δύση του ήλιου, τις ώρες δηλαδή που είναι και μεγαλύτερη η ενεργειακή ζήτηση [49]. Επίσης τις ώρες μετά το μεσημέρι είναι μεγαλύτερη και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που δείχνει ότι υπάρχει και η δυνατότητα για εξισορρόπηση των οικονομικών απωλειών λόγω της μειωμένης συνολικής παραγωγής.

Έτσι, για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, έγινε τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με προσανατολισμό 20 μοίρες προς τα δυτικά (αζιμούθιο ίσο με 200 μοίρες), όπως αποτυπώνεται στην **Εικόνα 89**. Στη συνέχεια, με τη χρήση του εργαλείου “PVWatts report” υπολογίστηκαν τα αποτελέσματα τα οποία αποτυπώνονται στην **Εικόνα 90**, με τη συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια να είναι ίση με περίπου 86 MWh για την κεντρική υπερυψωμένη οροφή και περίπου 79 MWh για την υπόλοιπη, ενώ ο συνολικός αριθμός πλαισίων είναι ίσος με 141 και 130 αντίστοιχα.



Εικόνα 89. Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων με προσανατολισμό 20 μοίρες προς τα δυτικά (αζιμούθιο ίσο με 200 μοίρες στο Skelion)

### Faces analysis

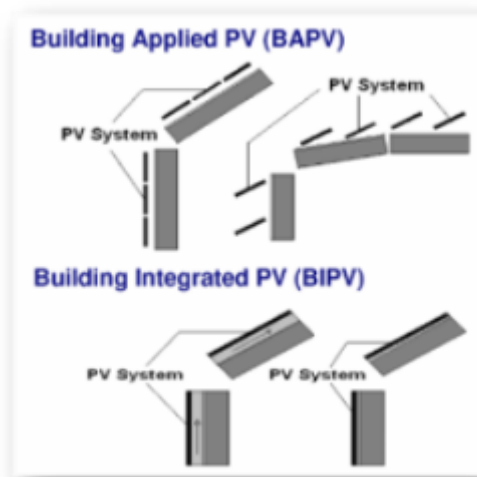
Faces global results												
Solar panels	N°P.	P. power (Wp)	P.weight (kg)	DC r. (kWp)	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	Shading L (%)					
SunPower M series:SPR-M440-H-AC	271	440,00	21,80	119,24	165287,49	1386,17	3,58					
Results for solar modules in each face												
Face	Model	N°P.	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Weight (kg)	Azimuth	Tilt	Relative tilt	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	$\Sigma H_m$ (kWh/m <sup>2</sup> /year)	Shading L (%)
8	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	130	440,00	57,20	2834,00	200,00	30,00	30,00	79289,20	1386,17	1796,18	6,93
9	SunPower M series:SPR-M440-H-AC	141	440,00	62,04	3073,80	200,00	30,00	30,00	85998,29	1386,17	1796,18	0,49
Monthly Shading Losses (%)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	21,41	13,58	8,05	3,44	1,26	1,18	1,33	2,25	7,46	11,94	16,69	23,28
9	1,62	0,72	0,47	0,26	0,21	0,23	0,22	0,21	0,39	0,48	0,99	1,91
Mean	11,51	7,15	4,26	1,85	0,73	0,70	0,77	1,23	3,92	6,21	8,84	12,60
E <sub>d</sub> (kWh/day)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	134,95	164,26	206,03	233,95	261,75	300,91	306,92	290,56	268,74	193,22	125,56	116,74
9	146,36	178,16	223,46	253,74	283,90	326,38	332,89	315,14	291,48	209,57	136,19	126,62
$\Sigma$	281,31	342,41	429,49	487,69	545,66	627,29	639,81	605,70	560,22	402,78	261,75	243,37

Εικόνα 90. Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων με προσανατολισμό 20 μοίρες προς τα δυτικά

Παρατηρείται ότι η συνολική παραγόμενη ενέργεια είναι μειωμένη κατά περίπου 10% με 20% σε σύγκριση με τα σενάρια προσομοίωσης του **Κεφαλαίου 5.4.2**. Σε αυτό σημαντικό ρόλο εκτός από την αλλαγή του προσανατολισμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σχέση με τον βέλτιστο, παίζει και η γεωμετρία και ο προσανατολισμός του ήδη υπάρχοντος κτιρίου N που επηρεάζουν τον συνολικό αριθμό πλαισίων που θα μπορέσει να εγκατασταθεί.

#### 5.4.5. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΤΙΣ ΠΛΕΥΡΕΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το τελευταίο σενάριο προσομοίωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων που πραγματοποιήθηκε ήταν αυτό των φωτοβολταϊκών BIPV (Building – Integrated Photovoltaics) και BAPV (Building – Applied Photovoltaics), τα οποία παρουσιάζονται στην **Εικόνα 91**.



**Εικόνα 91.** Φωτοβολταϊκά συστήματα BAPV και BIPV [50]

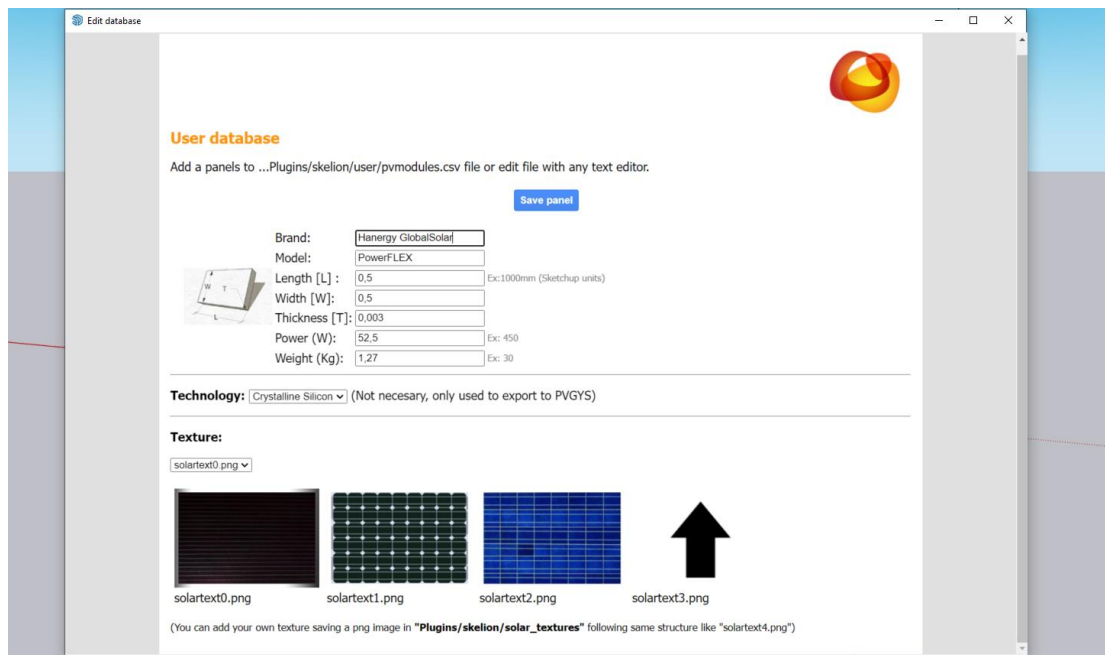
Τα **BIPV** είναι φωτοβολταϊκά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάσταση συμβατικών δομικών υλικών σε μέρη του κελύφους του κτιρίου, όπως η οροφή, οι προσόψεις ή τα παράθυρα. Μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν από την αρχή της κατασκευής κάποιου νέου κτιρίου ως κύρια ή βοηθητική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε σε κάποιο ήδη υπάρχον κτίριο με τις κατάλληλες μετατροπές [51]. Ένα από τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ότι το αρχικό κόστος μπορεί να θεωρηθεί σχετικά μικρότερο αν ληφθεί υπόψη η μείωση του ποσού που δαπανάται για οικοδομικά υλικά και την εργασία που κανονικά θα



χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή του τμήματος του κτιρίου που αντικαθιστούν οι μονάδες BIPV.

Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, τα χαρακτηριστικά του πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί εμφανίζονται στην **Εικόνα 92**, ενώ η τοποθέτησή τους στο κτίριο N αποτυπώνεται στην **Εικόνα 93** και την **Εικόνα 94**. Σημειώνεται ότι για τη συγκεκριμένη προσομοίωση δεν λαμβάνονται υπόψη σε αρχικό στάδιο οι απώλειες σκίασης από γειτονικά κτίρια ή δέντρα με στόχο να συγκριθεί η παραγωγή ενέργειας (kWh/m<sup>2</sup>) της κάθε πλευράς του κτιρίου, και έτσι τα αποτελέσματα ύστερα από τη χρήση του εργαλείου “PVWatts report” αποτυπώνονται στην **Εικόνα 95** και συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 6** που ακολουθεί.

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 6** παρατηρείται ότι όπως ήταν αναμενόμενο η πλευρά με τη μεγαλύτερη απόδοση είναι η νότια, ενώ εκείνη με τη μικρότερη είναι η βόρεια πλευρά του κτιρίου N. Τα αποτελέσματα συμβαδίζουν με όσα είναι γνωστά από τη θεωρία, καθώς στη βόρεια πλευρά του κτιρίου κυριαρχεί η διάχυτη ακτινοβολία, σε αντίθεση με τη νότια όπου το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας και του έτους δέχεται άμεση ακτινοβολία. Όσον αφορά την ανατολική και τη δυτική πλευρά του κτιρίου, αυτές δέχονται άμεση ακτινοβολία είτε πριν είτε μετά το μεσημέρι αντίστοιχα και έτσι έχουν μεγαλύτερη σχετικά απόδοση από τη βόρεια αλλά μικρότερη από τη νότια.



**Εικόνα 92.** Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί στο σύστημα BIPV [55]



**Εικόνα 93.** Τοποθέτηση BIPV φωτοβολταϊκών πλαισίων στη νότια και την ανατολική πλευρά του κτιρίου N



**Εικόνα 94.** Τοποθέτηση BIPV φωτοβολταϊκών πλαισίων στη βόρεια και δυτική πλευρά του κτιρίου N

## Groups analysis

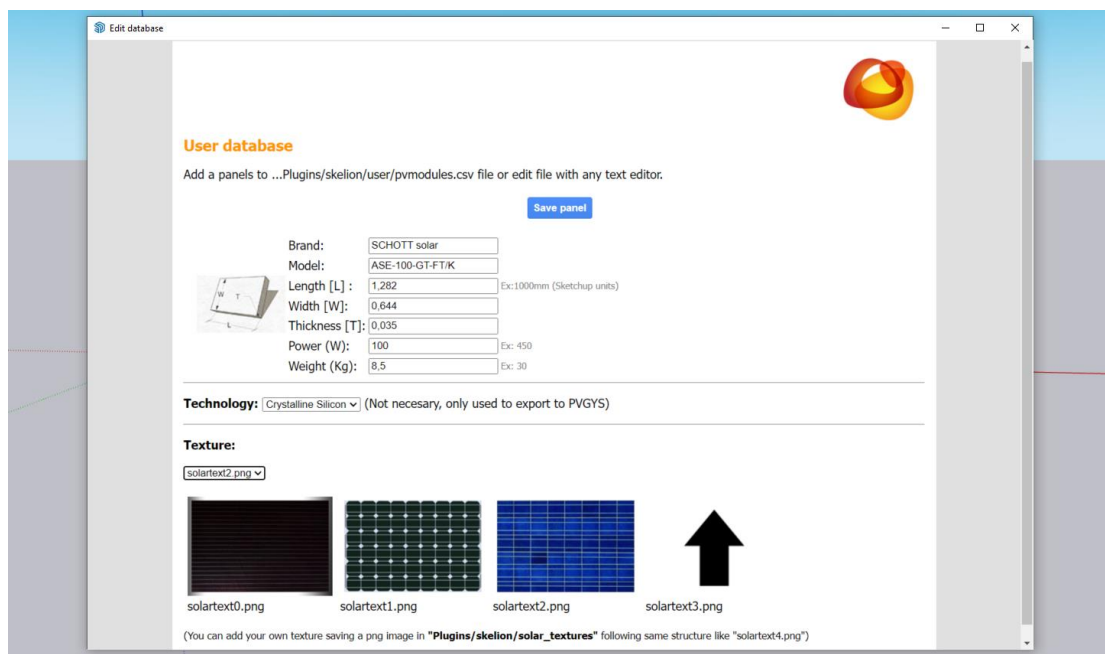
Groups global results												
Solar panels		N°P.	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)						
Hanergy GlobalSolar:PowerFLEX		3844	52,50	201,81	111223,71	551,13						
Results for solar modules in each group (grouped by same tilt, azimuth and panel model)												
Group	Model	N°P.	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Azimuth	Tilt	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	$\Sigma H_m$ (kWh/m <sup>2</sup> /year)			
1	Hanergy GlobalSolar:PowerFLEX	1311	52,50	68,83	179,84	90,00	54569,08	792,84	1050,15			
2	Hanergy GlobalSolar:PowerFLEX	1323	52,50	69,46	359,84	90,00	17599,81	253,39	359,40			
3	Hanergy GlobalSolar:PowerFLEX	652	52,50	34,23	89,84	90,00	21354,40	623,85	822,91			
4	Hanergy GlobalSolar:PowerFLEX	558	52,50	29,30	269,84	90,00	17700,42	604,21	798,19			
$H_d$ (kWh/m <sup>2</sup> /day)												
Group	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	2,87	2,97	3,03	2,75	2,34	2,26	2,47	3,17	4,01	3,53	2,57	2,56
2	0,55	0,75	0,95	1,14	1,37	1,51	1,39	1,16	0,99	0,85	0,62	0,52
3	1,19	1,43	2,08	2,72	2,87	3,36	3,46	3,10	2,69	1,90	1,21	1,06
4	1,16	1,55	1,99	2,38	2,90	3,37	3,39	3,08	2,66	1,69	1,09	0,98
Mean	1,45	1,67	2,02	2,25	2,37	2,63	2,68	2,63	2,59	1,99	1,37	1,28
$H_m$ (kWh/m <sup>2</sup> /month)												
Group	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	89,05	83,03	94,05	82,49	72,54	67,66	76,46	98,20	120,41	109,42	77,19	79,29
2	17,18	21,06	29,56	34,28	42,55	45,43	43,22	35,93	29,60	26,34	18,63	16,00
3	37,03	39,94	64,58	81,56	88,88	100,93	107,14	96,01	80,65	58,76	36,22	32,73
4	35,97	43,34	61,67	71,52	89,78	101,17	105,18	95,38	79,76	52,26	32,82	30,50
Mean	44,81	46,84	62,47	67,46	73,44	78,80	83,00	81,38	77,60	61,70	41,21	39,63
Yearly average												
Group	Edy (kWh/day)	Emy (kWh/month)	Hdy (kWh/m <sup>2</sup> /day)	Hmy (kWh/m <sup>2</sup> /month)								
1	149,50	4547,42	2,88	87,51								
2	48,22	1466,65	0,98	29,95								
3	58,51	1779,53	2,25	68,58								
4	48,49	1475,03	2,19	66,52								
$\Sigma$ or Mean	304,72	9268,64	2,08	63,14								

**Εικόνα 95.** Αποτελέσματα προσομοίωσης BIPV φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα Groups 1 έως 4 είναι κατά σειρά η νότια, η βόρεια η ανατολική και η δυτική πλευρά του κτιρίου N

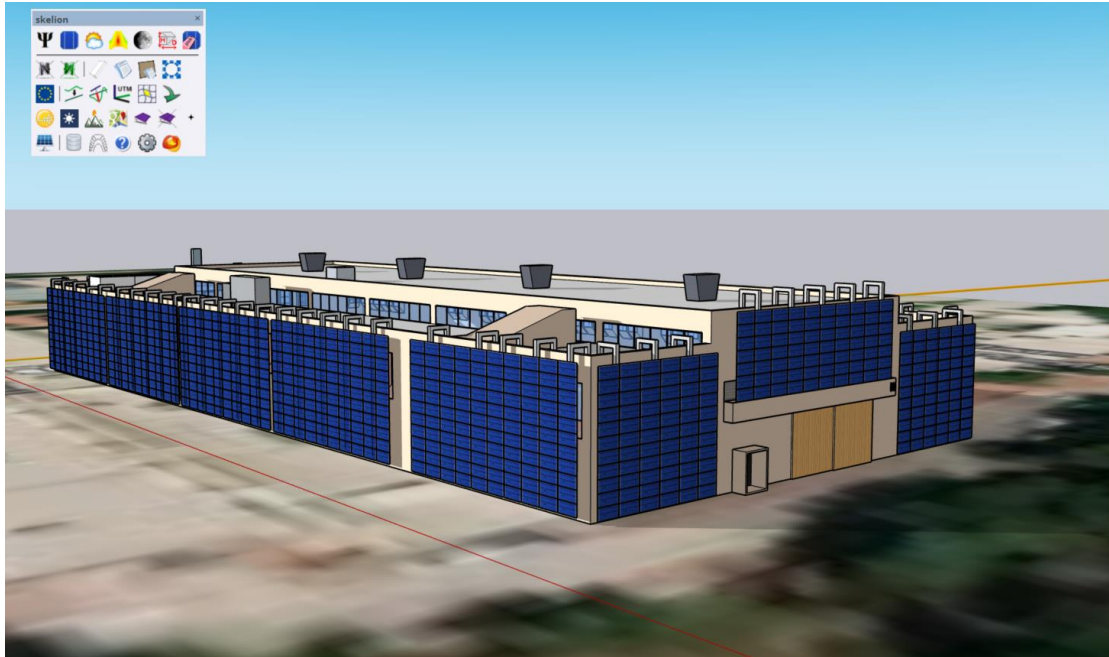
Χαρακτηριστικά μεγέθη	Πλευρά Κτιρίου N			
	Νότια	Βόρεια	Ανατολική	Δυτική
Αριθμός πλαισίων	1311	1323	652	558
Ετήσια παραγόμενη ενέργεια [kWh]	54569.08	17599.81	21354.40	17700.42
Παραγόμενη ενέργεια ανά εγκατεστημένη μονάδα επιφάνειας φωτοβολταϊκών πλαισίων [kWh/m <sup>2</sup> ]	166.5	53.2	132.1	126.9

**Πίνακας 6.** Αποτελέσματα χαρακτηριστικών μεγεθών για το φωτοβολταϊκό σύστημα BIPV σε κάθε πλευρά του κτιρίου N

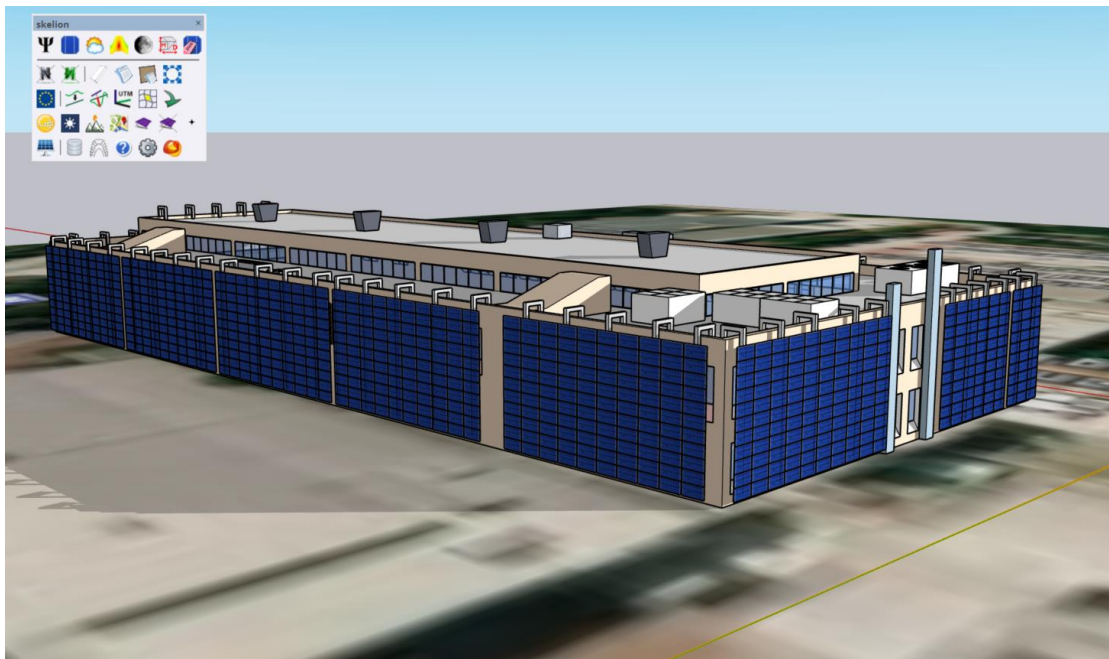
Αντίστοιχα τα **BAPV** φωτοβολταϊκά τοποθετούνται εξωτερικά από το κέλυφος του κτιρίου αφήνοντας μια απόσταση μεταξύ στα πλαίσια και στο κύριο κέλυφος. Ο χώρος που δημιουργείται επιτρέπει έτσι, με την κατάλληλη (εξαναγκασμένη) ροή του αέρα, την ψύξη του φωτοβολταϊκού πλαισίου και άρα τη βελτίωση της απόδοσής του [52]. Παράλληλα μειώνει και τα θερμικά φορτία που δέχεται το κέλυφος του κτιρίου από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οδηγώντας έτσι σε μειωμένες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του κτιρίου, και άρα λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια για ψύξη [53]. Τα BAPV τοποθετούνται πάνω σε μεταλλικό σκελετό που στηρίζεται στο υπάρχον κούφωμα, με τα χαρακτηριστικά του πλαισίου που προστέθηκε στη βάση δεδομένων του Skelion για το συγκεκριμένο σενάριο να φαίνονται στην **Εικόνα 96**. Η τοποθέτησή τους με τη χρήση ενός απλού μεταλλικού σκελετού εξωτερικά του κελύφους, σε απόσταση 45 εκατοστών από αυτό αποτυπώνεται στην **Εικόνα 97** και την **Εικόνα 98**. Η επιλογή του βάθους των 45 εκατοστών έγινε σύμφωνα με τα αποτελέσματα σχετικών πειραμάτων του τμήματος Αρχιτεκτονικής και Επιστήμης Κτιρίων, του Πανεπιστημίου Umm al-Qura στη Μέκκα της Σαουδικής Αραβίας [54]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη χρήση του εργαλείου “PVWatts report” αποτυπώνονται στην **Εικόνα 99**.



**Εικόνα 96.** Χαρακτηριστικά πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί στο BAPV σύστημα [56]



**Εικόνα 97.** Τοποθέτηση BAPV φωτοβολταϊκών πλαισίων στη νότια και την ανατολική πλευρά του κτιρίου N



**Εικόνα 98.** Τοποθέτηση BAPV φωτοβολταϊκών πλαισίων στη βόρεια και δυτική πλευρά του κτιρίου N

## Groups analysis

Groups global results									
Solar panels		N°P.	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)			
SCHOTT solar:ASE-100-GT-FT/K		1511	100,00	151,10	82895,75	548,62			

Results for solar modules in each group (grouped by same tilt, azimuth and panel model)									
Group	Model	N°P.	P. power (Wp)	DC r. (kWp)	Azimuth	Tilt	Energy (kWh)	Yield (kWh/kWp)	ΣH <sub>m</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /year)
1	SCHOTT solar:ASE-100-GT-FT/K	550	100,00	55,00	358,20	90,00	13965,54	253,92	360,13
2	SCHOTT solar:ASE-100-GT-FT/K	550	100,00	55,00	178,20	90,00	43636,88	793,40	1050,93
3	SCHOTT solar:ASE-100-GT-FT/K	209	100,00	20,90	268,20	90,00	12802,68	612,57	809,16
4	SCHOTT solar:ASE-100-GT-FT/K	202	100,00	20,20	88,20	90,00	12490,65	618,35	816,26

H <sub>d</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /day)												
Group	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	0,55	0,75	0,95	1,14	1,38	1,52	1,40	1,16	0,99	0,85	0,62	0,52
2	2,87	2,96	3,04	2,76	2,34	2,26	2,47	3,17	4,01	3,54	2,57	2,55
3	1,19	1,58	2,02	2,41	2,92	3,39	3,42	3,11	2,71	1,72	1,12	1,01
4	1,18	1,41	2,06	2,70	2,86	3,36	3,45	3,08	2,66	1,86	1,19	1,04
Mean	1,45	1,67	2,02	2,25	2,37	2,63	2,68	2,63	2,59	1,99	1,38	1,28

H <sub>m</sub> (kWh/m <sup>2</sup> /month)												
Group	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	17,20	21,07	29,58	34,33	42,71	45,52	43,40	36,05	29,63	26,36	18,64	16,02
2	88,90	82,87	94,12	82,82	72,68	67,76	76,70	98,32	120,43	109,59	77,22	79,20
3	36,97	44,13	62,58	72,33	90,44	101,76	105,90	96,52	81,23	53,45	33,63	31,41
4	36,53	39,37	63,93	81,04	88,58	100,76	106,80	95,37	79,80	57,79	35,62	32,19
Mean	44,90	46,86	62,55	67,63	73,60	78,95	83,20	81,56	77,77	61,80	41,28	39,71

Yearly average				
Group	Edy (kWh/day)	Emy (kWh/month)	Hdy (kWh/m <sup>2</sup> /day)	Hmy (kWh/m <sup>2</sup> /month)
1	38,26	1163,79	0,99	30,01
2	119,55	3636,41	2,88	87,58
3	35,08	1066,89	2,22	67,43
4	34,22	1040,89	2,24	68,02
Σ or Mean	227,11	6907,98	2,08	63,26

**Εικόνα 99.** Αποτελέσματα προσομοίωσης BAPV φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα Groups 1 έως 4 είναι κατά σειρά η βόρεια, η νότια η δυτική και η ανατολική πλευρά του κτιρίου N

Παρατηρείται ότι παρόλο που η εγκατεστημένη επιφάνεια φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι εμφανώς μεγαλύτερη σε σχέση με το BIPV σύστημα, η συνολική παραγωγή ενέργειας είναι λίγο μικρότερη. Αυτό οφείλεται στον τύπο του φωτοβολταϊκού πλαισίου που επιλέχθηκε, καθώς στο σύστημα BAPV το πλαίσιο είχε μικρότερη ονομαστική ισχύ και βαθμό απόδοσης.

## 6. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων των φωτοβολταϊκών σεναρίων πραγματοποιήθηκε μια απλή οικονομοτεχνική ανάλυση, η οποία περιλαμβάνει τον υπολογισμό και την παρουσίαση των οικονομικών δεικτών IRR, NPV και PBP.

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ ή Net Present Value NPV) είναι ένας δείκτης αξιολόγησης μιας επένδυσης ή ενός έργου, για τον υπολογισμό της οποίας θεωρούνται σαν δεδομένα το αρχικό κόστος της επένδυσης, η χρονική περίοδος για την οποία θα εξεταστεί η επένδυση και τα έσοδα και τα έξοδα της επένδυσης κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής [57]. Εφόσον η τιμή της είναι θετική τότε η επένδυση χαρακτηρίζεται κερδοφόρα, ενώ αν είναι μηδενική ή αρνητική τότε η επένδυση χαρακτηρίζεται αδιάφορη ή ζημιογόνα αντίστοιχα. Επίσης, ανάμεσα σε 2 διαφορετικές επενδύσεις, πιο κερδοφόρα θεωρείται αυτή με το μεγαλύτερο NPV. Η εξίσωση υπολογισμού του NPV παρουσιάζεται στην **Εικόνα 100**.

$$\text{ΚΠΑ} = \sum_{t=1}^N \frac{\text{Ταμειακές Εισροές}}{(1+r)^t} - \text{Αρχική Επένδυση}$$

t = Χρονική περίοδος

N = Χρονική διάρκεια της επένδυσης

r = Προεξοφλητικό επιτόκιο

**Εικόνα 100.** Τύπος υπολογισμού NPV [57]

Αντίστοιχα, ο δείκτης IRR (Internal Rate of Return) ή εσωτερικός βαθμός απόδοσης μιας επένδυσης είναι το επιτόκιο με το οποίο (εάν γίνει η προεξόφληση) η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης γίνεται ίση με μηδέν. Γενικά είναι επιθυμητό το IRR της επένδυσης να είναι μεγαλύτερο από το κόστος του χρήματος (ή το κόστος ευκαιρίας των κεφαλαίων του επενδυτή), διαφορετικά η αποδοτικότητα της επένδυσης δεν είναι συμφέρουσα. Ανάμεσα σε διαφορετικές επενδύσεις, πιο κερδοφόρα θεωρείται εκείνη με τη μεγαλύτερη τιμή του IRR.

Όσον αφορά τον δείκτη PBP (Payback Period ή Περίοδος Επανείσπραξης), αυτός δίνει τον αριθμό των ετών που απαιτούνται για να επανεισπραχθεί το κόστος της επένδυσης. Όταν η περίοδος επανεισπραξης του κόστους της επένδυσης είναι ίση με, ή μικρότερη από τη μέγιστη αποδεκτή περίοδο επανεισπραξης, η πρόταση επένδυσης γίνεται αποδεκτή. Διαφορετικά, η πρόταση επένδυσης απορρίπτεται [58].

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός και παρουσίαση των παραπάνω 3 δεικτών για κάθε ένα από τα σενάρια προσομοίωσης που αναφέρθηκαν στο **Κεφάλαιο 5.4**, στο περιβάλλον του λογισμικού Excel. Σε όλες τις περιπτώσεις, σαν περίοδος αξιολόγησης ορίστηκαν τα 25 χρόνια, ενώ η παραγωγή θεωρήθηκε ότι ελαττώνεται κατά 0,5% κάθε χρόνο λόγω γήρανσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το επιτόκιο προεξόφλησης θεωρήθηκε ίσο με 8%, ενώ σαν συνολικό κόστος επένδυσης υπολογίστηκε το κόστος των πλαισίων και κάποια άλλα κόστη εγκατάστασής τους, ίσα με 10% του κόστους αυτού. Αντίστοιχα το κόστος ετήσιας συντήρησης και λειτουργίας εκτιμήθηκε στο 2% του κόστους επένδυσης και η τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα 0,07 €/kWh. Τέλος, ο φόρος επί των κερδών ορίστηκε ίσος με 35%, ενώ για το δάνειο το οποίο θα καλύπτει κάθε φορά το 40% του κόστους της αρχικής επένδυσης, η περίοδος αποπληρωμής ορίστηκε στα 10 έτη και το επιτόκιο δανεισμού ίσο με 10%. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον **Πίνακα 7**.

Μέγεθος	Τιμή
Περίοδος αξιολόγησης	25 έτη
Επιτόκιο προεξόφλησης	8%
Κόστος συντήρησης και λειτουργίας	2%
Τιμή πώλησης ενέργειας	0,07 €/kWh
Φόρος επί των κερδών	35%
Περίοδος αποπληρωμής δανείου	10 έτη
Επιτόκιο Δανεισμού	10%

**Πίνακας 7.** Τιμές μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υπολογισμό των οικονομικών δεικτών

Αρχικά γίνεται υπολογισμός και σύγκριση των δεικτών για τους 3 διαφορετικούς τύπους πλαισίων που αναφέρθηκαν στο **Κεφάλαιο 5.4.1**. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 8** που ακολουθεί. Με βάση αυτά φαίνεται η πιο κερδοφόρα επένδυση με βάση και τους 3 δείκτες να είναι αυτή της τοποθέτησης πλαισίων τύπου “Longi LR4-72HPH 455M”, όντας λίγο καλύτερη συγκριτικά με αυτή των πλαισίων τύπου “SunPower M series SPR-M440-H-AC”.

Οικονομικός δείκτης	Τύπος πλαισίου		
	SunPower M series SPR-M440-H-AC	Longi LR4-72HPH 455M	SunPower E Series Residential AC SPR-E20-327-D-AC
Αρχικό κόστος επένδυσης [€]	33336	27117	34496
NPV [€]	8301	9448	1857
IRR [%]	12.2	13.8	8.9
PBP [years]	10	9	12

**Πίνακας 8.** Σύγκριση οικονομικών δεικτών για την τοποθέτηση 3 διαφορετικών τύπων πλαισίων στην υπερυψωμένη οροφή του κτιρίου N



Στη συνέχεια έγινε η ίδια διαδικασία για το 2<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης του **Κεφαλαίου 5.4.2**, όπου κάθε φορά απομακρύνονταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης μεγαλύτερο από το επιτρεπτό. Οι οικονομικοί δείκτες κάθε διαφορετικής περίπτωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9** που ακολουθεί. Σύμφωνα με αυτόν, βάσει του δείκτη NPV πιο κερδοφόρα είναι η περίπτωση που είναι τοποθετημένος ο μέγιστος δυνατός αριθμός πλαισίων, ανεξάρτητα των απωλειών λόγω σκίασης που μπορεί να υπάρχουν. Ωστόσο, ο δείκτης IRR υποδεικνύει ότι όσο λιγότερες απώλειες λόγω σκίασης παρουσιάζονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τόσο περισσότερο κερδοφόρα θα είναι η επένδυση. Το γεγονός ότι οι διαφορές των τιμών των δεικτών μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων είναι τόσο μικρές αποδίδεται στη μικρή κλίμακα του έργου.

Προσομοίωση	Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης [%]	Αρχικό κόστος επένδυσης [€]	NPV [€]	IRR [%]	PBP [years]
1	100	74849	18909	12.2	10
2	10	66882	17598	12.4	10
3	8.5	64785	17203	12.4	10
4	7	64575	17151	12.4	10
5	5	63737	16977	12.4	10
6	4	61221	16392	12.5	10

**Πίνακας 9.** Σύγκριση οικονομικών δεικτών για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων με διαφορετικό κάθε φορά μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης

Τέλος, ο υπολογισμός και σύγκριση των τριών οικονομικών δεικτών πραγματοποιήθηκε και για τους διαφορετικούς τρόπους τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, σύμφωνα με το **Κεφάλαιο 5.4.3**. Η σύγκριση έγινε μεταξύ της τοποθέτησης των πλαισίων με τη μεγαλύτερη (landscape) ή μικρότερη (portrait) σε διάσταση πλευρά της επιφάνειάς τους να ακουμπά στην οροφή του κτιρίου N, αλλά και με την περίπτωση όπου τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι τοποθετημένα σε στοίβες ανά δύο (Stack). Οι τιμές των δεικτών αποτυπώνονται στον **Πίνακα 10**, σύμφωνα με τον οποίο παρατηρείται ότι οι διαφορές των τιμών μεταξύ των τριών περιπτώσεων είναι αμελητέες.

Οικονομικός δείκτης	Τρόπος τοποθέτησης πλαισίων		
	Landscape	Portrait	Stack
Αρχικό κόστος επένδυσης [€]	74849	76736	76316
NPV [€]	18909	19498	19066
IRR [%]	12.2	12.2	12.2
PBP [years]	10	10	10

**Πίνακας 10.** Σύγκριση οικονομικών δεικτών για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή του κτιρίου N με διαφορετικό κάθε φορά τρόπο

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάστηκε το εύρος των δυνατοτήτων του λογισμικού Skelion στην προσομοίωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και μελετήθηκε η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στο κτίριο N των εργαστηρίων της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών.

Σχετικά με το λογισμικό Skelion, εκτός από τη δυνατότητα που δίνει στον χρήστη για εύκολη τοποθέτηση των πλαισίων, το πλήθος των εργαλείων που διαθέτει και χρησιμοποιήθηκαν, όπως για παράδειγμα αυτό του υπολογισμού των σκιάσεων στην υπό μελέτη οροφή του Κτιρίου N, καθιστά την προσομοίωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων πιο εύκολη και γρήγορη. Ιδιαίτερα χρήσιμο αποδείχτηκε το εργαλείο των αναφορών “PVWatts Report”, το οποίο υπολόγιζε σε κάθε σενάριο τόσο την παραγόμενη ενέργεια αλλά και άλλα χρήσιμα μεγέθη, όπως την προσπίπτουσα ακτινοβολία στις επιφάνειες των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Όσον αφορά το φωτοβολταϊκό σύστημα που θα μπορούσε να εγκατασταθεί στο κτίριο N, ύστερα από τις διαφορετικές προσομοιώσεις που έγιναν, με παράγοντες τον τρόπο τοποθέτησης των πλαισίων, τον προσανατολισμό, το επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης αλλά και άλλους, το βέλτιστο σενάριο φαίνεται να είναι εκείνο της τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην υπερυψωμένη οροφή με τη μεγαλύτερη σε διάσταση πλευρά τους να συνδέεται με την επιφάνεια της οροφής, ενώ για την υπόλοιπη οροφή σε στοίβες ανά δύο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα τοποθετηθούν συνολικά 397 φωτοβολταϊκά πλαίσια τύπου “SunPower M series SPR-M440-H-AC”, με τη συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια να ανέρχεται στις 247 MWh. Σε όλες τις περιπτώσεις, η επένδυση με βάση τους οικονομικούς δείκτες που υπολογίστηκαν, κρίθηκε κερδοφόρα, με την Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) να φτάνει μέχρι και τις 20000€. Ωστόσο, οι τιμές των δεικτών NPV, IRR και PBP που υπολογίστηκαν είναι ενδεικτικές καθώς οι τιμές ορισμένων οικονομικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν είναι προσεγγιστικές.

Σαν προτάσεις για μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να εκπονηθεί μια μελέτη πάνω στο σύστημα BAPV που παρουσιάστηκε, η οποία να δείχνει το πως επηρεάζονται τα θερμικά φορτία που δέχεται το κτίριο N με την εγκατάσταση του συστήματος αυτού. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα αναζήτησης των ενεργειακών καταναλώσεων του κτιρίου N αλλά και των υπόλοιπων κτιρίων της σχολής και εύρεσης του ποσοστού κάλυψης αυτών με την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Τέλος, θα μπορούσε να εξεταστεί ο συνδυασμός της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πλαισίων σε συνδυασμό με κάποιο μέσο αποθήκευσης ενέργειας και να γίνει μελέτη της απόδοσης ενός τέτοιου συνδυασμένου συστήματος.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ozili, Peterson K, and Ercan Ozen. "Global Energy Crisis: Impact on the Global Economy." SSRN Electronic Journal, 2023, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4309828>.
- [2] Enerdata. "World Energy Consumption Statistics." Enerdata.net, 2022, [yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html](http://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html).
- [3] IEA. "Global Energy Crisis." International Energy Agency, 2022, [www.iea.org/topics/global-energy-crisis](http://www.iea.org/topics/global-energy-crisis).
- [4] Yanatma, Servet. "How Has a Year of War in Ukraine Changed the Energy Used in the EU?" *Euronews*, 24 Feb. 2023, [www.euronews.com/green/2023/02/24/europes-energy-war-in-data-how-have-eu-imports-changed-since-russias-invasion-of-ukraine](http://www.euronews.com/green/2023/02/24/europes-energy-war-in-data-how-have-eu-imports-changed-since-russias-invasion-of-ukraine).
- [5] Perdana, Sigit, et al. "European Economic Impacts of Cutting Energy Imports from Russia: A Computable General Equilibrium Analysis." *Energy Strategy Reviews*, Nov. 2022, p. 101006, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101006>.
- [6] Evans, Simon. "In-Depth: Russia's War Means Fossil Fuels Will Peak within Five Years, IEA Says." *Carbon Brief*, 31 Oct. 2022, [www.carbonbrief.org/in-depth-russias-war-means-fossil-fuels-will-peak-within-five-years-iea-says/](http://www.carbonbrief.org/in-depth-russias-war-means-fossil-fuels-will-peak-within-five-years-iea-says/).
- [7] Sample, Ian. "The Father of Climate Change." *The Guardian*, The Guardian, 30 June 2005, [www.theguardian.com/environment/2005/jun/30/climatechange.climatechangeenvironment2](http://www.theguardian.com/environment/2005/jun/30/climatechange.climatechangeenvironment2).
- [8] Shabecoff, Philip, and Special To the New York Times. "Global Warming Has Begun, Expert Tells Senate." *The New York Times*, 24 June 1988, [www.nytimes.com/1988/06/24/us/global-warming-has-begun-expert-tells-senate.html?smid=url-share](http://www.nytimes.com/1988/06/24/us/global-warming-has-begun-expert-tells-senate.html?smid=url-share). Accessed 20 May 2024.

- [9] The Royal Society. “Climate Change: Evidence and Causes | Royal Society.” *Royalsociety.org*, 2024, [royalsociety.org/news-resources/projects/climate-change-evidence-causes/basics-of-climate-change/](https://royalsociety.org/news-resources/projects/climate-change-evidence-causes/basics-of-climate-change/).
- [10] European Commission. “Consequences of Climate Change.” *Climate.ec.europa.eu*, 2024, [climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en).
- [11] Australian Academy of Science. “2. How Has Climate Changed? | Australian Academy of Science.” *Science.org.au*, 2012, [www.science.org.au/learning/general-audience/science-climate-change/2-how-has-climate-changed](http://www.science.org.au/learning/general-audience/science-climate-change/2-how-has-climate-changed).
- [12] Krivoglazova, Aleksandra, et al. “International Transfer and Cancellation of the Guarantees of Origin Issued from Eenergy Generated by the Photovoltaic System.” *Digikogu.taltech.ee*, 1 June 2017, [digikogu.taltech.ee/en/Item/00bed9f1-4ad7-44ee-b946-dc50e14ddc4f](https://digikogu.taltech.ee/en/Item/00bed9f1-4ad7-44ee-b946-dc50e14ddc4f). Accessed 20 May 2024.
- [13] Περιφερειακό Κέντρο Πληροφόρησης του ΟΗΕ – Greece, [unric.org/el/](https://unric.org/el/).
- [14] “Εγκρίθηκε από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο η νέα οδηγία της ΕΕ για της ΑΠΕ.” *Energypress.gr*, 9 Oct. 2023, [energypress.gr/news/egkrithike-apo-eyropaiko-symboylio-i-nea-odigia-tis-ee-gia-tis-ape](https://energypress.gr/news/egkrithike-apo-eyropaiko-symboylio-i-nea-odigia-tis-ee-gia-tis-ape).
- [15] ---. “Renewable Energy Directive.” *Energy.ec.europa.eu*, 2022, [energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en).
- [16] Paraschiv, Spiru, and Lizica Simona Paraschiv. *Trends of Carbon Dioxide (CO2) Emissions from Fossil Fuels Combustion (Coal, Gas and Oil) in the EU*

- Member States from 1960 to 2018, Energy Reports*. Vol. 6, no. 2352-4847, 2020, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720315419](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720315419).
- [17] ΕΙ, Επίσημη, et al. ΟΔΗΓΙΑ 2009/28/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 23<sup>ης</sup> Απριλίου 2009. 2009.
- [18] Deshmukh, Md Kashif Gohar, et al. “Renewable Energy in the 21<sup>st</sup> Century: A Review.” *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, June 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.501>.
- [19] Holloway, Milton L. “Chapter 11 – the Oil and Gas State Adds Renewable Wind and Solar.” *Academic Press*, no. 9780128238134, 2021, pp. 249–262, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128238134000117](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128238134000117).
- [20] Eurostat. “Renewable Energy Statistics – Statistics Explained.” *Ec.europa.eu*, 2023, [ec.europa.eu/94uropa94t/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics](http://ec.europa.eu/94uropa94t/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics).
- [21] REN21. RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT – GLOBAL OVERVIEW. 2024.
- [22] “Global Solar Photovoltaic Capacity by Region 2023.” Statista, [www.statista.com/statistics/271374/new-installed-solar-photovoltaic-capacity-worldwide-by-region/](http://www.statista.com/statistics/271374/new-installed-solar-photovoltaic-capacity-worldwide-by-region/).
- [23] Turgeon, Andrew, and Elizabeth Morse. “Solar Energy.” National Geographic, National Geographic Society, 28 July 2022, [education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy/](http://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy/).
- [24] “Solar Angles and Tracking Systems – Lesson.” TeachEngineering.org, 1 July 2019, [www.teachengineering.org/lessons/view/cub\\_pveff\\_lesson01](http://www.teachengineering.org/lessons/view/cub_pveff_lesson01).

- [25] Bossink, Bart A.G. “Demonstrating Sustainable Energy: A Review Based Model of Sustainable Energy Demonstration Projects.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, Sept. 2017, pp. 1349–1362, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.002>.
- [26] Asif, M. “Fundamentals and Application of Solar Thermal Technologies.” *Www.sciencedirect.com*, 1 Jan. 2017, pp. 27–36, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489100934](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489100934), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10093-4>.
- [27] ΚΙΜΩΝΟΣ Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ. ΘΕΡΜΙΚΑ - ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ. ΑΘΗΝΑ, 2011.
- [28] ΑΓΓΕΛΗΣ, ΔΗΜΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, et al. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. 2015, p. 376.
- [29] “Evacuated Tube Collector for Solar Hot Water System.” *Alternative Energy Tutorials*, [www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html](http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html).
- [30] “Edmond Becquerel: The Man behind Solar Panels – Solenergy Systems Inc.” *Solenergy Systems Inc.*, 16 June 2016, [solenergy.com.ph/solar-panel-philippines-edmond-becquerel/](http://solenergy.com.ph/solar-panel-philippines-edmond-becquerel/).
- [31] “Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers [2<sup>nd</sup> Ed.] 1844074420, 9781844074426, 9781435616226.” *Dokumen.pub*, [dokumen.pub/qdownload/planning-and-installing-photovoltaic-systems-a-guide-for-installers-architects-and-engineers-2ndnbsped-1844074420-9781844074426-9781435616226.html](http://dokumen.pub/qdownload/planning-and-installing-photovoltaic-systems-a-guide-for-installers-architects-and-engineers-2ndnbsped-1844074420-9781844074426-9781435616226.html).

- [32] U.S. Energy Information Administration. “Photovoltaics and Electricity – U.S. Energy Information Administration (EIA).” *Eia.gov*, U.S. Energy Information Administration, 26 May 2023, [www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php](http://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php).
- [33] Greenmatch. “Types of Solar Panels (2019) | GreenMatch.” *Greenmatch.co.uk*, 2019, [www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels](http://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels).
- [34] American Solar Energy Society. “Thin-Film Solar Panels | American Solar Energy Society.” *Ases.org*, 2021, [ases.org/thin-film-solar-panels/](http://ases.org/thin-film-solar-panels/).
- [35] Lalwani, Mahendra & Kothari, D.P. & Singh, Mool. (2010). Investigation of Solar Photovoltaic Simulation Softwares. INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED ENGINEERING RESEARCH. 1.
- [36] Gurupira, Tafadzwa, et al. PV SIMULATION SOFTWARE COMPARISONS: PVSYST, NREL SAM and PVLIB Evaluation and Optimisation of Solar Photovoltaic (PV) Plant Designs View Project Machine Learning for Solar Energy Industries View Project SEE PROFILE PV SIMULATION SOFTWARE COMPARISONS: PVSYST, NREL SAM and PVLIB. 2017.
- [37] “PVSyst Features.” *Pvsyst*, [www.pvsyst.com/features/](http://www.pvsyst.com/features/).
- [38] “Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).” *Joint-Research-Centre.ec.europa.eu*, [joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](http://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en).
- [39] “PVGIS.” *Pvgis.com*, [pvgis.com/pvgis](http://pvgis.com/pvgis). Accessed 23 May 2024.
- [40] SA Klein , et al. “TRNSYS 14.2 A Transient Simulation and Program” , Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin , Madison (WI) ( 1996 )



- [41] Kalogirou, Soteris A. “Use of TRNSYS for Modelling and Simulation of a Hybrid Pv–Thermal Solar System for Cyprus.” *Renewable Energy*, vol. 23, no. 2, June 2001, pp. 247–260, [https://doi.org/10.1016/s0960-1481\(00\)00176-2](https://doi.org/10.1016/s0960-1481(00)00176-2).
- [42] “TRNSYS.” *Sel.me.wisc.edu*, [sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html](http://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html).
- [43] Aleman, Juan Pons. Design of a Solar System Installation in Marrakesch Using the Skelion Software Tool. *ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7983898*.
- [44] “Skelion: A Solar Energy Design Plugin for SketchUp.” *Google Green Blog*, [green.googleblog.com/2011/12/skelion-solar-energy-design-plugin-for.html](http://green.googleblog.com/2011/12/skelion-solar-energy-design-plugin-for.html). Accessed 23 May 2024.
- [45] “History of SketchUp – 3D Design News, Software Releases & More – CAD Software Direct Blog.” *CADSoftwareDirect*, 28 Nov. 2023, [blog.cadsoftwaredirect.com/history-of-sketchup/](http://blog.cadsoftwaredirect.com/history-of-sketchup/).
- [46] “Sketchup History - the Story of Sketchup.” *MasterSketchup.com*, 17 Oct. 2011, [mastersketchup.com/history-of-sketchup/](http://mastersketchup.com/history-of-sketchup/).
- [47] “Our Story | History of SketchUp | SketchUp.” *Www.sketchup.com*, [www.sketchup.com/en/our-story](http://www.sketchup.com/en/our-story).
- [48] “Compare Solar Panels | EnergySage.” *Www.energysage.com*, [www.energysage.com/solar-panels/compare/?id=1246&id=2732&id=2393](http://www.energysage.com/solar-panels/compare/?id=1246&id=2732&id=2393). Accessed 10 June 2024.
- [49] Kankiewicz, Adam. “West vs. South: Why Change the Orientation of Your PV System.” *SolarAnywhere*, [www.solaranywhere.com/2015/west-vs-south-pv-system/](http://www.solaranywhere.com/2015/west-vs-south-pv-system/).

- [50] “BIPV vs BAPV - EnergyGlass.” Energyglass.gruppostg.com, energyglass.gruppostg.com/en/technical-information/building-integrated-photovoltaic/bipv-vs-bapv.html.
- [51] El-Nagar, Dina H, et al. “Performance Improvement of Building-Integrated Photovoltaic Panels Using a Composite Phase Change Material-Carbon Foam Heat Sink: An Experimental Study.” Wwww.scopus.com, 15 Aug. 2023.
- [52] Abdel Rahman Elbakheit, et al. “A Ducted Photovoltaic Façade Unit with Forced Convection Cooling.” Sustainability, vol. 14, no. 19, 9 Oct. 2022, pp. 12875–12875, <https://doi.org/10.3390/su141912875>.
- [53] Elbakheit, A.R. A Ducted Photovoltaic Facade Unit with Buoyancy Cooling: Part I Experiment. Buildings 2019, 9, 88. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
- [54] Elbakheit, A.R. Effect of Duct Width in Ducted Photovoltaic Facades. In Proceedings of the CTBUH 8th World Congress, Dubai, UAE, 3–5 March 2008
- [55] “BiPV Modules.” Bipv.ch, 2024, [www.bipv.ch/index.php/en/products-en-top/bipv-modules](http://www.bipv.ch/index.php/en/products-en-top/bipv-modules).
- [56] “Buy Solar Module Schott Solar ASE-100-GT-FT 100W | PvXchange.com.” Buy Solar Module Schott Solar ASE-100-GT-FT 100W | PvXchange.com, [www.pvxchange.com/Solar-Modules/Schott-Solar/ASE-100-GT-FT-100W\\_1-992500269-1](http://www.pvxchange.com/Solar-Modules/Schott-Solar/ASE-100-GT-FT-100W_1-992500269-1).
- [57] “Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) (Net Present Value (NPV)) - ορισμός.” Ευρετήριο Οικονομικών Όρων, 15 Feb. 2015, [euretirio.com/kathari-parousa-axia-kpa-npv/](http://euretirio.com/kathari-parousa-axia-kpa-npv/).
- [58] Νικόλαος Καθηγητής, Φίλιππας. Αξιολόγηση επενδύσεων.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1.</b> Συνολική κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο από το 1990 μέχρι το 2022 σε Mtoe (Million tonnes of oil equivalent, 1 Mtoe = 11630 TWh) [2].....	9
<b>Εικόνα 2.</b> Επιλεγμένοι δείκτες τιμών ενέργειας, που εμφανίζονται σε σχέση με τα επίπεδα Σεπτεμβρίου 2020 [6].....	10
<b>Εικόνα 3.</b> Αλλαγή μέσης θερμοκρασίας της Γης και επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα τα τελευταία 2000 χρόνια [11]. .....	11
<b>Εικόνα 4.</b> Αλλαγή μέσης θερμοκρασίας της Γης και επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα τα τελευταία 160 χρόνια [11]. .....	12
<b>Εικόνα 5.</b> Ποσοστό της συνολικής καταναλωμένης ενέργειας στις χώρες της Ε.Ε. που προήλθε από ΑΠΕ το 2022 [20].....	13
<b>Εικόνα 6.</b> Ποσοστό συνολικής καταναλωμένης ενέργειας που προήλθε από ΑΠΕ το 2022 [21]. .....	14
<b>Εικόνα 7.</b> Ποσοστό που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία ΑΠΕ το 2022 [21]. .....	15
<b>Εικόνα 8.</b> Ισχύς των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά περιοχή της Γης το 2023 [22]. .....	15
<b>Εικόνα 9.</b> Ηλιακές γωνίες χρήσιμες κατά τους υπολογισμούς για την ενεργειακή απόδοση ΦΒ πλαισίων [24]. .....	16
<b>Εικόνα 10.</b> Κύρια μέρη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [28].....	18
<b>Εικόνα 11.</b> Συγκεντρωτικό ηλιακό πάρκο .....	19
<b>Εικόνα 12.</b> Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια με τη χρήση ΦΒ κελιών [26]. .....	20
<b>Εικόνα 13.</b> Εργαλείο εισαγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων σε επιφάνεια .....	24
<b>Εικόνα 14.</b> Κτίριο N, Εργαστήρια Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών [πηγή: Google Earth].	25
<b>Εικόνα 15.</b> Σχεδιασμός βάσης κτιρίου N .....	26
<b>Εικόνα 16.</b> Μέτρηση διαστάσεων κτιρίου N με τη χρήση του Google Earth .....	27
<b>Εικόνα 17.</b> Ολοκλήρωση σχεδιασμού κύριας δομής του κτιρίου .....	27
<b>Εικόνα 18.</b> Σχεδιασμός κλιμακοστάσιων .....	28
<b>Εικόνα 19.</b> Διαστάσεις κλιμακοστάσιων.....	28
<b>Εικόνα 20.</b> Σχεδιασμός πορτών κλιμακοστάσιων.....	29
<b>Εικόνα 21.</b> Σχεδιασμός παραθύρων στο ύψος της κορυφής .....	30
<b>Εικόνα 22.</b> Διαστάσεις παραθύρων πρώτου ορόφου .....	30
<b>Εικόνα 23.</b> Τοποθέτηση παράθυρων πρώτου ορόφου .....	31
<b>Εικόνα 24.</b> Παράθυρα αριστερής πλευράς του κτιρίου .....	31
<b>Εικόνα 25.</b> Σχεδιασμός καμινάδων και στοιχείων οροφής .....	32
<b>Εικόνα 26.</b> Διαστάσεις στοιχείων υπερυψωμένης οροφής.....	33
<b>Εικόνα 27.</b> Σχεδιασμός και προσθήκη υπόλοιπων στοιχείων οροφής.....	34
<b>Εικόνα 28.</b> Σχεδιασμός πλευράς κύριας εισόδου του κτιρίου .....	34
<b>Εικόνα 29.</b> Διαστάσεις στοιχείων πλευράς κύριας εισόδου του κτιρίου .....	35
<b>Εικόνα 30.</b> Κάτοψη κτιρίου .....	36
<b>Εικόνα 31.</b> Πρόσοψη κτιρίου .....	36
<b>Εικόνα 32.</b> Πίσω όψη κτιρίου .....	37
<b>Εικόνα 33.</b> Αριστερή όψη κτιρίου .....	37
<b>Εικόνα 34.</b> Δεξιά όψη κτιρίου .....	38
<b>Εικόνα 35.</b> Εισαγωγή τοποθεσίας στο περιβάλλον του Placemaker.....	40

<b>Εικόνα 36.</b> Αναζήτηση τοποθεσίας προς εισαγωγή στο Placemaker .....	40
<b>Εικόνα 37.</b> Επιλογή έκτασης επιφάνειας προς εισαγωγή στο Placemaker .....	41
<b>Εικόνα 38.</b> Εισαγωγή - βελτίωση ποιότητας εικόνας επιφάνειας .....	42
<b>Εικόνα 39.</b> Διαδικασία προσθήκης οδικού δικτύου στο περιβάλλον του λογισμικού .....	43
<b>Εικόνα 40.</b> Προσθήκη οδικού δικτύου.....	43
<b>Εικόνα 41.</b> Προσθήκη δικτύου μονοπατιών .....	44
<b>Εικόνα 42.</b> Ορισμός παραμέτρων για την προσθήκη των κτιρίων της υπό σχεδίαση περιοχής .....	45
<b>Εικόνα 43.</b> Προσθήκη κτιρίων στο περιβάλλον του λογισμικού .....	45
<b>Εικόνα 44.</b> Ορισμός παραμέτρων για την προσθήκη των δέντρων .....	46
<b>Εικόνα 45.</b> Προσθήκη δέντρων .....	47
<b>Εικόνα 46.</b> Βήματα προσθήκης σχεδιασμένου κτιρίου N .....	48
<b>Εικόνα 47.</b> Προσθήκη κτιρίου N και ολοκλήρωση σχεδιασμού περιβάλλοντος χώρου .....	48
<b>Εικόνα 48.</b> Εμφάνιση άξονα του Βορρά στο περιβάλλον του λογισμικού (άξονας με πορτοκαλί χρώμα).....	50
<b>Εικόνα 49.</b> Περιστροφή (πορτοκαλί) άξονα του Βορρά προκειμένου να ταυτίζεται με τον πράσινο άξονα σχεδίασης.....	50
<b>Εικόνα 50.</b> Εμφάνιση σκιών στο μοντέλο .....	51
<b>Εικόνα 51.</b> Επιλογή ημέρας του έτους για προβολή σκιών.....	52
<b>Εικόνα 52.</b> Προβολή σκιών στο κτίριο N στις 09:00 .....	52
<b>Εικόνα 53.</b> Προβολή σκιών στο κτίριο N στις 12:00 .....	53
<b>Εικόνα 54.</b> Προβολή σκιών στο κτίριο N στις 15:00 .....	53
<b>Εικόνα 55.</b> Επιλογή εργαλείου "Sunny area" αφού γίνει επιλογή επιφανειών .....	54
<b>Εικόνα 56.</b> Ορισμός παραμέτρων για την προβολή των σκιών στο περιβάλλον του "Sunny area" .....	55
<b>Εικόνα 57.</b> Προβολή σκιών πάνω στις επιφάνειες της οροφής του κτιρίου N για το χρονικό διάστημα 09:23 - 15:23, την 21/12 .....	55
<b>Εικόνα 58.</b> Πρώτο βήμα εισαγωγής μετεωρολογικών δεδομένων .....	56
<b>Εικόνα 59.</b> Επιλογή βάσης δεδομένων και φόρτωση μετεωρολογικών δεδομένων .....	57
<b>Εικόνα 60.</b> Προσθήκη σημείου σχεδιασμού στην επιφάνεια της οροφής.....	58
<b>Εικόνα 61.</b> Επιλογή επιφάνειας, ακμής και σημείου σχεδιασμού για το εργαλείο "Optimum orientation" του Skelion.....	58
<b>Εικόνα 62.</b> Επιλογή μηνών καθώς και ωρών μέσα στη μέρα κάθε μήνα για υπολογισμό βέλτιστων γωνιών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	59
<b>Εικόνα 63.</b> Παράθυρο αποτελεσμάτων και ιδανικές γωνίες τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	59
<b>Εικόνα 64.</b> Διάγραμμα παράγοντα SOF συναρτήσει αζιμούθιου και γωνίας κλίσης πλαισίων στην επιλεγμένη επιφάνεια του κτιρίου.....	60
<b>Εικόνα 65.</b> Παράγοντας SOF συναρτήσει της κλίσης, στην περίπτωση που τα πλαίσια τοποθετηθούν κατά τον προσανατολισμό της επιλεγμένης ακμής .....	60
<b>Εικόνα 66.</b> Εμφάνιση παραθύρου για την εισαγωγή φωτοβολταϊκού πλαισίου με νέα χαρακτηριστικά στη βάση δεδομένων του Skelion .....	62
<b>Εικόνα 67.</b> Ορισμός παραμέτρων φωτοβολταϊκού πλαισίου προς εισαγωγή στη βάση δεδομένων .....	62
<b>Εικόνα 68.</b> Επιλογή επιφάνειας και εργαλείου για εισαγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων ....	64
<b>Εικόνα 69.</b> Ορισμός αζιμούθιου, κλίσης και τύπου φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	64
<b>Εικόνα 70.</b> Ορισμός παραμέτρων τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	65
<b>Εικόνα 71.</b> Επιλογή παραμέτρων διάκενων, σύμφωνα με τη μέγιστη σκίαση .....	65

<b>Εικόνα 72.</b> Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων στην υπερυψωμένη οροφή του κτιρίου N .....	66
<b>Εικόνα 73.</b> Επιλογή εργαλείου "PVWatts report" και μετεωρολογικών δεδομένων .....	67
<b>Εικόνα 74.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης κατά την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων "SunPower E Series Residential AC SPR-E20-327-D-AC" .....	67
<b>Εικόνα 75.</b> Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων τύπου " SunPower M series SPR-M440-H-AC" στην οροφή του κτιρίου N.....	69
<b>Εικόνα 76.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή του κτιρίου N. (επιφάνεια 9 είναι η υπερυψωμένη οροφή του κτιρίου ενώ επιφάνεια 8 η υπόλοιπη).....	69
<b>Εικόνα 77.</b> Επιλογή εργαλείου για υπολογισμό και σχεδίαση απωλειών λόγω σκίασης.....	71
<b>Εικόνα 78.</b> Αποτελέσματα σχεδίασης απωλειών λόγω σκίασης.....	71
<b>Εικόνα 79.</b> Επιλογή εργαλείου "Erase panels" και ορισμός ελάχιστου επιτρεπτού ποσοστού απωλειών σκίασης .....	72
<b>Εικόνα 80.</b> Αφαίρεση φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες λόγω σκίασης πάνω από 10% (ενδεικτικά σημειώνονται κάποια με κόκκινα βέλη).....	72
<b>Εικόνα 81.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά την απομάκρυνση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες λόγω σκίασης μεγαλύτερες από 10%.....	73
<b>Εικόνα 82.</b> Διάγραμμα ενέργειας ανά εγκατεστημένη επιφάνεια φωτοβολταϊκών πλαισίων για όλη την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου N, σε κάθε προσομοίωση .....	74
<b>Εικόνα 83.</b> Επιλογή τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη μικρότερη σε διάσταση πλευρά τους να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου .....	75
<b>Εικόνα 84.</b> Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη μικρότερη σε διάσταση πλευρά τους να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου N.....	75
<b>Εικόνα 85.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη μικρότερη σε διάσταση πλευρά τους να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της οροφής του κτιρίου .....	76
<b>Εικόνα 86.</b> Επιλογή τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων στοιβαγμένα ανά 2.....	77
<b>Εικόνα 87.</b> Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων στοιβαγμένα ανά 2 στην οροφή του κτιρίου N.....	77
<b>Εικόνα 88.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων στοιβαγμένων ανά 2 στην επιφάνεια της οροφής του κτιρίου N .....	78
<b>Εικόνα 89.</b> Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων με προσανατολισμό 20 μοίρες προς τα δυτικά (αζιμούθιο ίσο με 200 στο Skelion).....	79
<b>Εικόνα 90.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων με προσανατολισμό 20 μοίρες προς τα δυτικά .....	79
<b>Εικόνα 91.</b> Φωτοβολταϊκά συστήματα BAPV και BIPV [45] .....	80
<b>Εικόνα 92.</b> Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί στο σύστημα BIPV [50] .....	81
<b>Εικόνα 93.</b> Τοποθέτηση BIPV φωτοβολταϊκών πλαισίων στη νότια και ανατολική πλευρά του κτιρίου N.....	82
<b>Εικόνα 94.</b> Τοποθέτηση BIPV φωτοβολταϊκών πλαισίων στη βόρεια και δυτική πλευρά του κτιρίου N.....	82
<b>Εικόνα 95.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης BIPV φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα Groups 1 έως 4 είναι κατά σειρά η νότια, η βόρεια η ανατολική και η δυτική πλευρά του κτιρίου N. 83	
<b>Εικόνα 96.</b> Χαρακτηριστικά πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί στο BAPV σύστημα [51] .....	84
<b>Εικόνα 97.</b> Τοποθέτηση BIPV φωτοβολταϊκών πλαισίων στη νότια και ανατολική πλευρά του κτιρίου N.....	85

**Εικόνα 98.** Τοποθέτηση BIPV φωτοβολταϊκών πλαισίων στη βόρεια και δυτική πλευρά του κτιρίου N..... 85

**Εικόνα 99.** Αποτελέσματα προσομοίωσης BAPV φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα Groups 1 έως 4 είναι κατά σειρά η βόρεια, η νότια η δυτική και η ανατολική πλευρά του κτιρίου N. 86

**Εικόνα 100.** Τύπος υπολογισμού NPV [52]..... 87

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1.</b> Τελικές διαστάσεις σχεδιασμού του κτιρίου .....	38
<b>Πίνακας 2.</b> Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων πλαισίων [43] .....	61
<b>Πίνακας 3.</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων εγκατάστασης των τριών διαφορετικών τύπων πλαισίων.....	68
<b>Πίνακας 4.</b> Αποτελέσματα προσομοιώσεων για την υπερυψωμένη οροφή του κτιρίου N, μετά την απομάκρυνση φωτοβολταϊκών πλαισίων με διαφορετικό κάθε φορά μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης .....	73
<b>Πίνακας 5.</b> Αποτελέσματα προσομοιώσεων για την υπόλοιπη οροφή του κτιρίου N, μετά την απομάκρυνση φωτοβολταϊκών πλαισίων με διαφορετικό κάθε φορά μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης .....	74
<b>Πίνακας 6.</b> Αποτελέσματα χαρακτηριστικών μεγεθών σε κάθε πλευρά του κτιρίου N .....	83
<b>Πίνακας 7.</b> Τιμές μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υπολογισμό των οικονομικών δεικτών .....	88
<b>Πίνακας 8.</b> Σύγκριση οικονομικών δεικτών για την τοποθέτηση 3 διαφορετικών τύπων πλαισίων στην υπερυψωμένη οροφή του κτιρίου N.....	88
<b>Πίνακας 9.</b> Σύγκριση οικονομικών δεικτών για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων με διαφορετικό κάθε φορά μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απωλειών λόγω σκίασης .....	89
<b>Πίνακας 10.</b> Σύγκριση οικονομικών δεικτών για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οροφή του κτιρίου N με διαφορετικό κάθε φορά τρόπο.....	90