

# Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη φωτοβολταϊκού συστήματος  
συνδεδεμένου στο ηλεκτρικό δίκτυο με  
Φ/B μονάδες διπλής όψης με χρήση του  
λογισμικού PVsyst

Study of a grid-connected photovoltaic system  
with bifacial PV modules using the PVsyst  
software



Κυριακόπουλος Ιωάννης

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρακάκης (Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος

Δρ. Σεργάκη Ελευθερία ΕΔΙΠ

Χανιά, Αύγουστος 2024

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ από καρδιάς τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Σοφία, καθώς και τα αδέρφια μου, Ζαχαρία και Ιάσωνα, για την αδιάκοπη υποστήριξη, την αγάπη και την ενθάρρυνσή τους σε κάθε μου βήμα. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για την πολύτιμη συμβολή τους, και ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Σταυραράκη, και την Δρ. Σεργάκη Ελευθερία ΕΔΙΠ, για την καθοδήγηση, την υπομονή και την αφοσίωση τους καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου για την αμέριστη στήριξή τους και την ενθάρρυνσή τους στις δύσκολες στιγμές.

# Contents

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>6</b>
1.1	Ενεργειακό Πρόβλημα . . . . .	6
1.2	Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας . . . . .	8
1.2.1	Αιολική Ενέργεια . . . . .	8
1.2.2	Υδροηλεκτρική Ενέργεια . . . . .	9
1.2.3	Ηλιακή Ενέργεια . . . . .	10
1.2.4	Γεωθερμία . . . . .	11
1.2.5	Βιομάζα . . . . .	12
1.3	Ερευνητικά Ερωτήματα της Εργασίας . . . . .	12
1.4	Δομή της Εργασίας . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Τα φωτοβολταϊκά γενικά</b>	<b>14</b>
2.1	Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο . . . . .	14
2.2	Ηλιακά Κύτταρα . . . . .	15
2.2.1	Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο . . . . .	15
2.2.2	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο . . . . .	16
2.2.3	Μισές κυψέλλες (half-cell technology) . . . . .	16
2.2.4	Τεχνολογία PERC . . . . .	17
2.2.5	Φ/B πλαίσια διπλής όψης (bifacial) . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Αναλυτικότερα για τα Φ/B πλαίσια διπλής όψης</b>	<b>19</b>
3.1	Παράμετροι των Φ/B διπλής όψης . . . . .	19
3.2	Παράγοντες Σχεδίασης Bifacial Συστημάτων . . . . .	20
3.2.1	Albedo . . . . .	20
3.2.2	Ανύψωση από το έδαφος . . . . .	24
3.2.3	Αξονική απόσταση (Pitch) . . . . .	26
3.2.4	Επισκίαση από την Βάση Στήριξης . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων</b>	<b>29</b>
4.1	Τοποθεσία του συστήματος . . . . .	29
4.2	Σχεδιασμός Συστήματος . . . . .	31
4.2.1	Γενικές Παράμετροι Συστημάτων . . . . .	31

4.2.2	Παράμετροι Monofacial Συστήματος . . . . .	33
4.2.3	Παράμετροι σχεδίασης Bifacial Συστήματος σταθερών βάσεων στήριξης	37
4.3	Αποτελέσματα προσωμοιώσεων συστημάτων . . . . .	37
4.3.1	Προσωμοίωση Monofacial Συστήματος Σταθερών Βάσεων . . . . .	37
4.3.2	Προσωμοίωση Bifacial Συστήματος Σταθερών Βάσεων . . . . .	57
4.4	Σύγκριση των συστημάτων . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Οικονομική Μελέτη</b>	<b>79</b>
5.1	Παρουσίαση Οικονομικών Δεδομένων . . . . .	79
5.2	Εισαγωγή Δεδομένων Στο PnSyst . . . . .	82
5.3	Αποτελέσματα Οικονομικής Μελέτης . . . . .	85
5.4	Οικονομική μελέτη monofacial συστήματος . . . . .	91
5.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων οικονομικής μελέτης . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα και προτάσεις για μελέτη</b>	<b>96</b>
<b>7</b>	<b>Αναφορές Συστημάτων από το PVsyst</b>	<b>97</b>
7.1	Monofacial Σύστημα . . . . .	97
7.2	Bifacial Σύστημα . . . . .	112
<b>8</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>127</b>



## Περίληψη

Η ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάγκη για την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> στον πλανήτη, καθιστά αναγκαία την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μία από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που έχει δείξει ότι μπορεί να αντικαταστήσει, σταδιακά, τα ορυκτά καύσιμα, είναι η ηλιακή ενέργεια, μέσω της χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, των οποίων η τεχνολογία εξελίσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα να αυξάνεται συνεχώς η απόδοση τους. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει σε μια τέτοια τεχνολογία, αυτή των Φ/B πλαισίων διπλής όψης ή bifacial PV modules. Περιγράφονται οι συνηθέστερες τεχνολογίες κατασκευής Φ/B πλαισίων, ενώ αναλύονται και οι σημαντικότερες παράμετροι και οι πιο καίριοι παράγοντες σχεδίασης συστημάτων με χρήση Φ/B διπλής όψης. Ακολουθεί η σχεδίαση και προσομοίωση μιας εγκατάστασης 250 kWp με την χρήση bifacial P/V πλαισίων και η σύγκριση της απόδοσης της με την απόδοση ίδιας εγκατάστασης αλλά με χρήση συμβατικών monofacial πλαισίων. Τέλος, πραγματοποιείται οικονομική μελέτη, αναλύοντας τα συμπεράσματα ώστε να βρεθεί κατά πόσο είναι οικονομικά βιώσιμη αυτή η τεχνολογία.

## Λέξεις Κλειδιά

Φ/B, Φωτοβολταϊκά, διπλής όψης, κλίση, αξονική απόσταση, ΑΠΕ, λευκαύγεια, ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας, καθαρά παρούσα αξία

## **Abstract**

The ever-increasing demand for electrical energy and the need to reduce CO<sub>2</sub> emissions globally make the use of renewable energy sources necessary. One of the renewable energy sources that has shown potential to gradually replace fossil fuels is solar energy, through the use of photovoltaic (PV) systems, whose technology has rapidly advanced in recent years, resulting in a continuous increase in their efficiency. This thesis focuses on such a technology, specifically bifacial PV modules. The most common technologies for manufacturing PV panels are described, and the most significant parameters and crucial design factors for systems using bifacial PV modules are analyzed. A design and simulation of a 250 kWp installation using bifacial PV modules is then presented, and its performance is compared with the performance of a similar installation using conventional monofacial panels. Finally, an economic study is conducted, analyzing the findings to determine the economic viability of this technology.

## **Keywords**

Bifacial, Monofacial, PV, Photovoltaics, LCOE, NPV, Bifacial Gain (BG%), pitch, albedo, tilt

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ενεργειακό Πρόβλημα

Η ανθρωπότητα έχει όλο και μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες ως αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού, του επιπέδου ζωής του πληθυσμού και της χρήσης της τεχνολογίας σε όλο και περισσότερους τομείς. Η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας φαίνεται από το διάγραμμα του figure 1 (1).

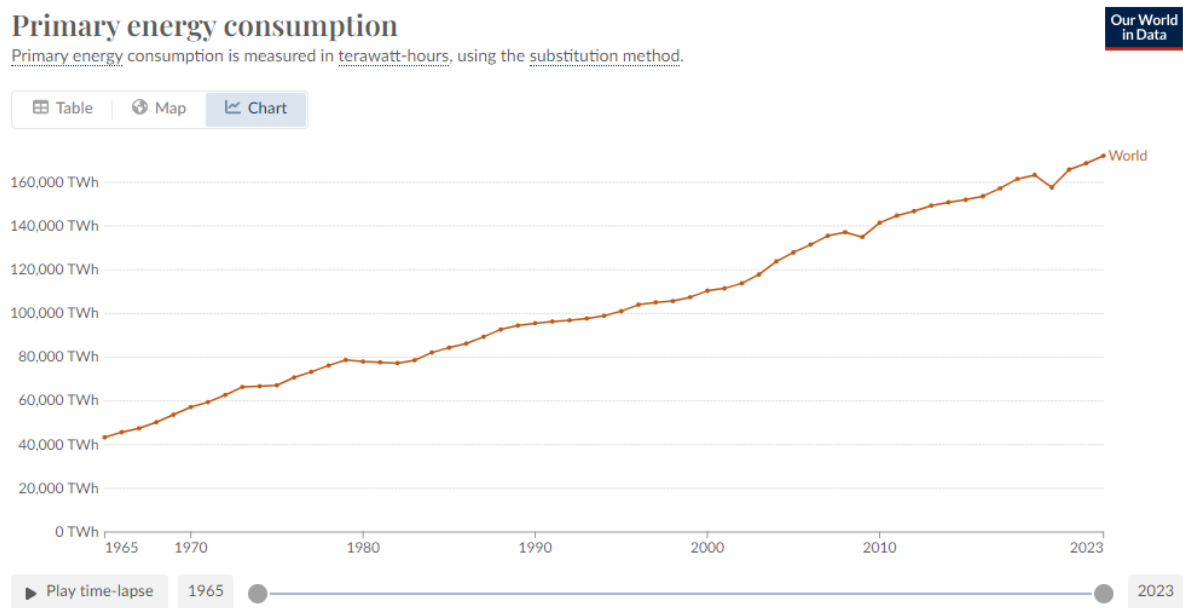


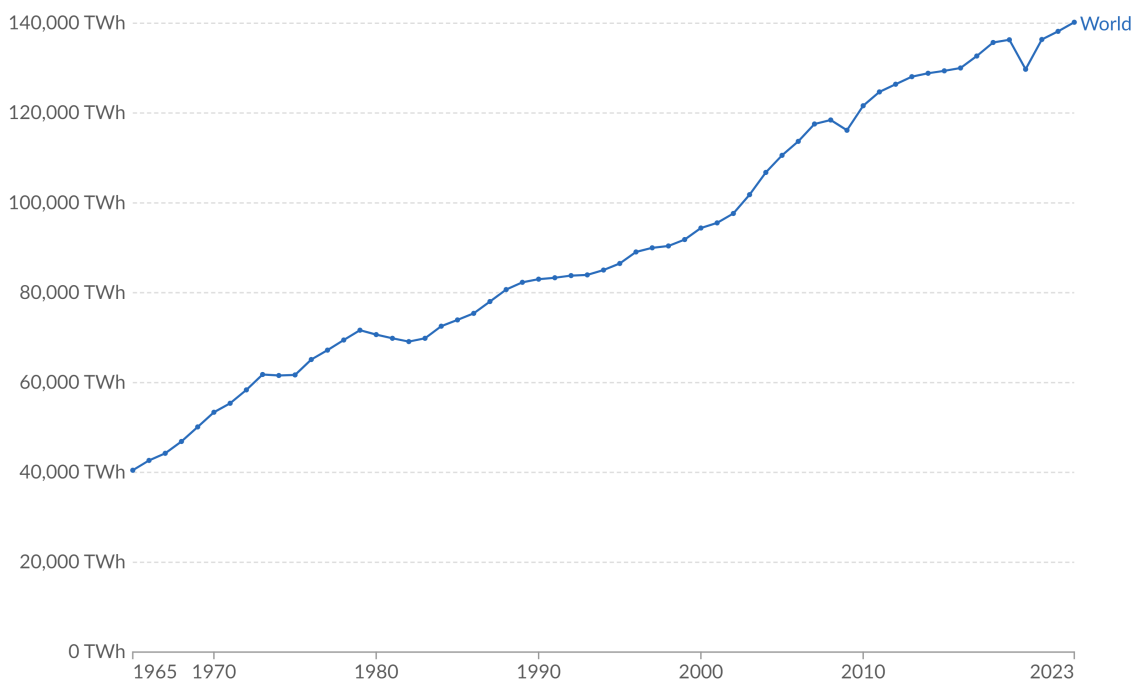
Figure 1: Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση, 1965-2023

Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται από την ανθρωπότητα, προέρχεται από την χρήση ορυκτών πόρων. Οι κύριοι ορυκτοί πόροι που χρησιμοποιούνται είναι ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο. Αυτές οι πηγές δεν είναι ανεξάντλητες και παρά το γεγονός αυτό, στηρίζομαστε σε πολύ μεγάλο ποσοστό σε αυτές, περίπου 80% (2), για την παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια που καταναλώνουμε ως ανθρωπότητα που προέρχεται από ορυκτούς πόρους, φαίνεται στο διάγραμμα του figure 2.

## Fossil fuel consumption

Measured in terawatt-hours<sup>1</sup>.

Our World  
in Data



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)

OurWorldInData.org/energy | CC BY

1. **Watt-hour:** A watt-hour is the energy delivered by one watt of power for one hour. Since one watt is equivalent to one joule per second, a watt-hour is equivalent to 3600 joules of energy. Metric prefixes are used for multiples of the unit, usually: - kilowatt-hours (kWh), or a thousand watt-hours. - Megawatt-hours (MWh), or a million watt-hours. - Gigawatt-hours (GWh), or a billion watt-hours. - Terawatt-hours (TWh), or a trillion watt-hours.

Figure 2: Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση από ορυκτούς πόρους, 1965-2023

Είναι προφανές λοιπόν ότι οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις που προκύπτουν από την εξέλιξη της τεχνολογίας και την επέκταση αυτής στην υφήλιο σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού και την πεπερασμένη φύση των κοιτασμάτων των ορυκτών πόρων, συνιστούν ένα ενεργειακό πρόβλημα που μπορεί να επιφέρει επιπτώσεις σε όλη την ανθρωπότητα.

## 1.2 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Μία οδός αντιμετώπισης του ενεργειακού προβλήματος είναι η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όπως προδίδει η ονομασία τους, οι ανανώσιμες πηγές είναι ανεξάντλητες ωστόσο η αξιοποίησή τους δεν αρκεί για να αντικαταστήσουν τις μη ανανεώσιμες. Προς το παρόν καλύπτουν το περίπου το 14% των ενεργειακών μας αναγκών (3). Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες τέτοιες πηγές ενέργειας.

### 1.2.1 Αιολική Ενέργεια

Η Αιολική Ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική με την χρήση ανεμογεννητριών. Είναι από τις πιο δημοφιλείς ανανεώσιμες πηγες και η χρήση της αυξάνεται σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο.



Figure 3: Αιολικό Πάρκο

### 1.2.2 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η πιο δημοφιλής και παλαιότερη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας. Καταλαμβάνει περίπου το 50% της ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές.(3) Τα υδροηλεκτρικά έργα αξιοποιούν την μηχανική ενέργεια του νερού και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική με την χρήση υδροστροβίλλων.

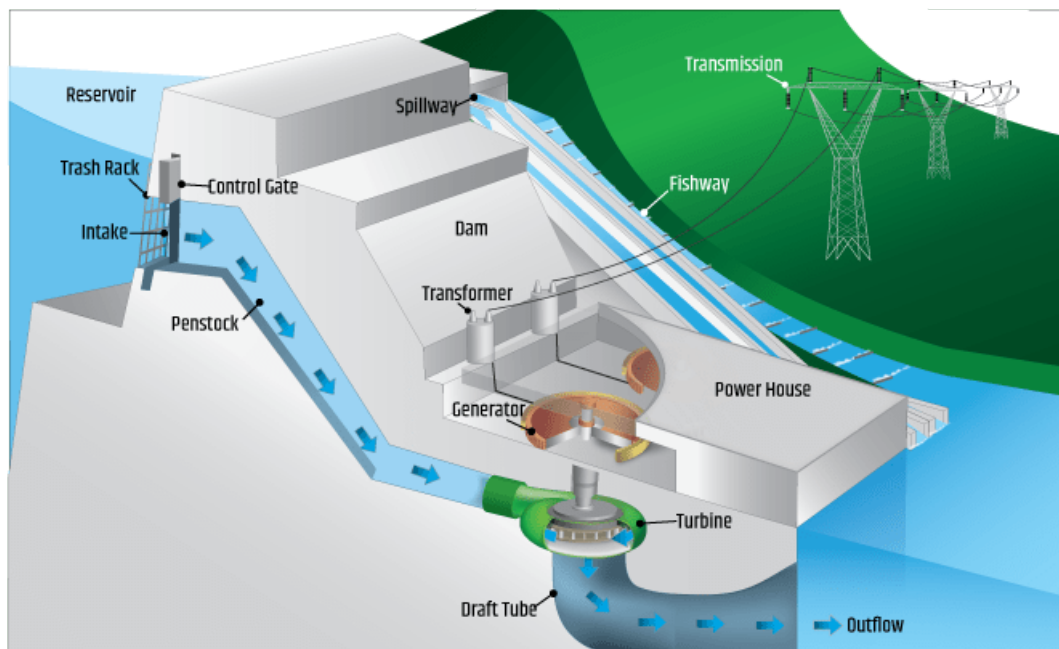


Figure 4: Σχεδιάγραμμα Υδροηλεκτρικού Έργου

### 1.2.3 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αφορά την εκμετάλλευση της ακτινοβολίας του ήλιου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή την θέρμανση. Αυτό επιτυγχάνεται με παθητικά ηλιακά συστήματα, ενεργειακά ηλιακά συστήματα και φωτοβολταϊκά συστήματα. Στην εικόνα του figure 5 φαίνεται ένα τέτοιο φωτοβολταϊκό σύστημα.



Figure 5: Φωτοβολταϊκό Πάρκο στην Ιταλία

Η λειτουργία των Φ/Β καθώς και οι κύριες τεχνολογίες βελτίωσης της απόδοσης τους αναπτύσσονται σε επόμενες ενότητες.

#### 1.2.4 Γεωθερμία

Η γεωθερμία αφορά την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας της Γης που διαρρέει προς την επιφάνεια. Χρησιμοποιείται για την θέρμανση χώρων, την ξήρανση προϊόντων και εν μέρει, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

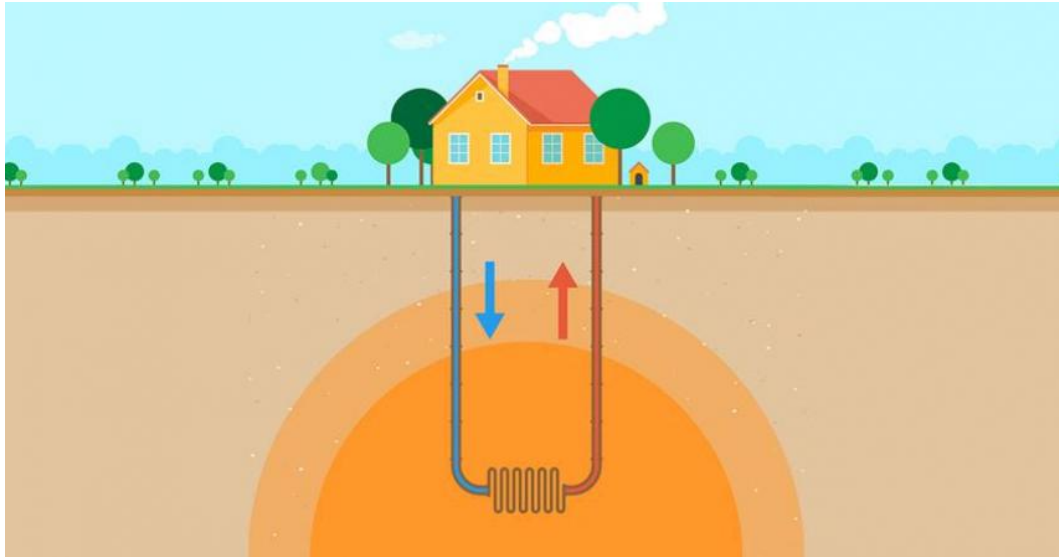


Figure 6: Σχεδιάγραμμα απλού συστήματος εκμετάλλευσης γεωθερμίας



### 1.2.5 Βιομάζα

Ως βιομάζα χαρακτηρίζονται τα οικιακά ή βιομηχανικά απόβλητα οργανικής φύσης, από τα οποία, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας, δημιουργούνται βιοκαύσιμα όπως το βιοντίζελ. Επίσης μπορεί να παραχθεί ενέργεια από την απευθείας καύση τους.



Figure 7: Βιομάζα προς καύση

## 1.3 Ερευνητικά Ερωτήματα της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός συστήματος φωτοβολταϊκών με την χρήση πάνελ διπλής όψεως, μέσα από το λογισμικό PVsyst. Προκειμένου να επιτευχθεί σωστή σχεδίαση, αναλύονται οι επικρατέστερες τεχνολογίες των Φ/Β πλαισίων και προσδιορίζονται οι παράμετροι σχεδίασης των συστημάτων. Γίνεται καταγραφή αποτελεσμάτων για σύστημα με χρήση συμβατικών πλαισίων και με χρήση πλαισίων διπλής όψεως καθώς και η σύγκριση αυτών. Γίνεται επίσης οικονομική μελέτη για να προσδιοριστεί η οικονομική βιωσιμότητα των υλοποιημένων συστημάτων και να κριθεί αν η χρήση της τεχνολογίας διπλής όψεως είναι οικονομικά συμφέρουσα.

## 1.4 Δομή της Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας έγινε μια εισαγωγή στο ενεργειακό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα καθώς και μια εισαγωγή στις κυριότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας αναλύθηκε η λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και οι κυριότερες τεχνολογίες τους, συμπεριλαμβανομένης και της τεχνολογίας διπλής όψεως.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύθηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν την σχεδίαση Φ/B συστημάτων με την χρήση πλαισίων διπλής όψεως.

Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε ο σχεδιασμός των δύο συστημάτων, ένα με την χρήση συμβατικών πλαισίων και ένα με την χρήση πλαισίων διπλής όψεως. Επιλέχθηκε η τοποθεσία, ο εξοπλισμός και έγινε ο ορισμός των παραμέτρων. Έπειτα, έγινε καταγραφή των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων των δύο συστημάτων μέσα από διαγράμματα του λογισμικού PVsyst και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο έγινε οικονομική μελέτη των δύο συστημάτων και η απαραίτητη σύγκριση ώστε να κριθεί η οικονομική βιωσιμότητα των σχεδιάσεων.

## 2 Τα φωτοβολταϊκά γενικά

### 2.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Φωτοηλεκτρικό, ονομάζεται το φαινόμενο απελευθέρωσης ηλεκτρονίων από σώμα, όταν προσπίπτει σε αυτό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να φορτιστεί το σώμα, η προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πρέπει να είναι συχνότητας, μεγαλύτερης ή ίσης από μία ορισμένη τιμή. (4) Η τιμή αυτή ονομάζεται οριακή συχνότητα  $f_0$ . Εφ' όσον η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη της  $f_0$  τότε ο αριθμός των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων είναι ανάλογος της έντασης  $J$  της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η εκπομπή ηλεκτρονίων, συμβαίνει σχεδόν ταυτόχρονα με την πρόσπτωση της ακτινοβολίας στο σώμα. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πάνελ, αφού τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την πρόσπτωση του φωτός του Ηλίου, προσδίδουν την ηλεκτρική ενέργεια στο συνδεδεμένο φορτίο.

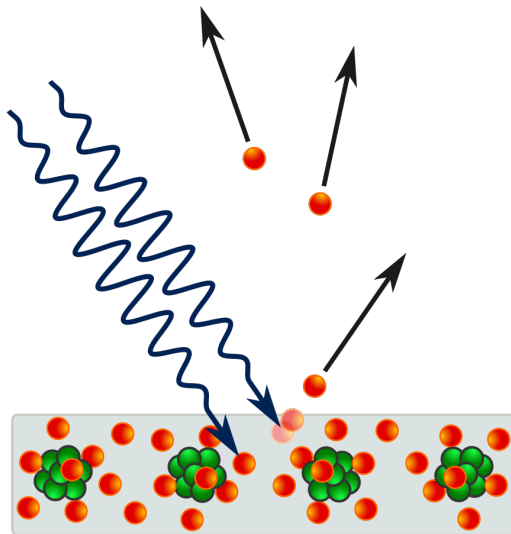


Figure 8: Σχηματική αναπαράσταση φωτοηλεκτρικού φαινομένου

## 2.2 Ηλιακά Κύτταρα

Τα ηλιακά κύτταρα είναι η μικρότερη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία. Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελείται από πολλά ηλιακά κύτταρα, συνήθως 32, 36, 48, 60, 72 ή και 96. Μετά απο μελέτες, στην αγορά το υλικό που έχει επικρατήσει στην κατασκευή των ηλιακών κυττάρων είναι το κρυσταλλικό πυρίτιο (Si), λόγω της απόδοσης και της ανθεκτικότητας σε φυσικά κοιτάσματα. Παρακάτω, αναλύονται οι συνηθέστερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά πανελ.

### 2.2.1 Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Η χρήση μονοκρυσταλλικού πυριτίου αποτελεί την πιο παραδοσιακή μέθοδο κατασκευής φωτοβολταϊκών πάνελ. Τα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου αρακτηρίζονται από τον υψηλό βαθμό απόδοσης, την αντοχή τους και τον μειωμένο χώρο που καταλαμβάνουν. Είναι αναγνωρίσιμα από τις εγχοπές στις γωνίες των ηλιακών κυττάρων του πάνελ (5) καθώς και από το σκούρο μαύρο χρώμα τους. Λόγω της μεγάλης τους απόδοσης και αντοχής, το κόστος είναι επίσης μεγάλο.



Figure 9: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

### 2.2.2 Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Τα πλαίσια από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι πιο εύκολο και γρήγορο να κατασκευαστούν από τα αντίστοιχα μονοκρυσταλλικά, οπότε και το κόστος τους είναι μικρότερο. Ωστόσο, η απόδοση τους είναι χαμηλότερη και επηρεάζονται πιο πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Είναι αναγνωρίσιμα, από το τετράγωνο σχήμα των κυττάρων (απουσία εγχοπών) και το μπλε χρώμα τους (5).



Figure 10: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

### 2.2.3 Μισές κυψέλλες (half-cell technology)

Στην τεχνολογία μισών κυψελών, χωρίζουμε κάθε κύτταρο στα 2 το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τον υποδιπλασιασμό του ρεύματος κάθε κυψέλλης και συνεπώς την μείωση των ωμικών απωλειών, όπως προκύπτει από την σχέση  $P = I^2 R$ . Χάρη στη μείωση των απωλειών, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης ενώ αυξάνεται και η μηχανική αντοχή των κυττάρων, καθώς η επιφάνεια τους είναι μικρότερη(5).

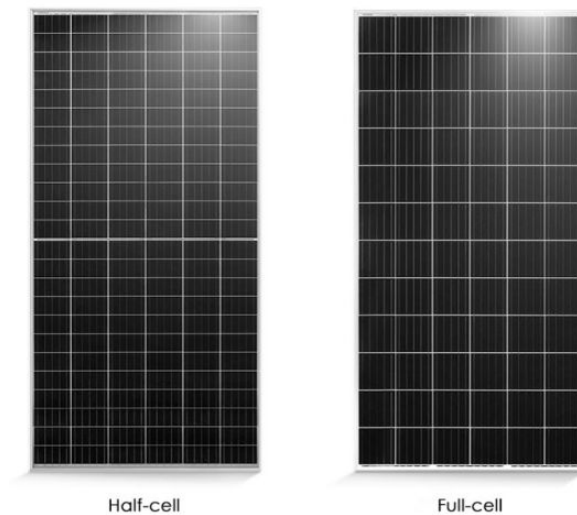


Figure 11: Σύγκριση half cell και full cell πάνελ

#### 2.2.4 Τεχνολογία PERC

Στα συμβατικά Φ/Β πλαίσια, απορροφάται μόνον μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας επειδή το πυρίτιο δεν απορροφά όλα τα μήκη κύματος αλλά και επειδή δεν προσπίπτουν όλα τα φωτόνια πάνω στο πυρίτιο. Ως αποτέλεσμα, μέρος της ακτινοβολίας προσπίπτει στην οπίσθια επιφάνεια του πλαισίου αυξάνοντας την θερμοκρασία και τις απώλειες. Στα πλαίσια PERC (passive emitter rear contact) τοποθετείται διηλεκτρικό υλικό μεταξύ της οπίσθιας επιφάνειας του πλαισίου και του χρυσταλλικού πυριτίου. Έτσι, ανακλάται μέρος της ακτινοβολίας, μειώνεται η θερμοκρασία του πλαισίου, απορροφάται εκ νέου, μέρος της ακτινοβολίας που δεν είχε απορροφηθεί προηγουμένως και βελτιώνεται η απόδοση του πλαισίου σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας.(5)

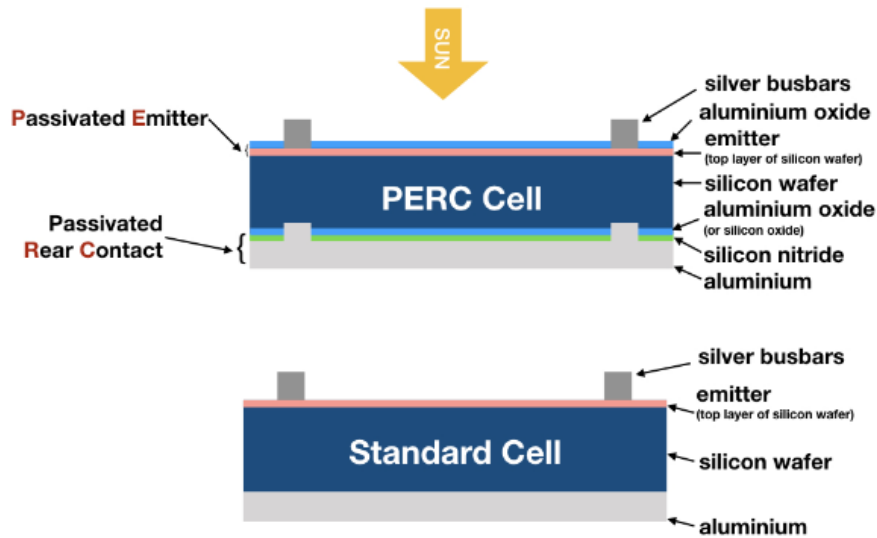


Figure 12: Σύγκριση συμβατικού και PERC πλαισίου

### 2.2.5 Φ/B πλαίσια διπλής όψεως (bifacial)

Στα συμβατικά Φ/B πλαίσια, η οπίσθια επιφάνεια είναι αδιαφανής και επιτρέπει στο πλαίσιο να απορροφά ακτινοβολία μόνο από την εμπρόσθια επιφάνεια. Τα bifacial Φ/B πλαίσια είναι κατασκευασμένα -συνήθως- από γυαλί και στις δύο όψεις τους, απορροφώντας ακτινοβολία και από τις 2 επιφάνειες. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, αυξάνεται από 5% έως 30%(5) ενώ δεν αυξάνεται κατά πολύ το κόστος κατασκευής. Η αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας, εξαρτάται από παράγοντες όπως ύψος από το έδαφος, λευκάυγεια (albedo), τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.



Figure 13: Σύγκριση πλαισίων μονής και διπλής όψης

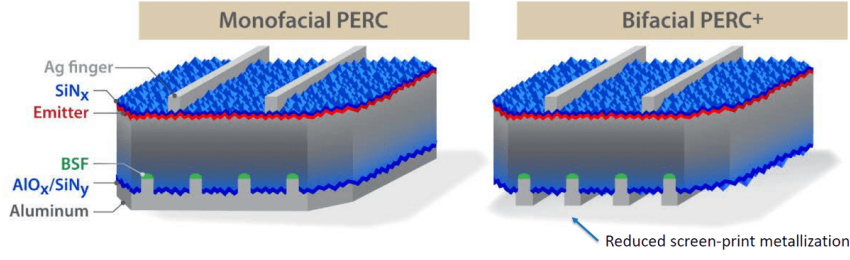


Figure 14: Σύγκριση κυττάρων μονής και διπλής όψης

### 3 Αναλυτικότερα για τα Φ/B πλαίσια διπλής όψης

#### 3.1 Παράμετροι των Φ/B διπλής όψης

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα bifacial PV είναι οι παρακάτω:

- Η απόδοση μετατροπής ( $\eta_{Bifacial}$ ) που είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος  $P_m$  (W), προς την προσπίπτουσα ισχύ  $E$  ( $W/m^2$ ). Ο λόγος αυτός μετράται ξεχωριστά για την εμπρόσθια και οπίσθια όψη του πάνελ.

$$\frac{P_{m_{front/rear}}}{E_{front/rear} * A}$$

- Ο Bifaciality factor ( $\Phi$ ) ο οποίος ουσιαστικά καθορίζει την πρόσθετη ενέργεια που θα παραχθεί από την πίσω πλευρά του πλαισίου. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να υπολογισθεί, χρησιμοποιώντας την ισχύ, την πυκνότητα ρεύματος, την τάση και την απόδοση. Ο συνηθέστερος είναι ο λόγος της ισχύος της οπίσθιας επιφάνειας προς την ισχύ της εμπρόσθιας. (6)

$$\Phi P_{max} = \frac{P_{m_{rear}}}{P_{m_{front}}}$$

- Το bifacial gain (BG) το οποίο μας δείχνει το κέρδος του bifacial συστήματος σε σχέση με το κέρδος ενός monofacial κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Εκφράζεται ως ποσοστό που προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$BG(\%) = \frac{Y_{bifacial} - Y_{monofacial}}{Y_{monofacial}} * 100$$



## 3.2 Παράγοντες Σχεδίασης Bifacial Συστημάτων

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι παράγοντες σχεδιασμού των bifacial συστημάτων οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα το bifacial gain.

### 3.2.1 Albedo

Η albedo ή λευκαύγεια είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην σχεδίαση bifacial φωτοβολταικών συστημάτων καθώς επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πίσω μέρος των πλαισίων άρα και το bifacial gain. Σε προσωμοίωση με πλάτος πλαισίου 2 μέτρα, pitch 6 μέτρα και κλίση πλαισίων 30 μοιρών σε ανύψωση μισού μέτρου, προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα:(7)

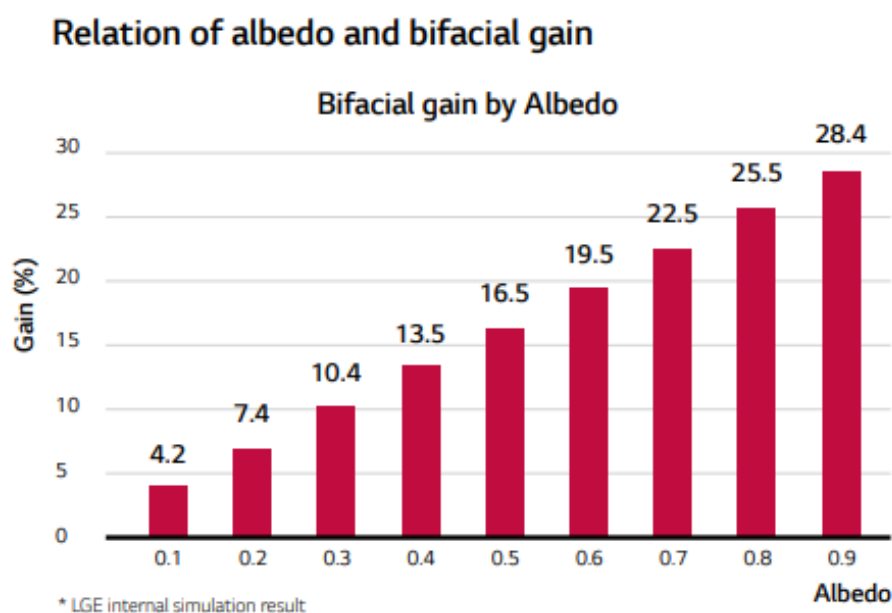


Figure 15: Αύξηση bifacial gain σε σχέση με την αύξηση της albedo

Relation of albedo and irradiation on backside

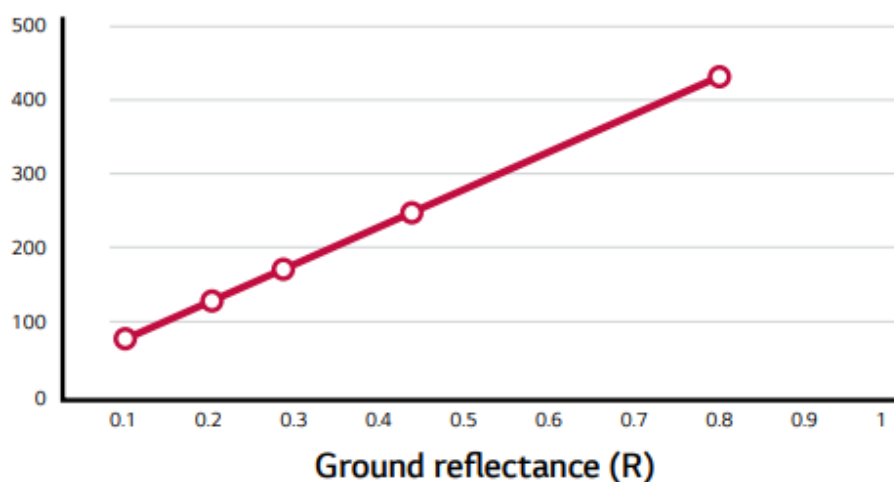


Figure 16: Αύξηση προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην οπίσθια πλευρά

Η σημαντική επιρροή της albedo στο bifacial gain σημαίνει ότι πρέπει να γίνει υπολογισμός αυτής, στην περιοχή ενδιαφέροντος. Γενικά ακολουθούνται 3 μέθοδοι προσδιορισμού της της albedo:

- Χρήση πινάκων τιμών αναφοράς: Οι τιμές στους πίνακες αυτούς, προκύπτουν από την επιθεώρηση της τοποθεσίας της εγκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψην στοιχεία όπως, το χρώμα, το υλικό και το ανάγλυφο του εδάφους. Τέτοιοι πίνακες, παρέχονται πολλές φορές από λογισμικά προσομοιώσεων, όπως το PVsyst. Παρακάτω παρατίθεται ένας τέτοιος πίνακας:

Surface	Albedo
Grass	0.15 - 0.25
Fresh snow	0.82
Wet snow	0.55-0.75
Dry asphalt	0.09-0.15
Concrete	0.25-0.35
Aluminum	0.85
New galvanized steel	0.35
Very dirty galvanized	0.08

\* Source : PVsyst

Figure 17: Πίνακας τιμών albedo για διάφορες επιφάνειες

- Μέτρηση της albedo της εγκατάστασης με τη χρήση πυρανόμετρου (pyranometer). Το πυρανόμετρο, πρέπει να τοποθετηθεί σε ύψος τουλάχιστον μισού μέτρου από το έδαφος, στο κέντρο της τοποθεσίας προς μελέτη. Εφ' όσον συλλέξουμε τα δεδομένα αυτά, επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για τουλάχιστον άλλα 5 σημεία της τοποθεσίας, έτσι ώστε να επιτύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο απαιτείται προσοχή, καθώς στα σημεία που θα χρησιμοποιήσουμε το πυρανόμετρο, δεν πρέπει να υπάρχουν σκιές ή άλλα εμπόδια. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα ενός πυρανόμετρου σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση:



Figure 18: Πυρανόμετρο σε εγκατάσταση

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η χρήση πυρανομέτρου είναι η συνιστώμενη μέθοδος υπολογισμού της albedo μιας εγκατάστασης.

- Μέτρηση με την χρήση monofacial PV πλαισίου. Εγκαθιστούμε το monofacial πλαίσιο σε διαφορετικές θέσεις της συστοιχίας και παίρνουμε δύο μετρήσεις στην κάθε θέση. Στην πρώτη, το πλαίσιο κοιτάει προς τον ουρανό και στην δεύτερη κοιτάει προς το έδαφος. Έτσι για κάθε τοποθεσία που εγκαταστήσαμε προσωρινά το πλαίσιο, λαμβάνουμε 2 τιμές,  $I_{sc_{sky}}$  και  $I_{sc_{ground}}$ . Η τοπική albedo προκύπτει από την πράξη:

$$albedo = \frac{I_{sc_{ground}}}{I_{sc_{sky}}}$$

Η albedo της εγκατάστασης προδιορίζεται βρίσκοντας τον μέσο όρο των διαφόρων τοπικών μετρήσεων της.(7)

### 3.2.2 Ανύψωση από το έδαφος

Ως ανύψωση από το έδαφος ορίζουμε την απόσταση του κατωτάτου σημείου του πλαισίου από το έδαφος. Τοποθετώντας τα πλαίσια σε απόσταση από το έδαφος, εξασφαλίζουμε την πρόσπτωση μεγαλύτερης ποσότητας ακτινοβολίας από την ανάκλαση στο έδαφος, στην πίσω επιφάνεια του bifacial πλαισίου, άρα και μεγαλύτερο bifacial gain. Σύμφωνα με μελέτη της LG και όπως φαίνεται στο γράφημα "figure 12", το bifacial gain αυξάνεται συνεχώς μέχρι και ανύψωση περίπου ενός μέτρου, όπου και παρατηρείται κορεσμός.

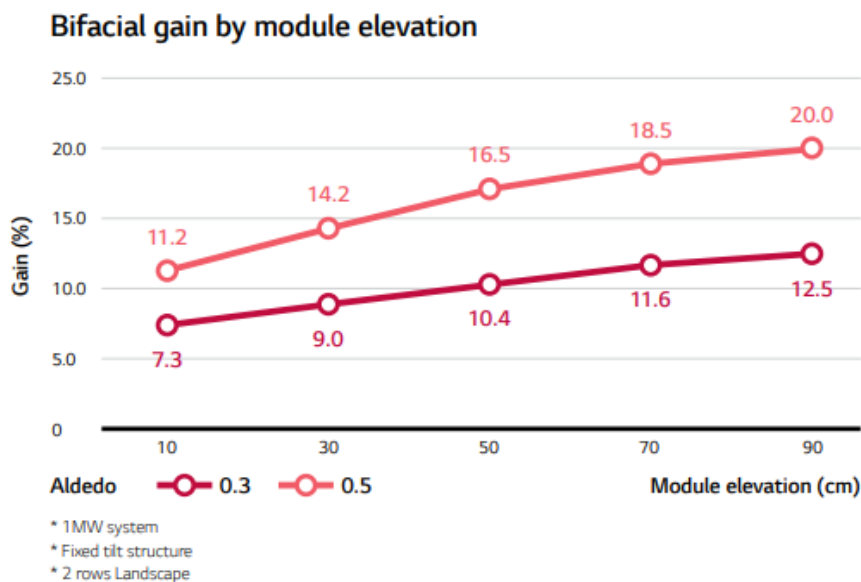
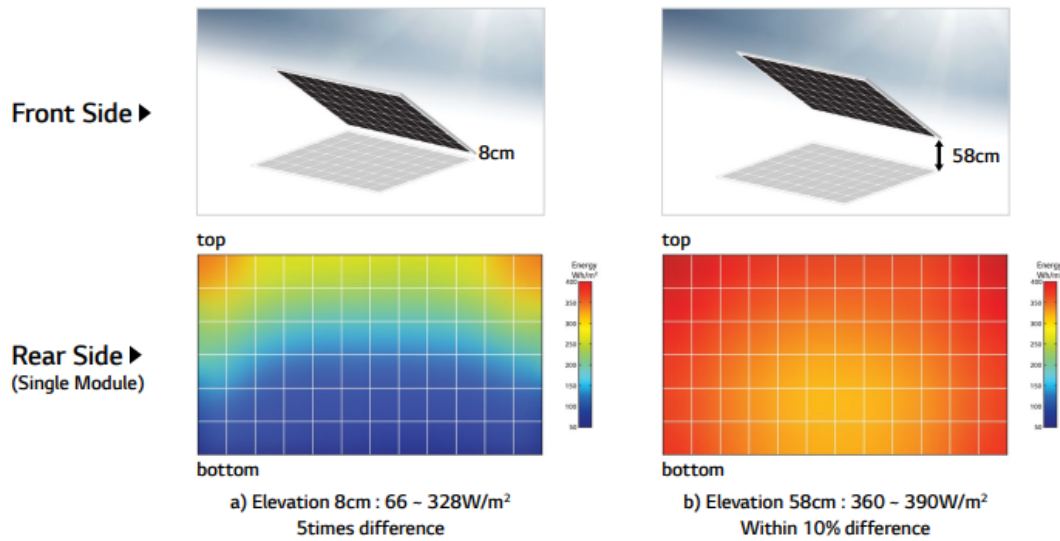


Figure 19: Σχέση ανύψωσης και bifacial gain για διαφορετικές τιμές albedo

Η ανύψωση του πάνελ επηρεάζει και την ομοιομορφία του ανακλώμενου φωτός. Σε περίπτωση που η ανύψωση είναι μικρή, η ποσότητα της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην πίσω μεριά του πάνελ, διαφέρει από σημείο σε σημείο, λόγω της σκιάς του ίδιου του πάνελ. Τα κύτταρα στα υψηλότερα σημεία του πλαισίου, απορροφούν περισσότερο φως από τα υπόλοιπα κύτταρα. Για ανύψωση 8 εκατοστών, η υψηλότερη τιμή της ακτινοβολίας που απορροφάται από τα κύτταρα του πλαισίου, είναι ίση με πέντε φορές την χαμηλότερη τιμή. Όσο αυξάνεται η ανύψωση, τόσο μειώνονται οι αποκλίσεις. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς οι αποκλίσεις αυτές οδηγούν σε απώλεια κέρδους.

### Irradiance Distribution of Backside in Single Module



\* Source : PV MODULE POWER GAIN DUE TO BIFACIAL DESIGN. PRELIMINARY EXPERIMENTAL AND SIMULATION DATA. (2010 IEEE)  
\* Test condition : horizontal irradiation 1006W/m<sup>2</sup>, Albedo 50%, Tilt angle 30deg

Figure 20: Σχέση ανύψωσης και bifacial gain για διαφορετικές τιμές albedo

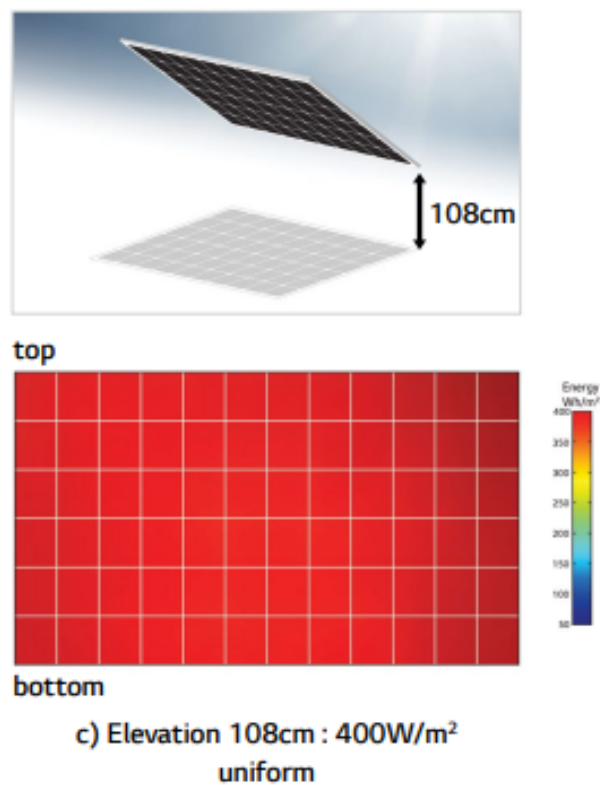


Figure 21: Σχέση ανύψωσης και bifacial gain για διαφορετικές τιμές albedo

### 3.2.3 Αξονική απόσταση (Pitch)

Ένας ακόμη πολύ σημαντικός παράγοντας για την σχεδίαση bifacial PV εγκαταστάσεων, είναι η αξονική απόσταση (pitch) μεταξύ των πάνελ. Το μέγεθος αυτό είναι άμεσα συνδεδεμένο με τον λόγο κάλυψης εδάφους (ground coverage ratio-GCR).

$$GCR = \frac{ModuleArea}{GroundArea}$$

Από το figure 15 είναι προφανές ότι αυξάνοντας την αξονική απόσταση, μειώνεται ο λόγος κάλυψης του εδάφους, γεγονός που επιτρέπει την απορρόφηση μεγαλύτερης ποσότητας ακτινοβολίας από την οπίσθια όψη των πλαισίων

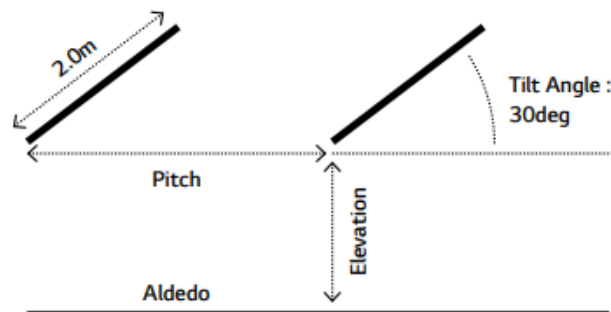


Figure 22: αξονική απόσταση

Έτσι, για μικρότερο GCR έχουμε και μεγαλύτερο bifacial gain. (7)

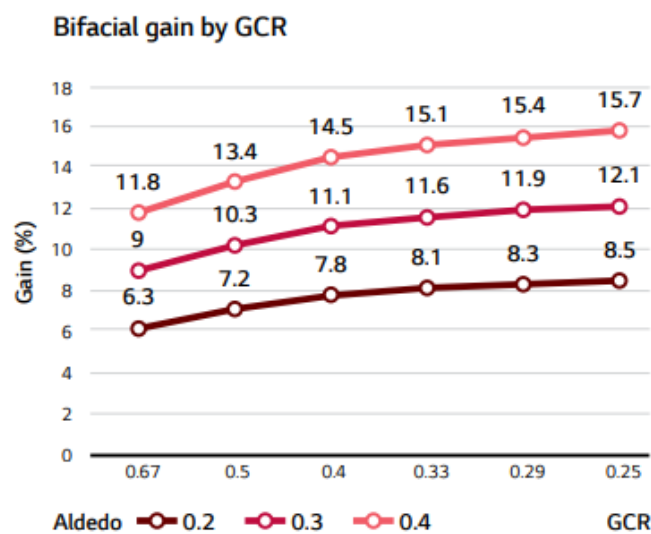


Figure 23: σχέση bifacial gain και GCR για διάφορες τιμές albedo

### 3.2.4 Επισκίαση από την Βάση Στήριξης

Οι βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, εμποδίζουν μέρος του ανακλώμενου φωτός από το να φτάσει στην πίσω μεριά των πλαισίων και έτσι επηρεάζει το bifacial gain. Πιο συγκεκριμένα, οι παράγοντες που επηρεάζουν το bifacial gain είναι (7):

- Το πάχος και το πλάτος της τεγίδας στήριξης (mounting rail).
- Ο αριθμός τεγίδων που στηρίζουν τα πλαίσια.
- Το σχήμα και ο τρόπος τοποθέτησης των τεγίδων.
- Η απόσταση των τεγίδων από τα πλαίσια.



**Mounting structure for bifacial (Rail on edge of module)**

\* Source : OPSUN bifacial Racking System.

Figure 24: απεικόνιση βάσης σταθερής στήριξης

Παρακάτω, παρατίθενται γραφήματα που απεικονίζουν τα αποτελέσματα της μελέτης της LG, πάνω στις βάσεις σταθερής στήριξης, για διαφορετικό αριθμό, πάχος και ανακλαστικότητα των τεγίδων στήριξης και παρουσιάζεται και η επιρροή των παραγόντων αυτών στο bifacial gain.



### Mounting conditions

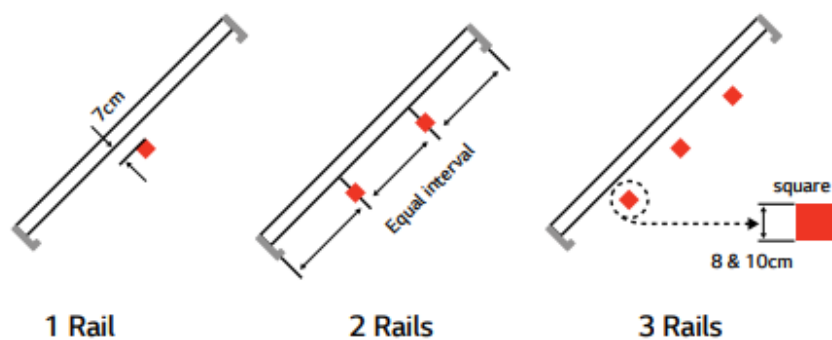


Figure 25: διαφορετικός αριθμός και πάχος τεγίδων στήριξης

### Shading loss by condition

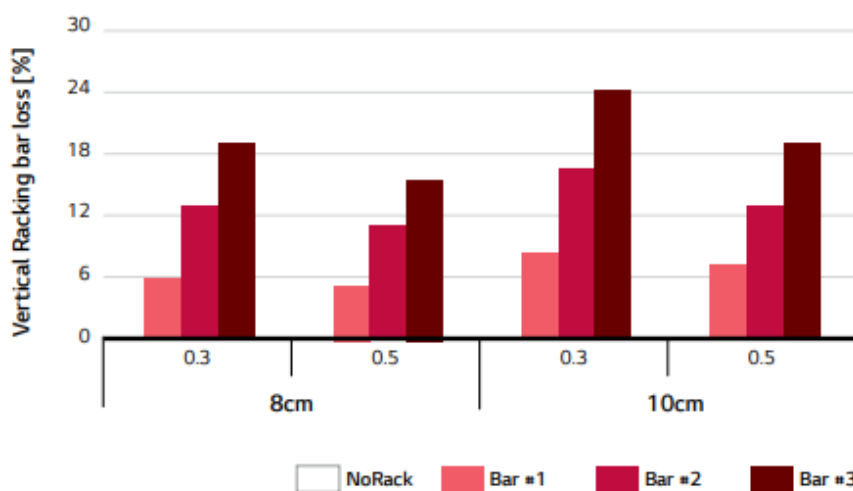


Figure 26: απώλειες επισκίασης

### Bifacial Gain by Mounting

Rail size	Rail reflectivity	Bifacial gain [%]			
		No Rack	1 Rail	2 Rails	3 Rails
8 cm / 3.15 in	30 %	5.95	5.62	5.14	4.79
	50 %		5.65	5.30	5.01
10 cm / 3.94 in	30 %		5.42	4.96	4.52
	30 %		5.53	5.16	4.78

Figure 27: επίδραση στο bifacial gain

## 4 Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Σε αυτήν την ενότητα, θα γίνει μοντελοποίηση μίας εγκατάστασης 250 kWp. Θα προσωμοιωθούν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις του συστήματος, μία με monofacial πλαίσια σταθερών βάσεων στήριξης και μία με bifacial πλαίσια σταθερών βάσεων στήριξης. Το πλαίσιο που θα χρησιμοποιηθεί στις 3 υλοποιήσεις είναι bifacial αλλά για τις ανάγκες της προσωμοίωσης του monofacial συστήματος θα αγνοηθεί το bifaciality του μέσω της σχετικής λειτουργίας του PVSyst. Οι υπόλοιπες παράμετροι σχεδιασμού όπως γωνία πλαισίου, αζιμούθιο, ύψος από το έδαφος και αξονική απόσταση, θα παραμείνουν σταθερά και στις τρεις περιπτώσεις.

### 4.1 Τοποθεσία του συστήματος

Ως τοποθεσία για το υποθετικό φωτοβολταϊκό σύστημα, επιλέχθηκε οικόπεδο 4.500 τ.μ. στο χωριό "Ψάρι" που βρίσκεται στο νομό Κορινθίας στον δήμο Στυμφαλίας. Οι συντεταγμένες της τοποθεσίας είναι 37.8654°N και 22.5269°E. Η επιλογή έγινε καθώς η τοποθεσία έχει καλό ηλιακό δυναμικό, ενώ βρίσκεται σε υψηλό υψόμετρο (802m) με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονη χιονόπτωση κατά τους χειμερινούς μήνες το οποίο επηρεάζει σημαντικά την albedo. Έτσι, επιλέχθηκε η δυνατότητα ορισμού εποχικής albedo. Στην παρακάτω εικόνα, είναι οι τιμές που ορίστηκαν για τον κάθε μήνα. Παρατίθενται, ο πίνακας με τα μηνιαία μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής, από την βάση δεδομένων PVGIS TMY 5.2, όπως αυτά εξάγονται μέσω του PVSyst και ο πίνακας με τις τιμές της εποχικής albedo.


	Global horizontal irradiation	Horizontal diffuse irradiation	Temperature	Wind Velocity
	kWh/m <sup>2</sup> /mth	kWh/m <sup>2</sup> /mth	°C	m/s
January	58.1	33.9	5.8	1.52
February	78.2	35.5	7.0	1.47
March	105.2	52.2	7.2	1.53
April	175.1	65.3	12.9	1.68
May	208.2	80.2	16.5	1.56
June	253.2	59.1	23.6	1.84
July	248.4	61.6	25.3	1.76
August	212.6	60.3	24.4	1.45
September	153.6	59.2	20.4	1.24
October	100.3	46.5	15.4	1.46
November	71.9	33.5	10.1	1.33
December	62.9	29.1	6.6	1.41
<b>Year</b> 	<b>1727.8</b>	<b>616.3</b>	<b>14.6</b>	<b>1.5</b>

Figure 28: Πίνακας μετεωρολογικών δεδομένων, Ψάρι Κορινθίας (database: PVGIS TMY 5.2)

**Monthly ground albedo values**

Jan.	<input type="text" value="0.900"/>	May	<input type="text" value="0.250"/>	Sep.	<input type="text" value="0.250"/>
Feb.	<input type="text" value="0.700"/>	June	<input type="text" value="0.250"/>	Oct.	<input type="text" value="0.250"/>
Mar.	<input type="text" value="0.300"/>	July	<input type="text" value="0.250"/>	Nov.	<input type="text" value="0.300"/>
Apr.	<input type="text" value="0.250"/>	Aug.	<input type="text" value="0.250"/>	Dec.	<input type="text" value="0.550"/>

☒ Set all as January

Figure 29: Πίνακας τιμών εποχικής albedo εδάφους

## 4.2 Σχεδιασμός Συστήματος

### 4.2.1 Γενικές Παράμετροι Συστημάτων

Το σύστημα που σχεδιάστηκε είναι ισχύος 250 KWp και συνδεδεμένο στο δίκτυο. Επιλέχθηκε το πλαίσιο HD108N της εταιρίας Jollywood. Το πλαίσιο είναι bifacial, μονοκρυσταλλικού πυριτίου και τεχνολογίας half-cell και ισχύος 415 Wp. Όπως προαναφέρθηκε, το ίδιο πλαίσιο θα χρησιμοποιηθεί και για την προσομοίωση του monofacial συστήματος, επιλέγοντας να αγνοηθεί το bifacial definition του.(8)

Στην συνέχεια, έγινε επιλογή του inverter Huawei Sun2000-100KTL ισχύος 100 KW. Για τις ανάγκες του συστήματος, θα τοποθετηθούν δύο inverters. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του inverter είναι τα εξής:(9)

Είσοδος (DC):

- Εύρος MPPT τάσεων : 600-1.500V
- Ονομαστική τάση : 1.080V
- Μέγιστη τάση : 1.500V
- Τάση εκκίνησης : 650V
- Αριθμός MPPT εισόδων : 6
- Αριθμός εισόδων : 12
- Μέγιστο ρεύμα ανά MPPT είσοδο : 22A
- Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης ανά MPPT είσοδο : 33A

Έξοδος (AC):

- Ονομαστική ισχύς : 100.000W
- Μέγιστη ισχύς : 105.000VA
- Μέγιστο ρεύμα : 80,2A
- Ονομαστικό ρεύμα : 72,2A
- Συντελεστής ισχύος :  $\pm 0,8$
- Μέγιστος βαθμός απόδοσης : 98,8% Χωρίς μετασχηματιστή απομόνωσης
- Μέγιστη αρμονική παραμόρφωση :  $< 3\%$

Λοιπά Τεχνικά Χαρακτηριστικά:

- Διαστάσεις : 1075×605×310mm
- Βάρος : 77kg
- Βαθμός προστασίας : IP65
- Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας : -25°C έως +60°C

Με δεδομένο ότι η απαιτούμενη ισχύς του συστήματος είναι 250KWp και κάθε πλαίσιο έχει ισχύ 415 Wp προκύπτει ότι ο αριθμός των πλαισίων που χρειαζόμαστε είναι

$$N = \frac{250KWp}{415Wp} = 602.4 = 603$$

Ο inverter δέχεται τάση 1100V ενώ η μέγιστη τάση ενός πλαισίου σε ελάχιστη θερμοκρασία σχεδίασης  $T = -10^{\circ}C$  είναι  $V_{oc} = 41V$  άρα ο μέγιστος αριθμός πλαισίων σε σειρά είναι

$$N_{\sigma} = \frac{1100V}{41V} = 26.82 = 26$$

Με 603 πλαίσια και στοιχισμένα ανά 26 σε σειρές, ο αριθμός των σειρών είναι

$$N_{\pi} = \frac{603}{26} = 23.19 = 23$$

Έτσι, ο τελικός αριθμός πλαισίων είναι  $N_{ολ} = 26 \times 23 = 598$  πλαίσια οπότε η πραγματική ισχύς του συστήματος είναι  $598 \times 415Wp = 248.17 KWp$

#### 4.2.2 Παράμετροι Monofacial Συστήματος

Για το monofacial σύστημα ορίσαμε τις παραμέτρους όπως αναλύθηκαν προηγουμένως. Πρόκειται για σύστημα με πλαίσια σταθερού άξονα οπότε από το Orientation Tab του PVsyst το σύστημα ορίστηκε ως Fixed Tilted Plane.

Για να υπολογιστούν από το λογισμικό οι επισχιάσεις που προκύπτουν από κοντινές αποστάσεις, κατασκευάστηκε με το εργαλείο του PVsyst ένα 3D Scene που απεικονίζει την τοποθέτηση των πλαισίων στο οικόπεδο (figure 30).

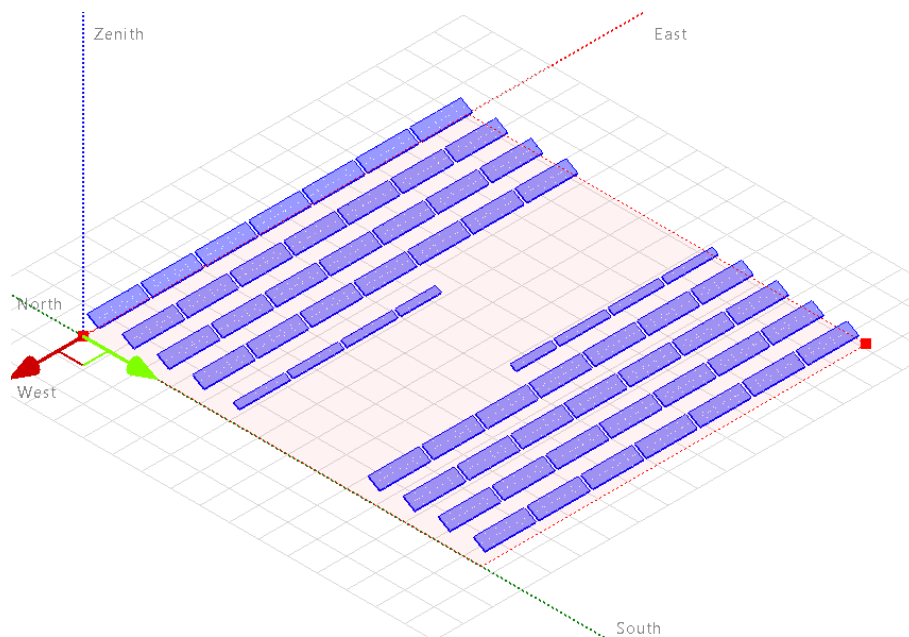


Figure 30: 3D Scene monofacial  $\Phi/B$  συστήματος


Το ύψος των tables από το έδαφος ορίστηκε στο 1.5m και θα παραμείνει σταθερό και στις τρεις υλοποιήσεις του συστήματος για να είναι πιο ακριβής η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η γωνία των πλαισίων ορίστηκε στις  $30^\circ$  και θα είναι το ίδιο και στην υλοποίηση με bifacial πλαίσια σταθερού άξονα. Το pitch επιλέχθηκε στα 6.0 μέτρα (figure 31) και στη συνέχεια αναλύεται αυτή η επιλογή.

Ο υπολογισμός του pitch προέκυψε από την σχέση του διαγράμματος Monegon (figure 32) το οποίο είναι μια εμπειρική συνάρτηση για την αποφυγή σκιάσεων μεταξύ των πλαισίων, συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής. (10)

Selected zone parameters

Zone label

Area **4476.29 m<sup>2</sup>**

 Field properties

Azimuth  °

Pitch  m

Tables spacing  m

Align tables  ▾

Distance from ground  m

Automatic tilt ☐

Automatic length ☐

Create tracking fields ☐


 Fill zone

Figure 31: Παράμετροι 3D scene

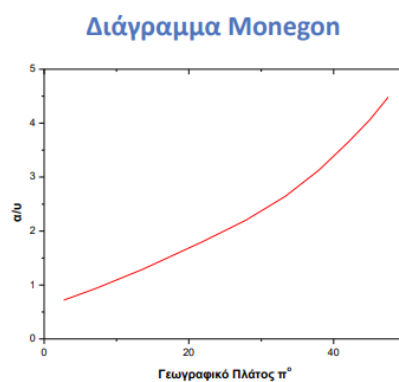


Figure 32: Διάγραμμα Monegon

Η σχέση από την οποία προκύπτει το διάγραμμα Monegon είναι η εξής:

$$\frac{\alpha}{u} = 0.0042 \times \varphi^2 - 0.1661 \times \varphi + 2.8652$$

όπου:

- $\varphi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος
- $\alpha$  είναι η απόσταση μεταξύ των προβολών των πλαισίων στο έδαφος
- $u$  το ύψος της ανώτερης ακμής του πλαισίου από το έδαφος

Οι διαστάσεις αυτές φαίνονται και στο σχεδιάγραμμα (figure 33).

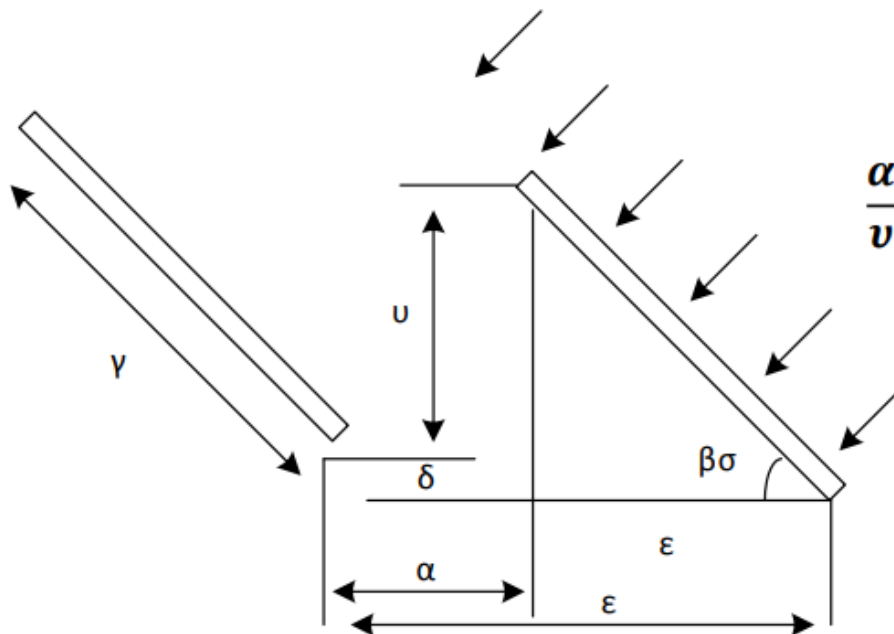


Figure 33: Σχεδιάγραμμα διαστάσεων table



Για τον υπολογισμό του  $\alpha$ , η γωνία του table θεωρήθηκε ότι είναι  $45^\circ$ . Επίσης, κάθε table αποτελείται από 10 πλαίσια στοιχισμένα όπως φαίνεται στο figure 34.

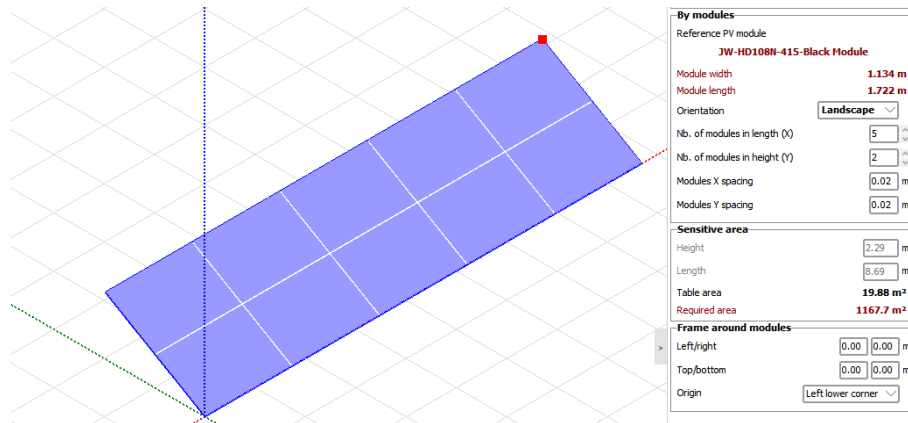


Figure 34: Σχεδιάγραμμα διαστάσεων table

Άρα η διάσταση  $\gamma$  που φαίνεται στο figure 33 θα είναι ίση με 2 φορές το πλάτος του πλαισίου. Από το PVsyst,  $\gamma = 2.29$  άρα  $v = \gamma \times \sin 45^\circ = 1.619$ .

Γνωρίζοντας το  $v$  και θέτοντας  $\varphi = 37.8654^\circ$  υπολογίζουμε από την σχέση του διαγράμματος Monegon ότι  $\alpha = 4.202$ .

Το pitch λοιπόν είναι  $P = \alpha + v = 5.82$ . Λόγω του αρκετού ελεύθερου χώρου που έχουμε στο οικόπεδο μπορούμε εύκολα να κάνουμε την θεώρηση  $P = 6.0m$ .

### 4.2.3 Παράμετροι σχεδίασης Bifacial Συστήματος σταθερών βάσεων στήριξης

Για το bifacial σύστημα σταθερού άξονα, όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήσαμε το ίδιο πλαίσιο αλλά αυτή τη φορά ορίζοντας το bifaciality του. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο "Unlimited Sheds 2D-model" και χρησιμοποιήσαμε τις τιμές του εποχικού albedo που φαίνονται στο figure 22. Η γωνία των πλαισίων ορίστηκε στις 30°, το ύψος από το έδαφος στο 1.5 μέτρο και το Pitch στα 6 μέτρα. Σε αυτήν την υλοποίηση, δεν ορίστηκε κάποιο 3D scene καθώς χρησιμοποιείται από το λογισμικό ένα εσωτερικό μοντέλο υπολογισμού επισκιάσεων όταν επιλέγουμε το "Unlimited Sheds 2D-model".

## 4.3 Αποτελέσματα προσωμοιώσεων συστημάτων

### 4.3.1 Προσωμοίωση Monofacial Συστήματος Σταθερών Βάσεων

Τα κύρια αποτελέσματα της προσωμοίωσης της υλοποίησης του συστήματος με monofacial πλαίσια σε σταθερές βάσεις, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (figure 35), ενώ ακολουθούν και διαγράμματα που παράγονται από την προσομοίωση του συστήματος μέσω του PVSyst.

Main results			
System Production	403 MWh/year	Normalized prod.	4.45 kWh/kWp/day
Specific prod.	1625 kWh/kWp/yr	Array losses	0.75 kWh/kWp/day
Performance Ratio	0.845	System losses	0.07 kWh/kWp/day

Figure 35: Κύρια αποτελέσματα προσομοίωσης: monofacial fixed-tilt plane

Στο figure 36 παρατίθεται γράφημα της μηνιαίας παραγωγής ενέργειας.

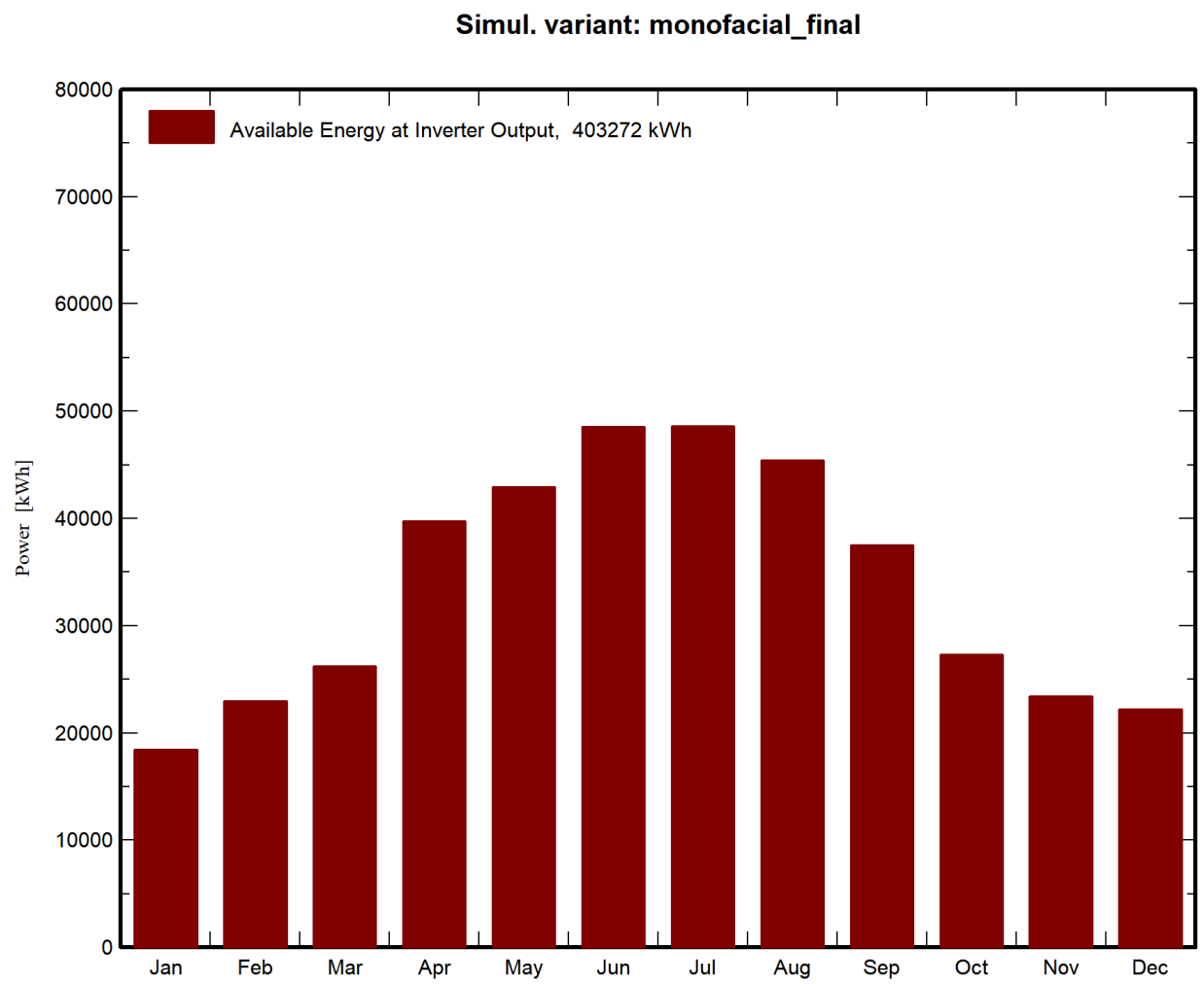


Figure 36: Μηνιαία παραγωγή: monofacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα (figure 37) παρουσιάζονται η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στα πάνελ και η παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα.

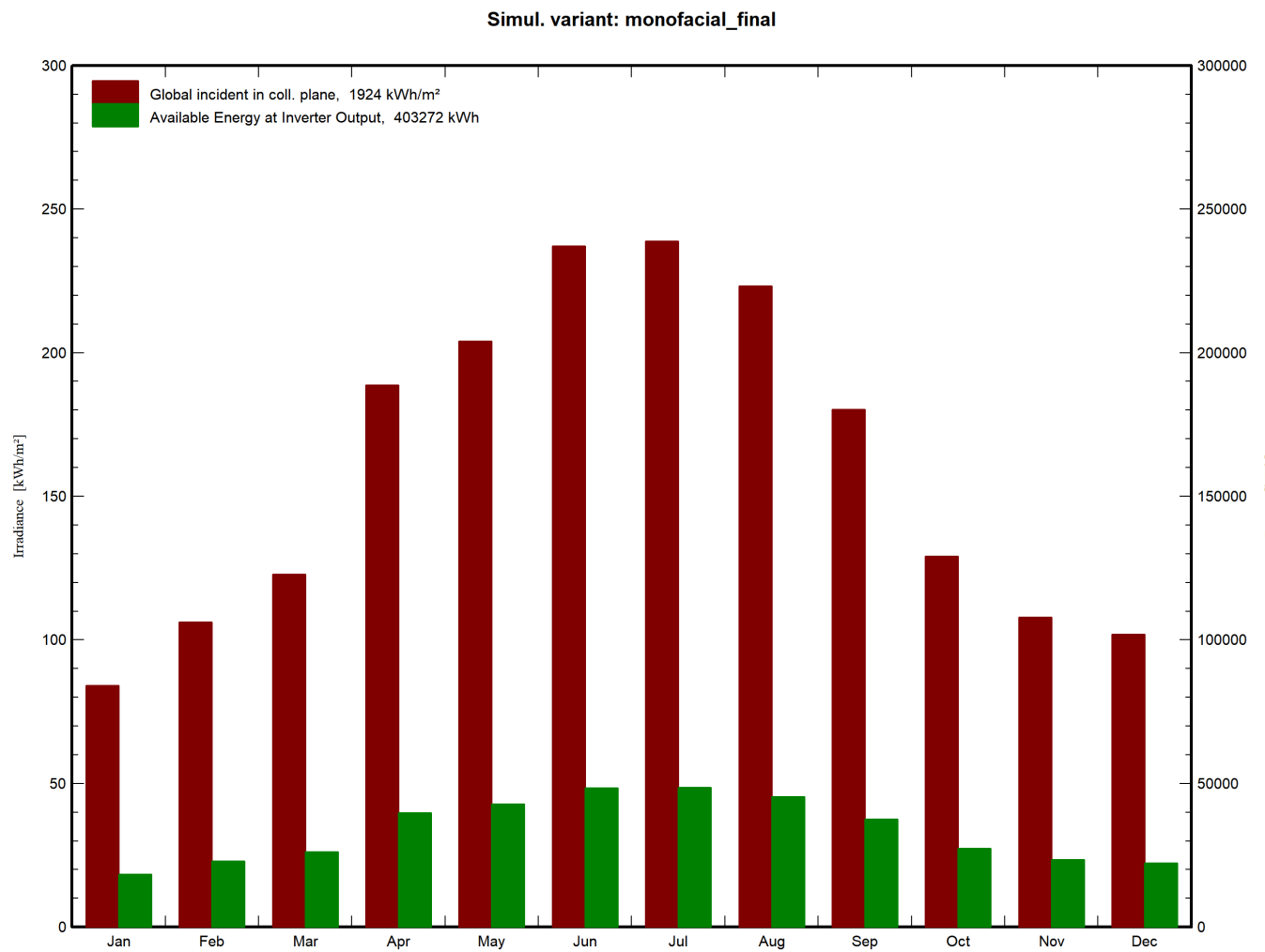


Figure 37: Διάγραμμα μηνιαίας προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας-παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας-monofacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα του figure 38 παρουσιάζεται η κατανομή της παραγόμενης ισχύος.

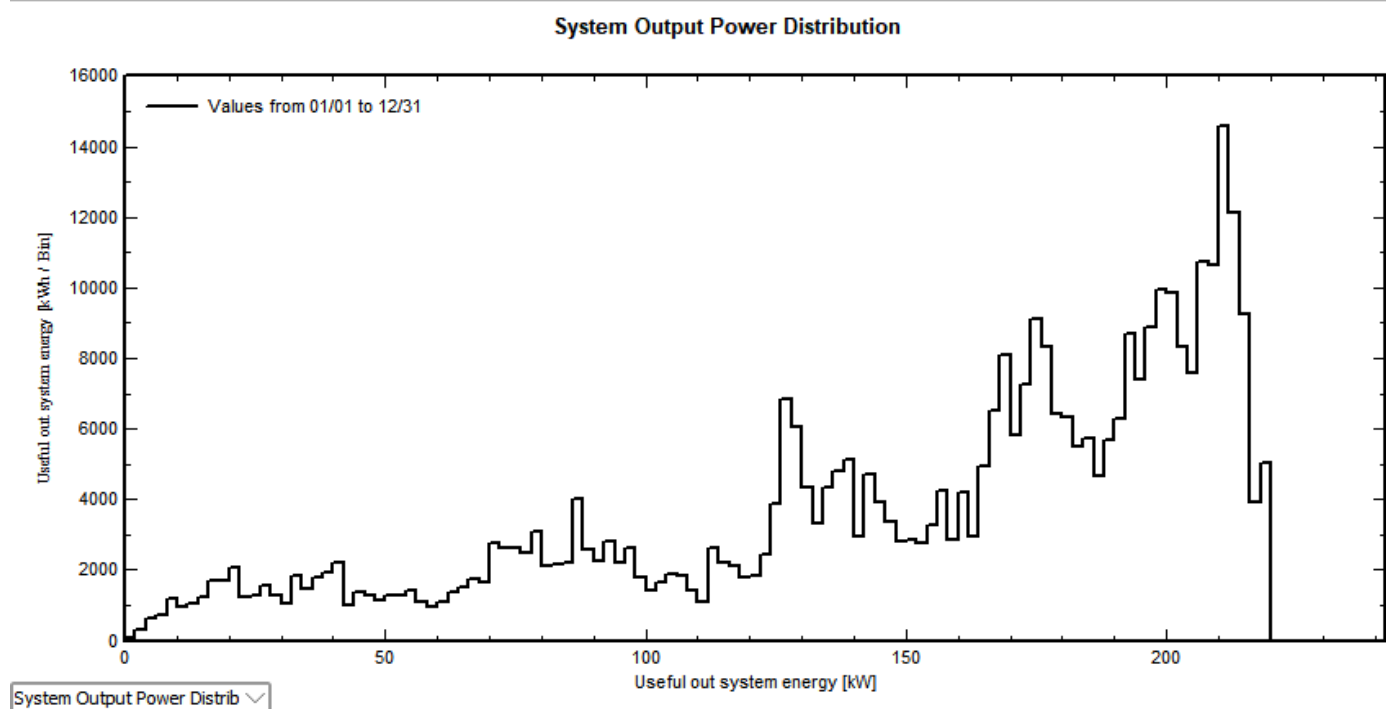


Figure 38: Διάγραμμα Κατανομής Ισχύος-monofacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα του figure 39 παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη παραγωγή ανά εγκατεστημένη kWp, ανά μήνα.

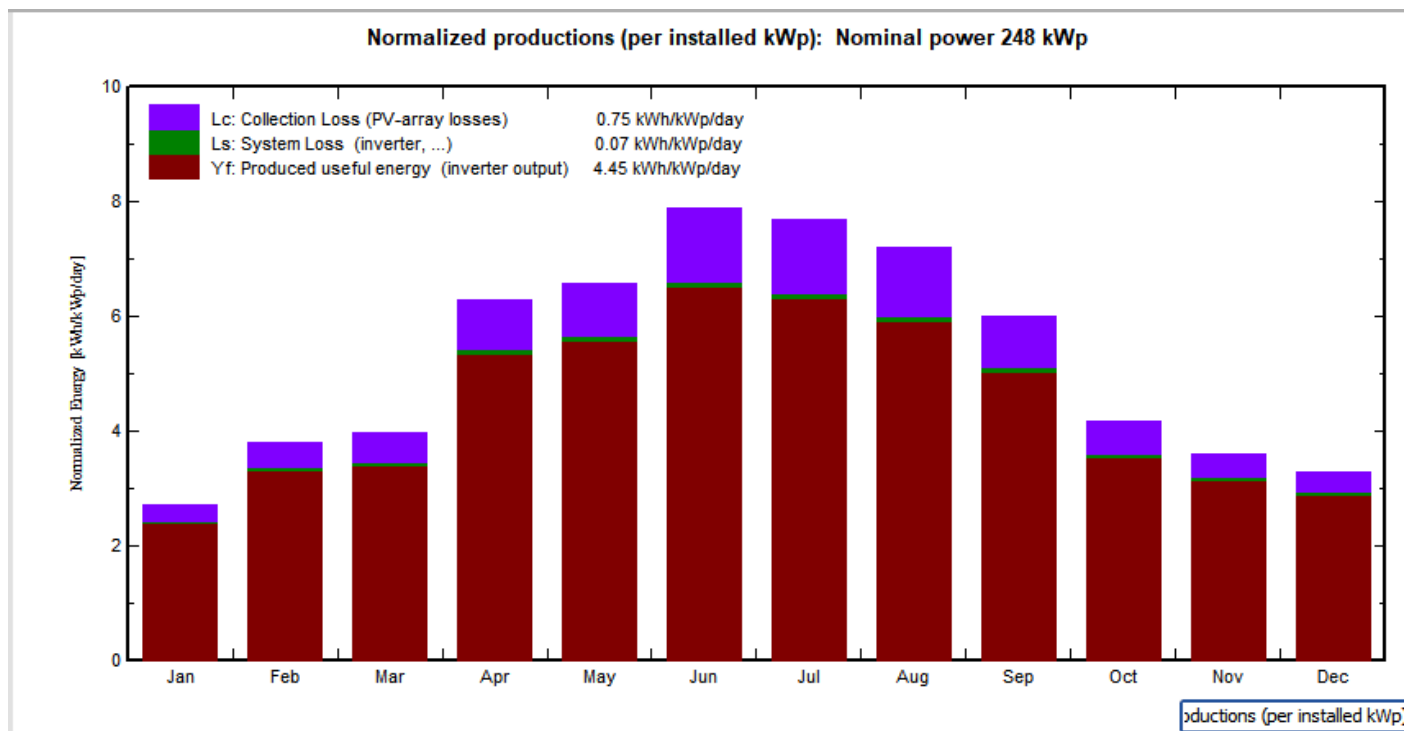


Figure 39: Διάγραμμα παραγωγής ανά εγκατεστημένη kWp ανά μήνα-monofacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα του figure 40 παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος ανά μήνα.

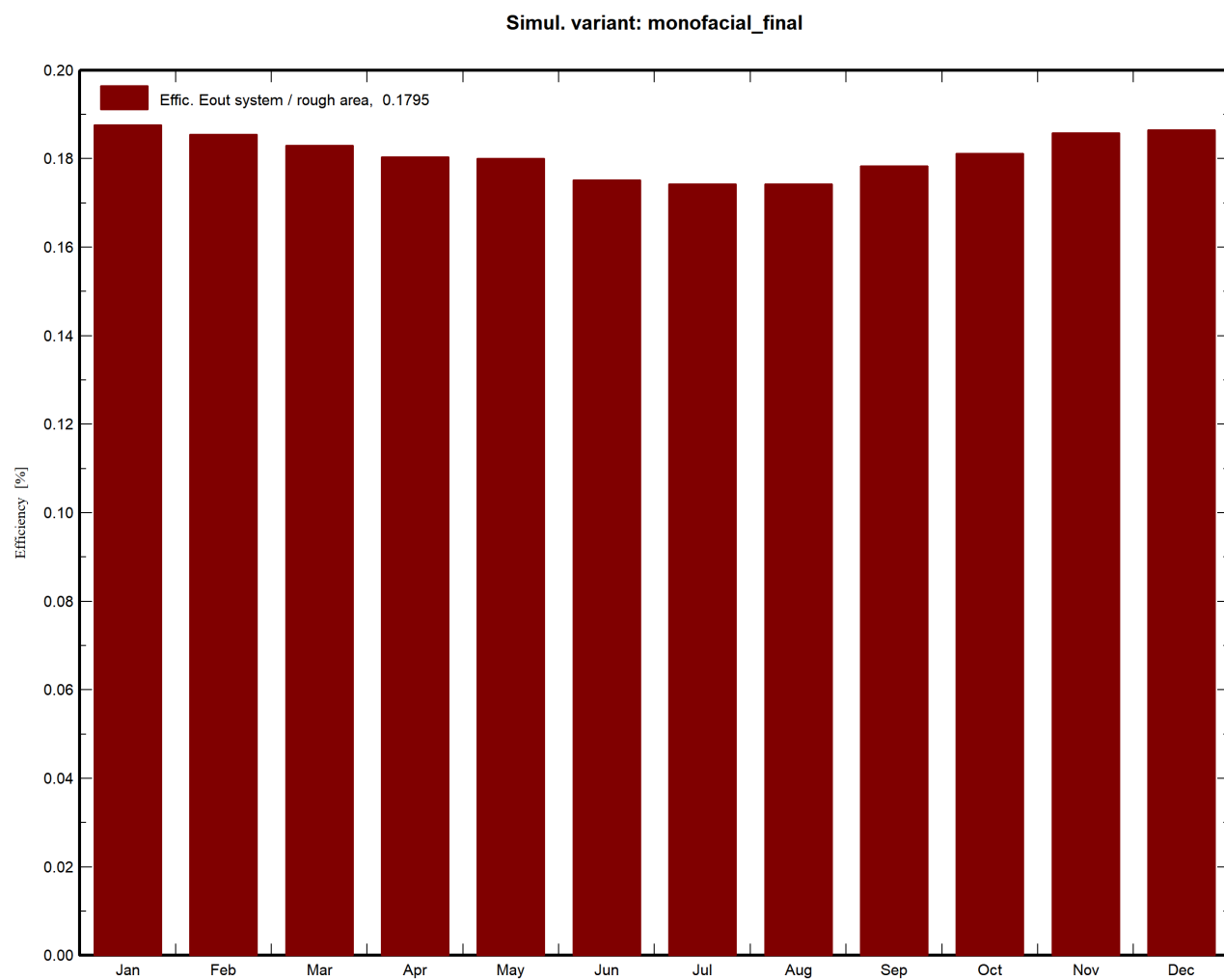


Figure 40: Μηνιαία απόδοση συστήματος-monofacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα του figure 41 παρουσιάζονται σχεδιαγραμματικά οι ετήσιες απώλειες του συστήματος.

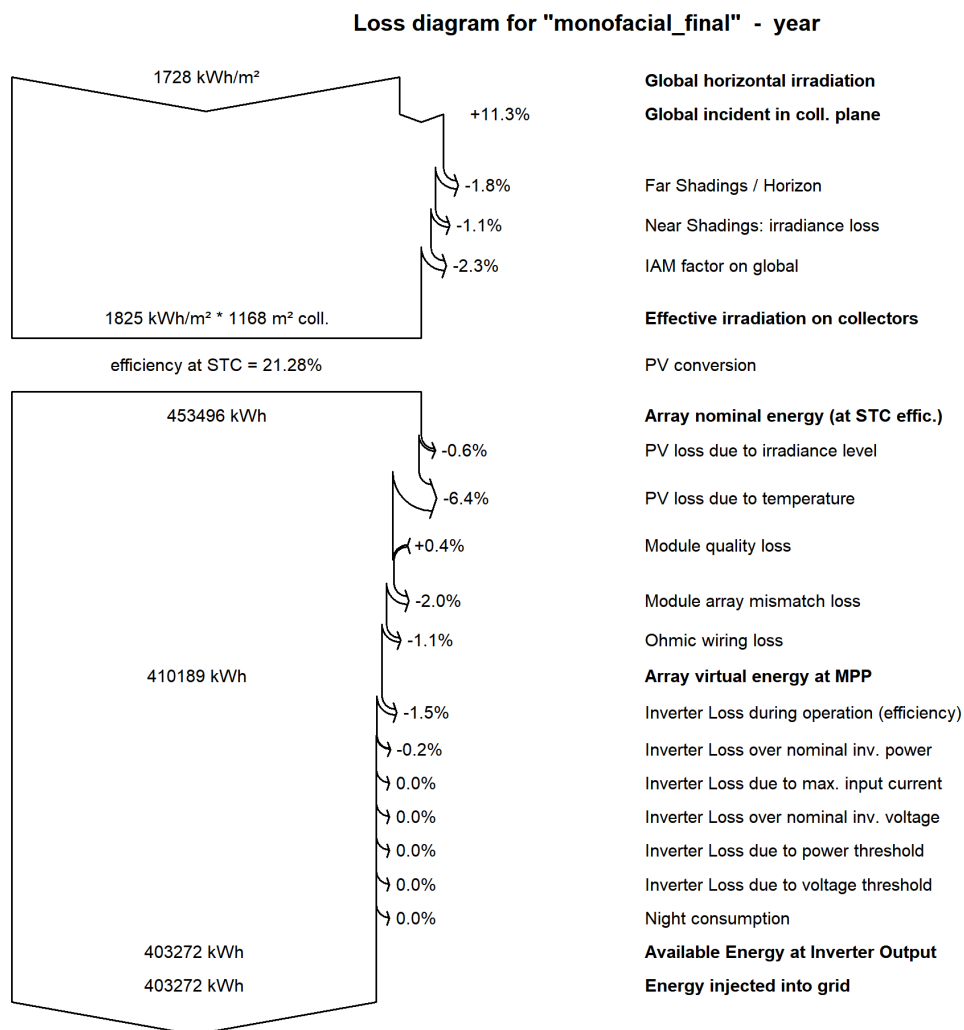


Figure 41: Ετήσιες απώλειες συστήματος-monofacial fixed-tilt plane



Στο διάγραμμα του figure 42 παρουσιάζεται το performance ratio του συστήματος ανά μήνα, δηλαδή ο λόγος της τελικώς αποδιδόμενης ενέργειας προς την ιδανική δυνατότητα παραγωγής.

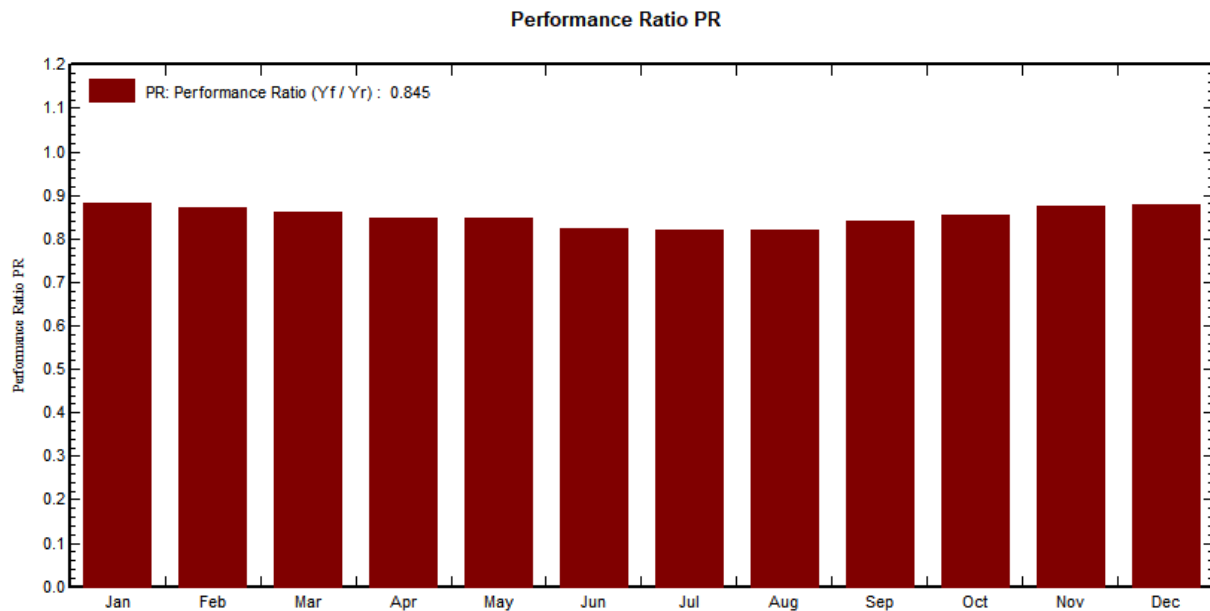


Figure 42: performance ratio-monofacial fixed-tilt plane

Τέλος, παρατίθενται διαγράμματα ημερήσιας παραγωγής ενέργειας, για κάθε μήνα.

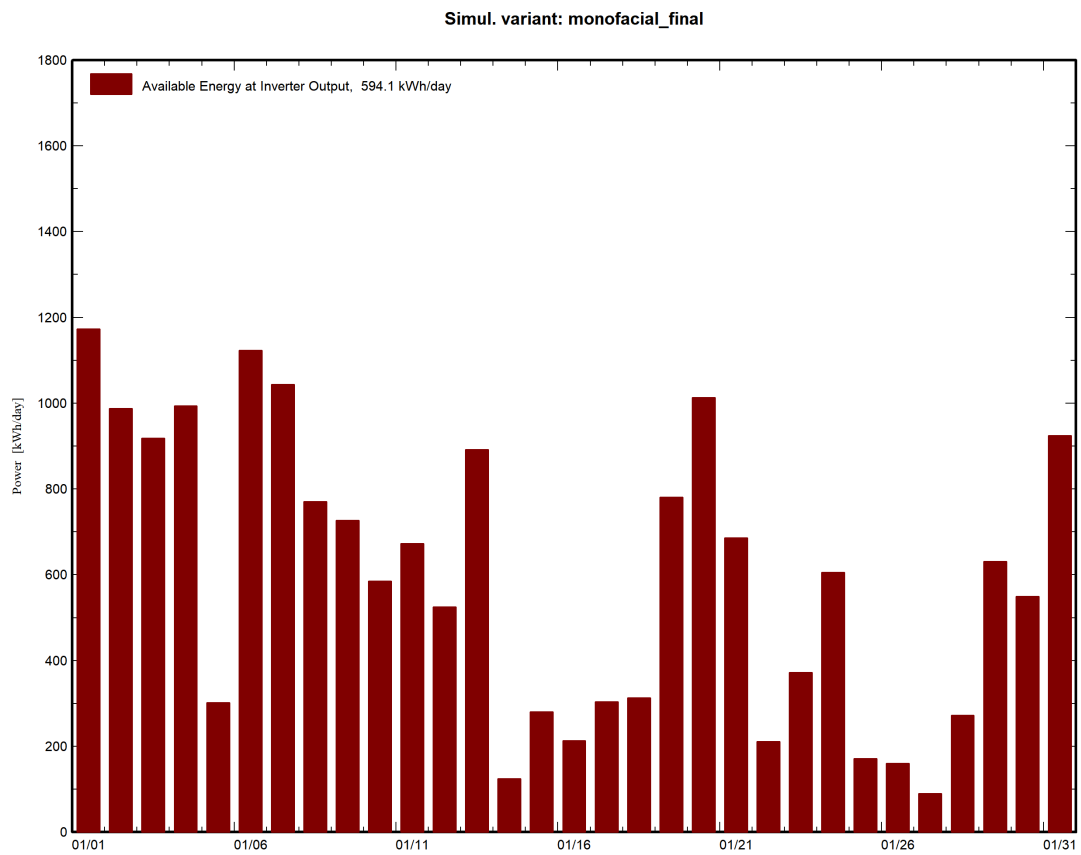


Figure 43: Ημερήσια παραγωγή Ιανουαρίου-monofacial fixed-tilt plane

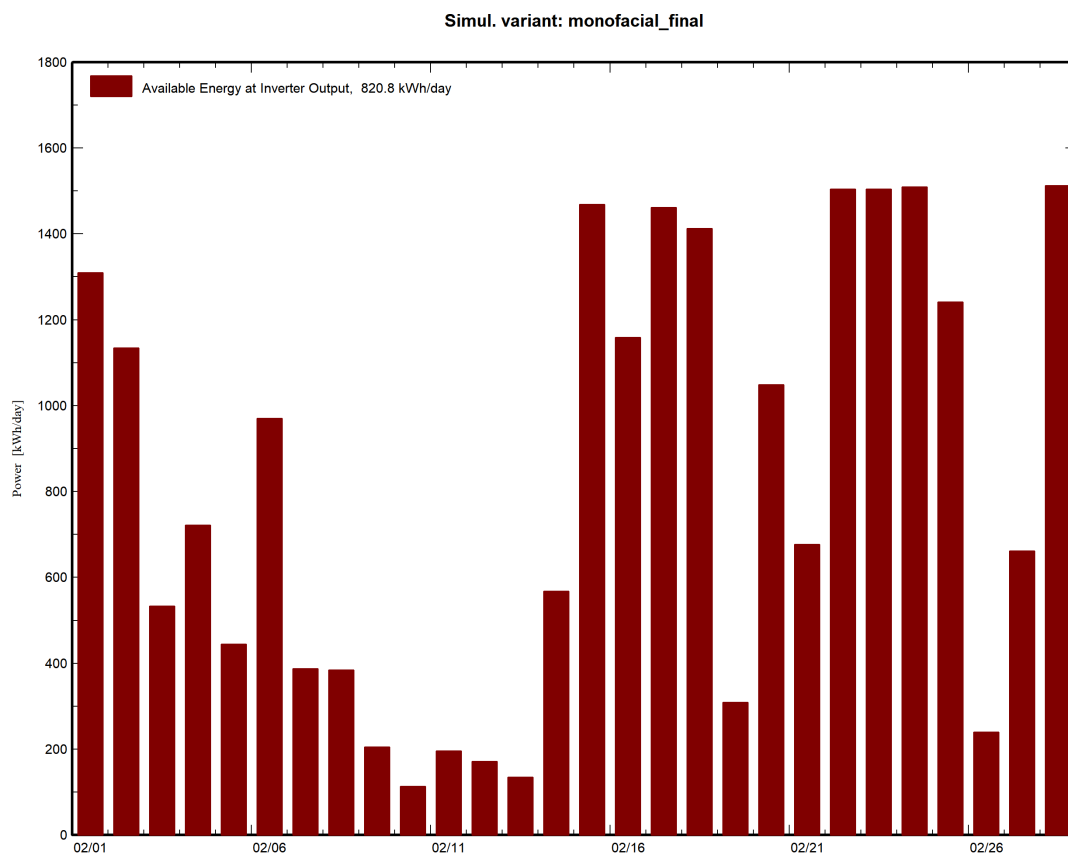


Figure 44: Ημερήσια παραγωγή Φεβρουαρίου-monofacial fixed-tilt plane

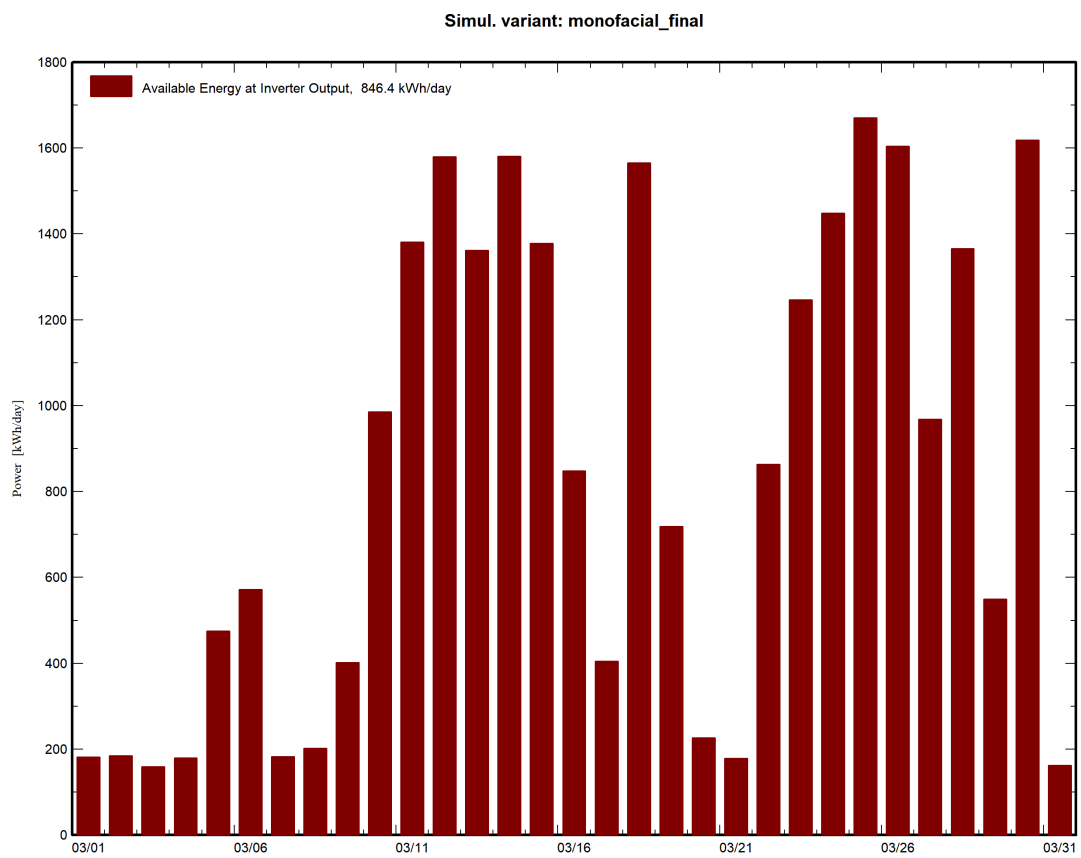


Figure 45: Ημερήσια παραγωγή Μαρτίου-monofacial fixed-tilt plane

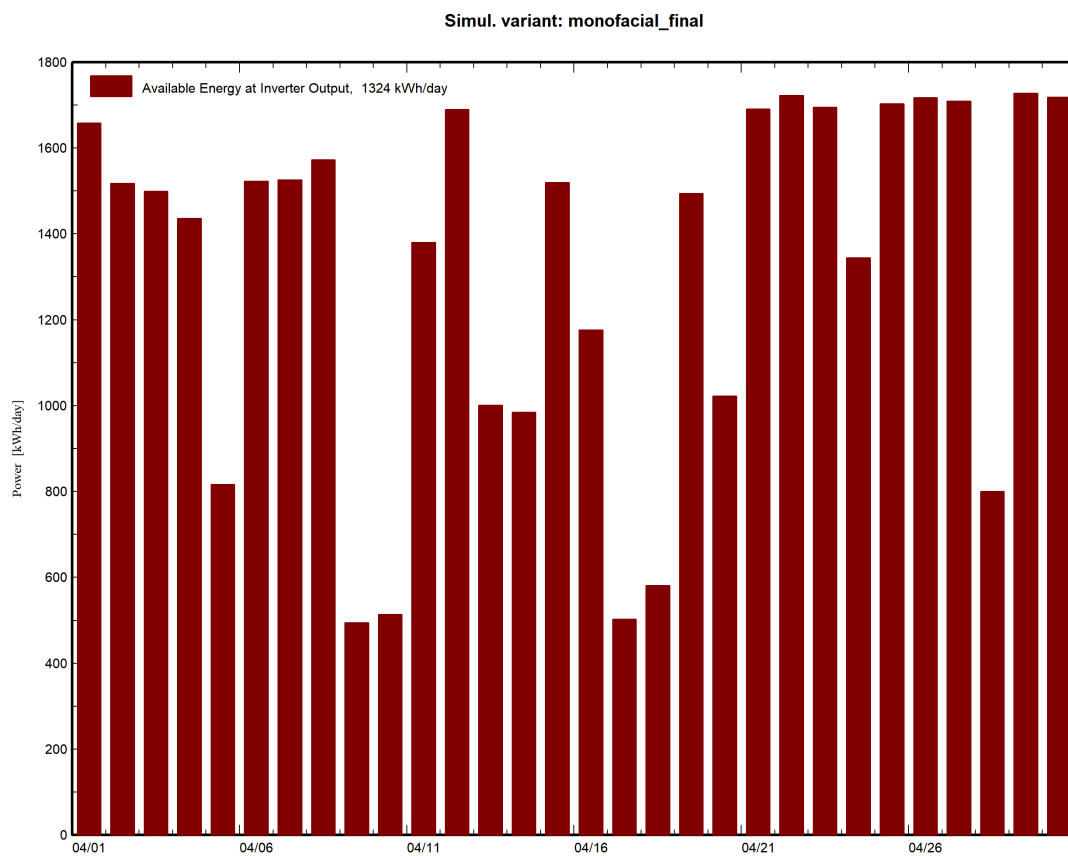


Figure 46: Ημερήσια παραγωγή Απριλίου-monofacial fixed-tilt plane

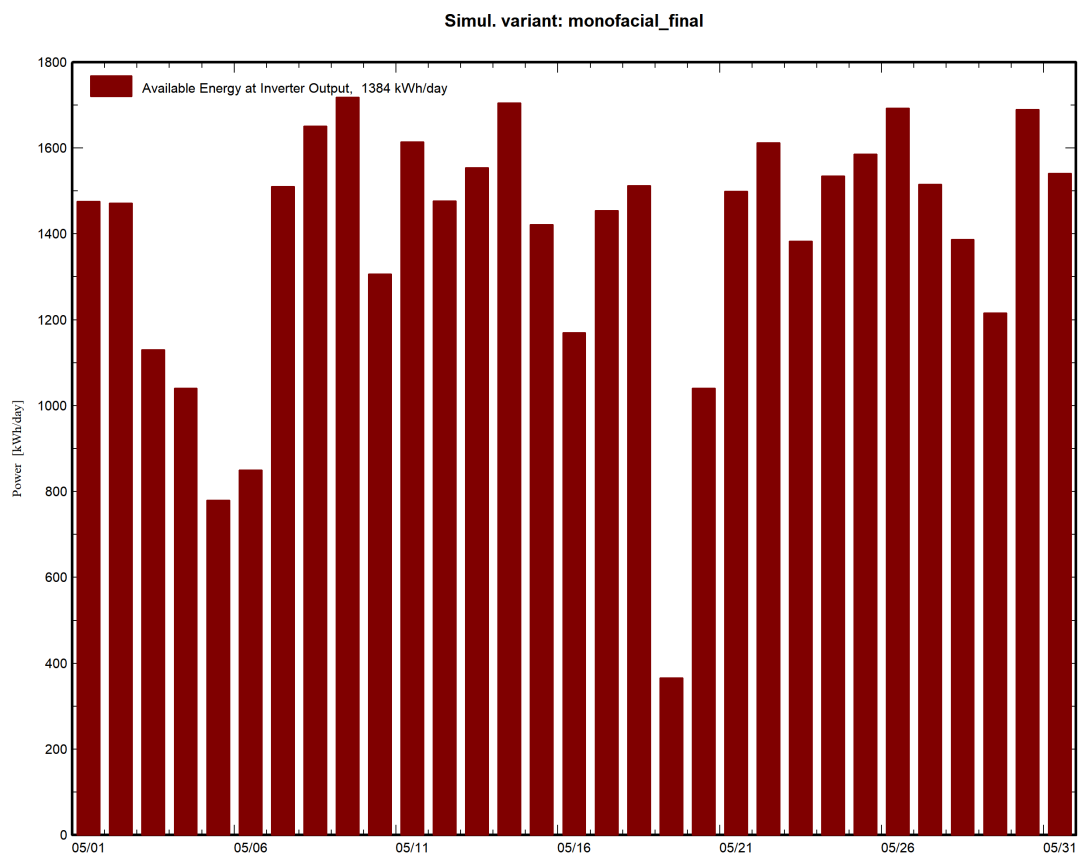


Figure 47: Ημερήσια παραγωγή Μαΐου-monofacial fixed-tilt plane

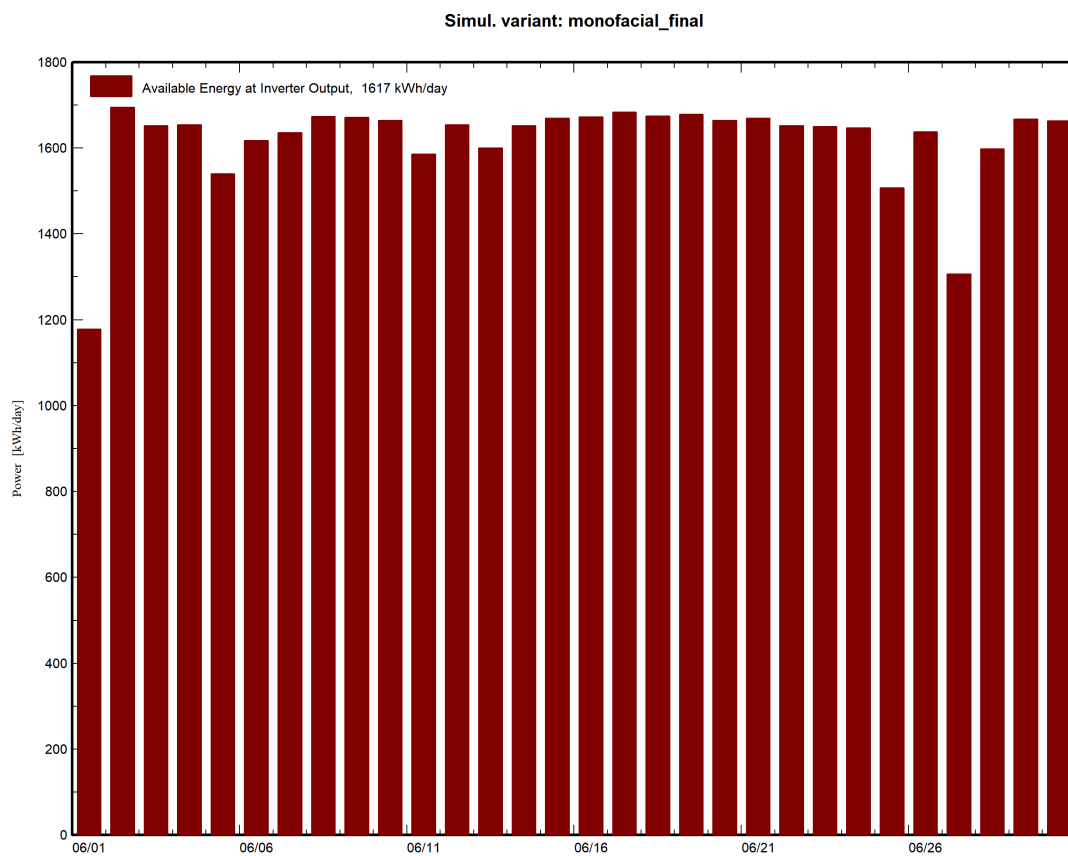


Figure 48: Ημερήσια παραγωγή Ιουνίου-monofacial fixed-tilt plane

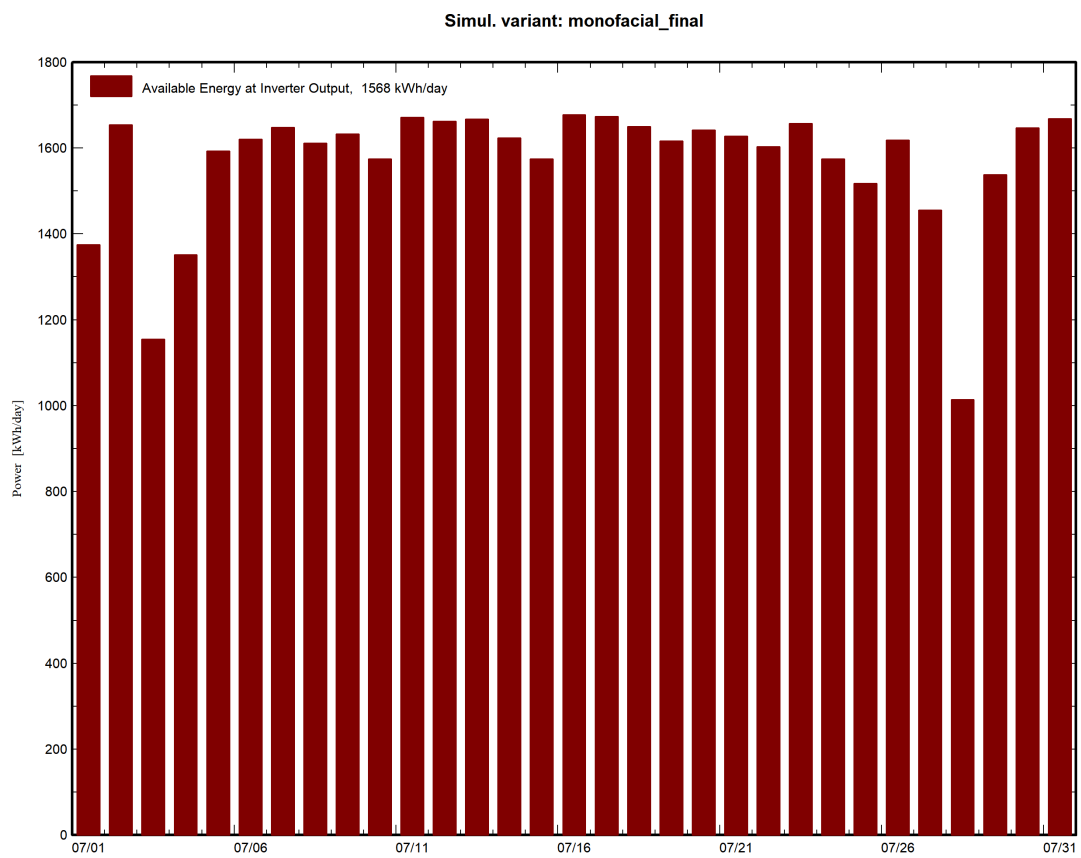


Figure 49: Ημερήσια παραγωγή Ιουλίου-monofacial fixed-tilt plane



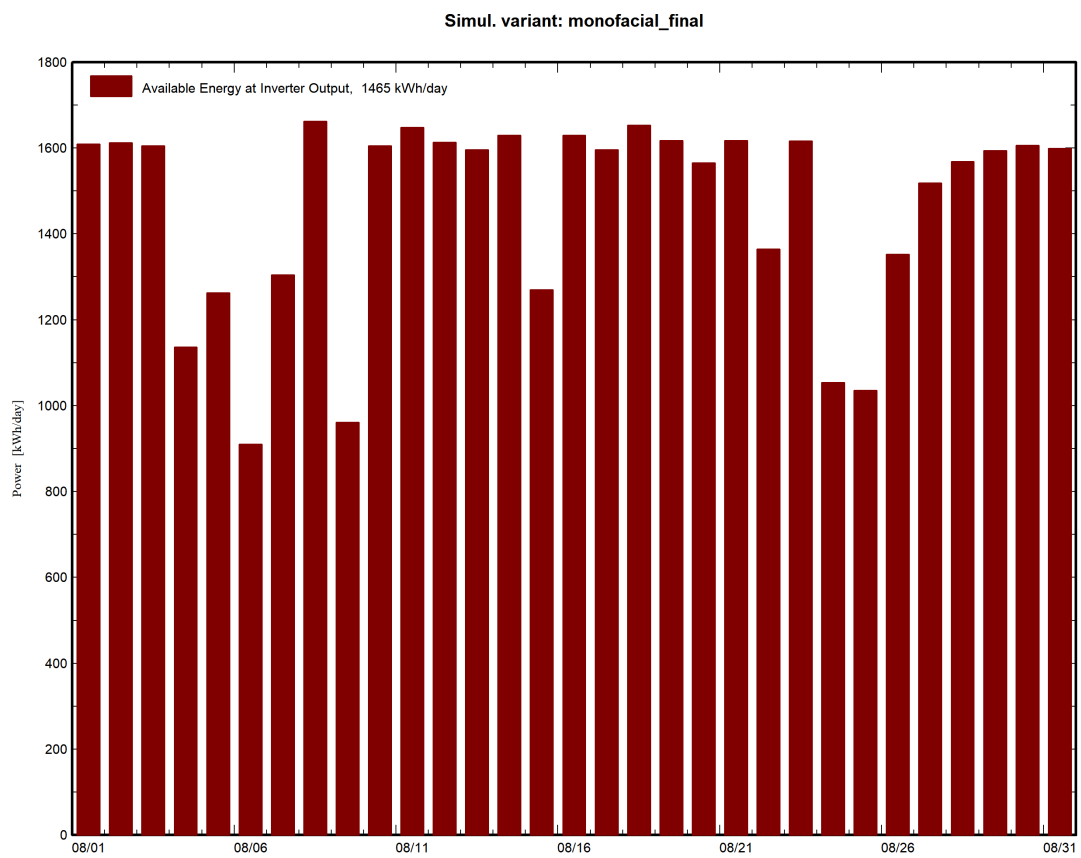


Figure 50: Ημερήσια παραγωγή Αυγούστου-monofacial fixed-tilt plane

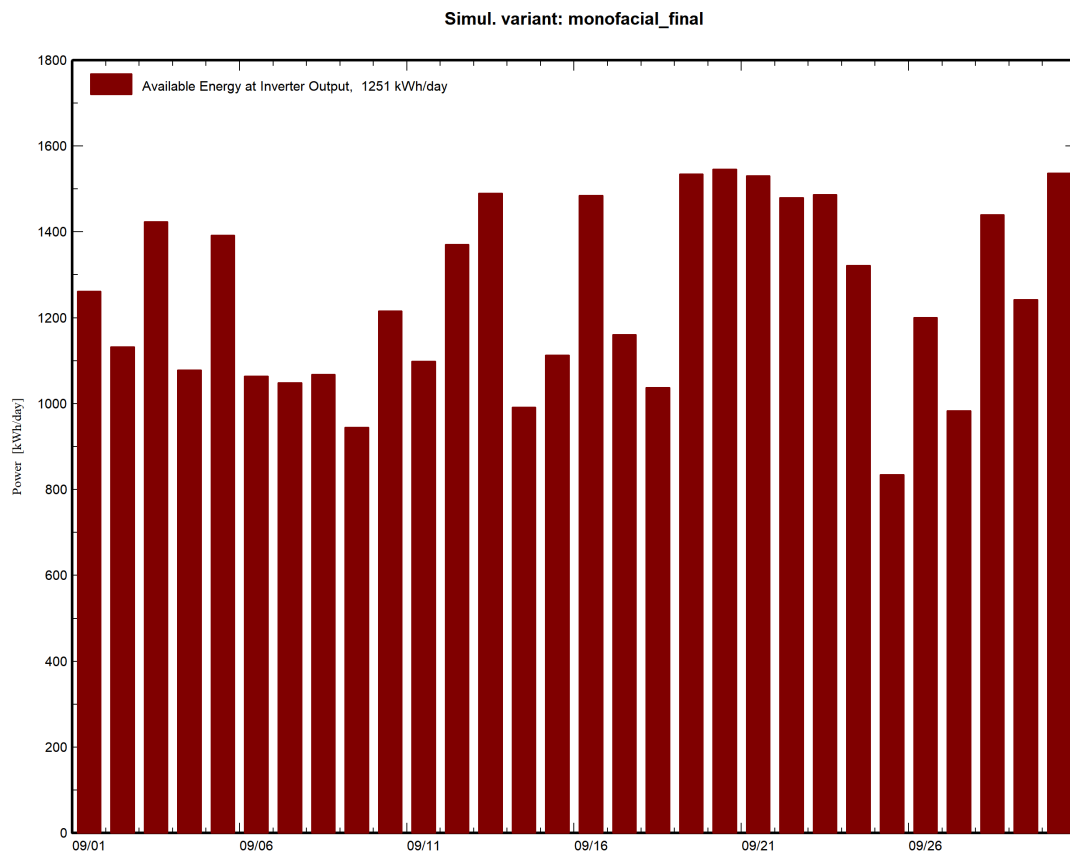


Figure 51: Ημερήσια παραγωγή Σεπτεμβρίου-monofacial fixed-tilt plane

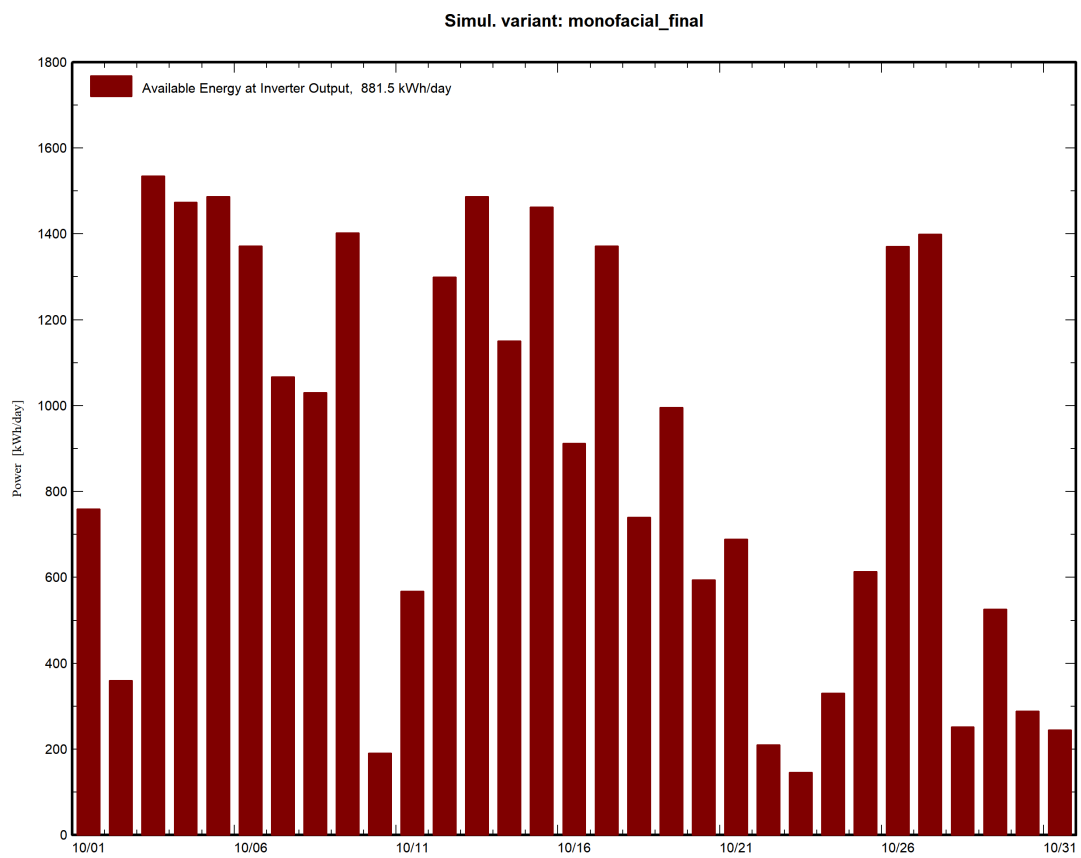


Figure 52: Ημερήσια παραγωγή Οκτωβρίου-monofacial fixed-tilt plane

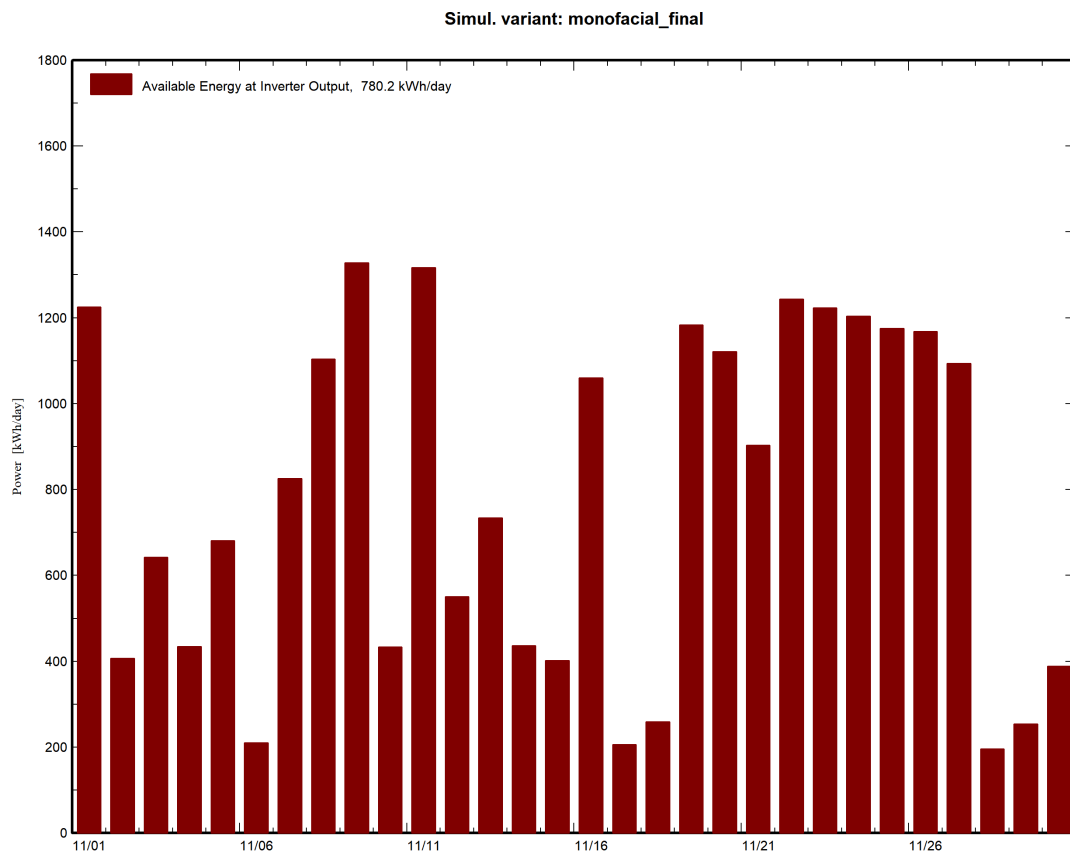


Figure 53: Ημερήσια παραγωγή Νοεμβρίου-monofacial fixed-tilt plane

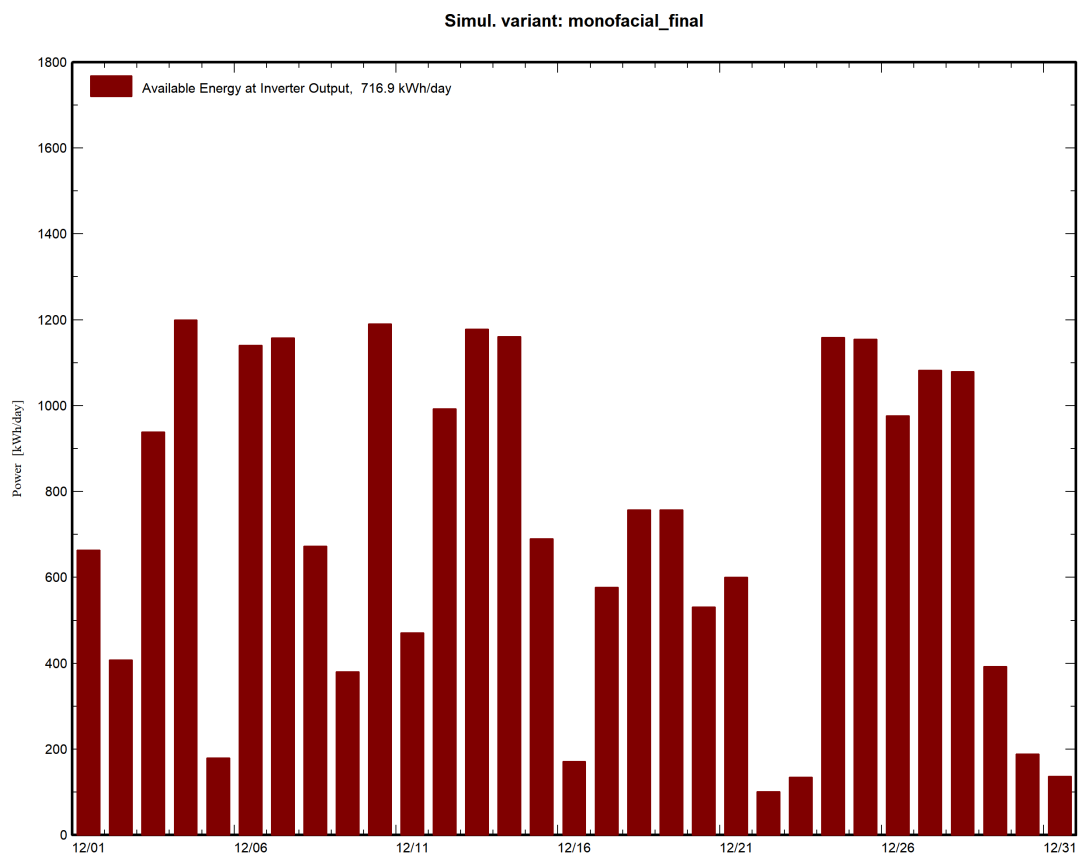


Figure 54: Ημερήσια παραγωγή Δεκεμβρίου-monofacial fixed-tilt plane

### 4.3.2 Προσωμοίωση Bifacial Συστήματος Σταθερών Βάσεων

Τα κύρια αποτελέσματα της προσωμοίωσης της υλοποίησης του συστήματος με monofacial πλαίσια σε σταθερές βάσεις, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (figure 55), ενώ ακολουθούν και διαγράμματα που παράγονται από την προσομοίωση του συστήματος μέσω του PVSyst.

Main results			
System Production	441 MWh/year	Normalized prod.	4.87 kWh/kWp/day
Specific prod.	1779 kWh/kWp/yr	Array losses	0.32 kWh/kWp/day
Performance Ratio	0.924	System losses	0.08 kWh/kWp/day
Bifacial perf. ratio	0.813		

Figure 55: Κύρια αποτελέσματα προσομοίωσης: bifacial fixed-tilt plane

Στο figure 56 παρατίθεται γράφημα της μηνιαίας παραγωγής ενέργειας.

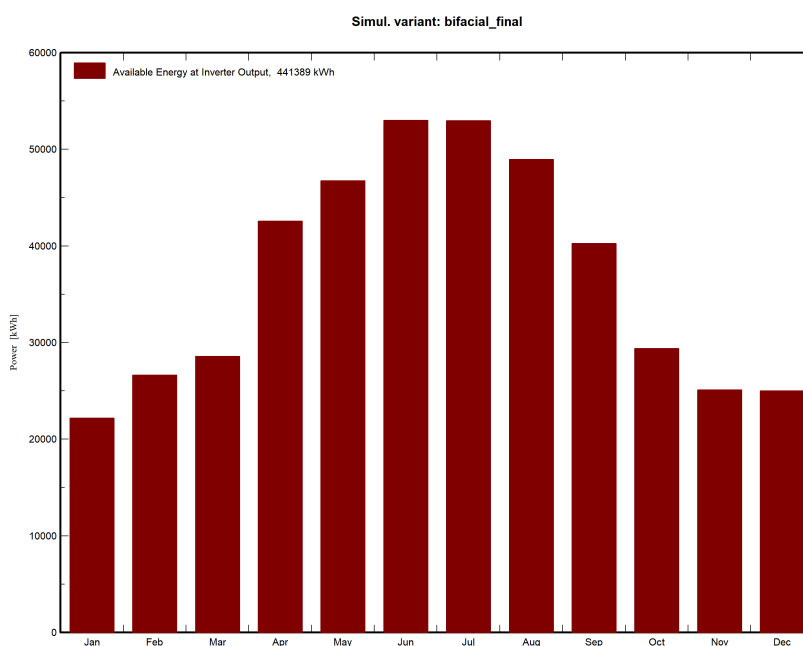


Figure 56: Μηνιαία Παραγωγή: bifacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα του figure 57 παρουσιάζονται η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στα πάνελ και η παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα.

Στο διάγραμμα του figure 58 παρουσιάζεται η κατανομή της παραγόμενης ισχύος.

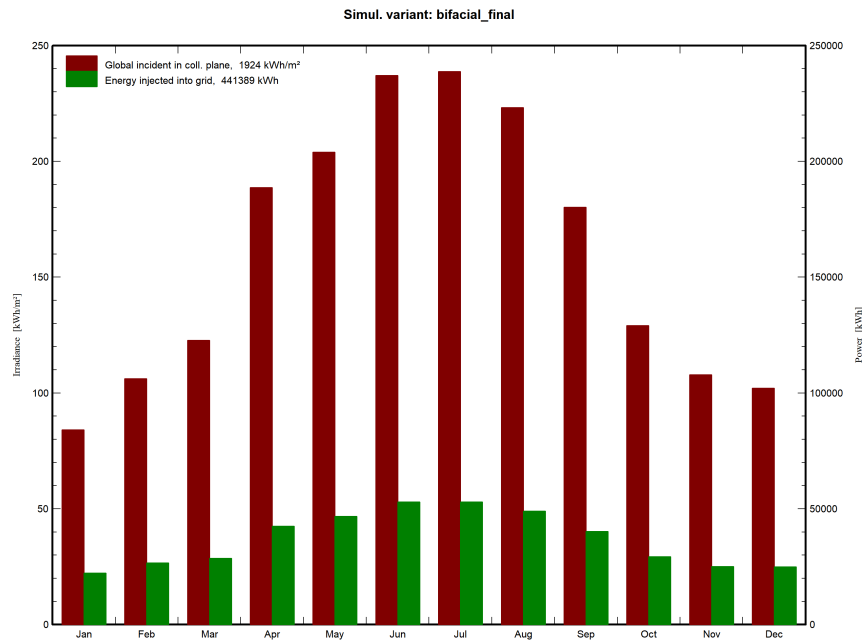


Figure 57: Σύγκριση προσπίπτουσας ενέργειας-παραγόμενης ενέργειας: bifacial fixed-tilt plane

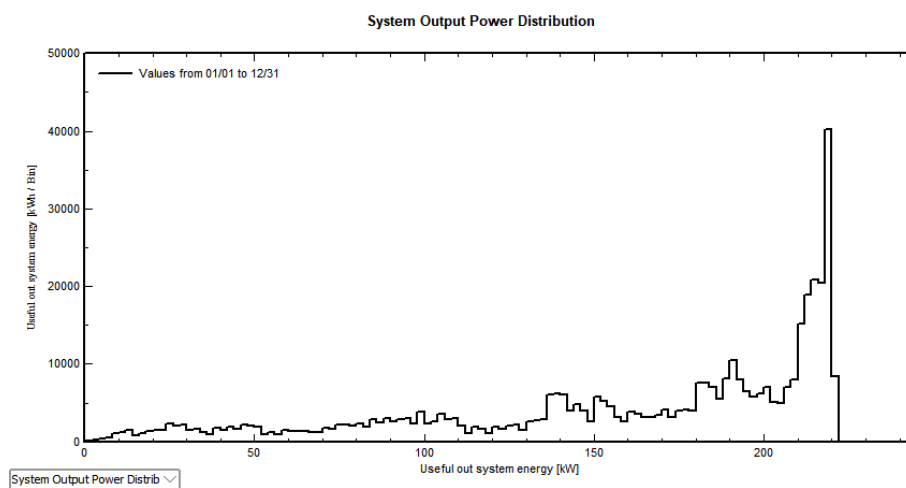


Figure 58: Κατανομή παραγόμενης ισχύος: bifacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα του figure 59 παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη παραγωγή ανά εγκατεστημένη kWp, ανά μήνα.

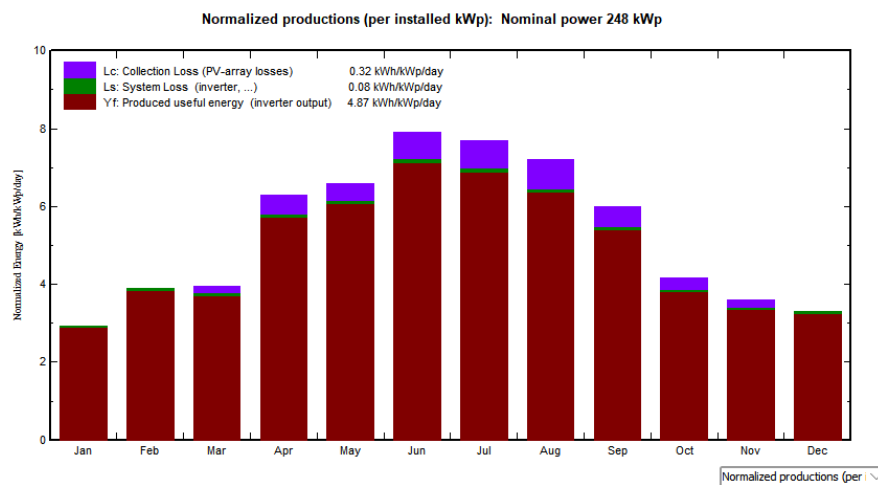


Figure 59: Μηνιαία παραγωγή ανά εγκατεστημένη kWp: bifacial fixed-tilt plane



Στο διάγραμμα του figure 60 παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος ανά μήνα.

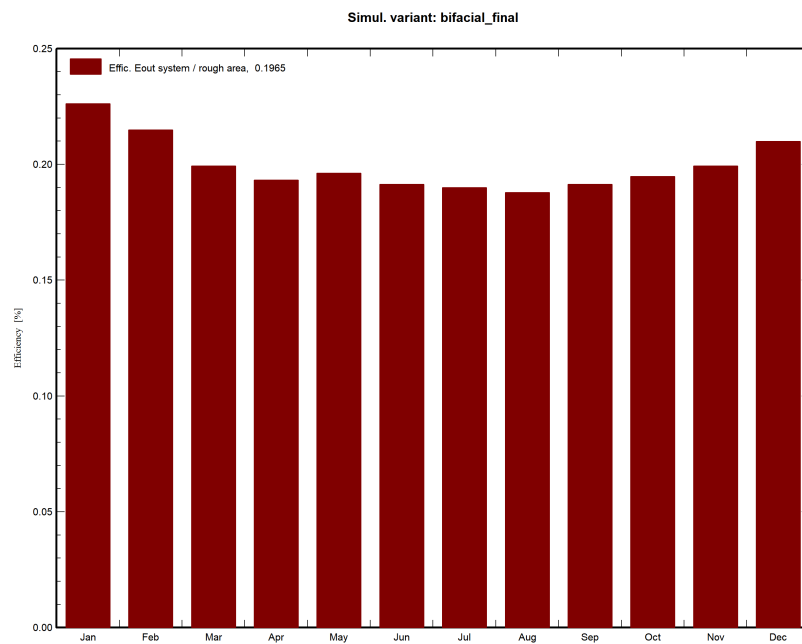


Figure 60: Μηνιαία απόδοση: bifacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα του figure 61 παρουσιάζονται σχεδιαγραμματικά οι ετήσιες απώλειες του συστήματος.

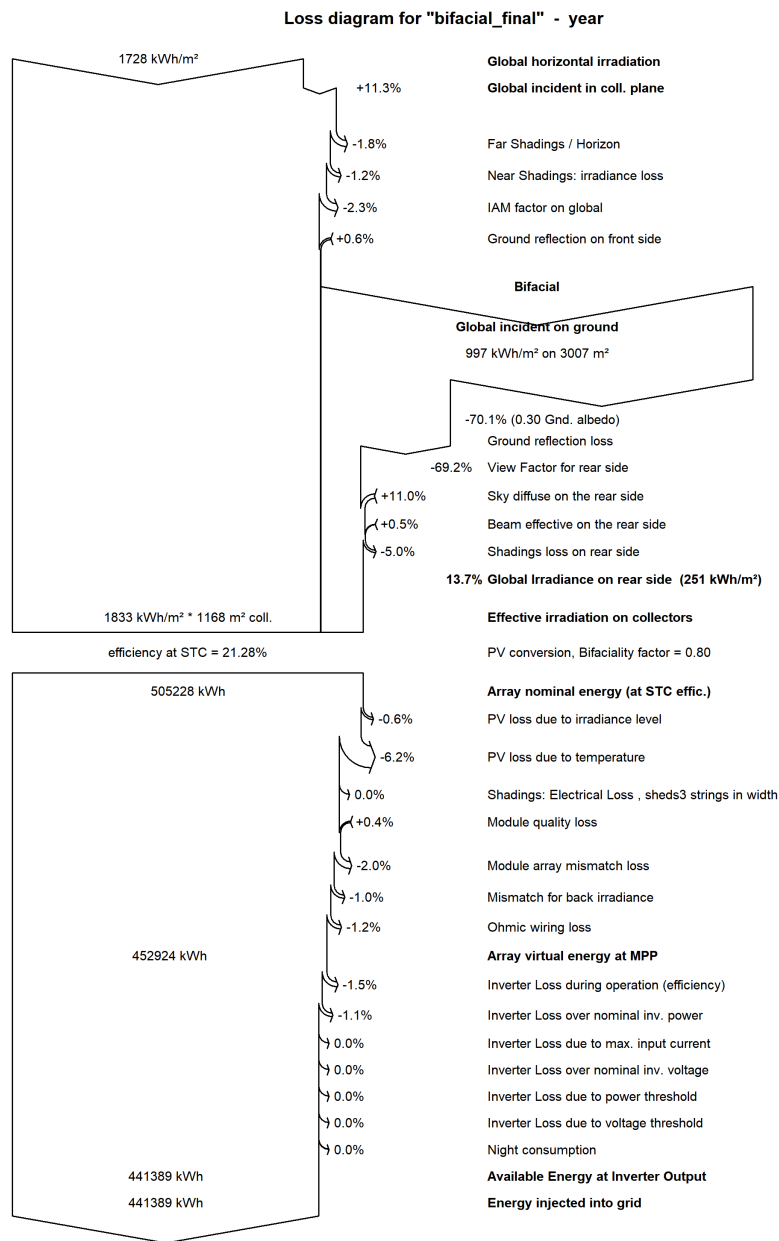


Figure 61: loss diagram: bifacial fixed-tilt plane

Στο διάγραμμα του figure 62 παρουσιάζεται το performance ratio του συστήματος ανά μήνα, δηλαδή ο λόγος της τελικώς αποδιδόμενης ενέργειας προς την ιδανική δυνατότητα παραγωγής.

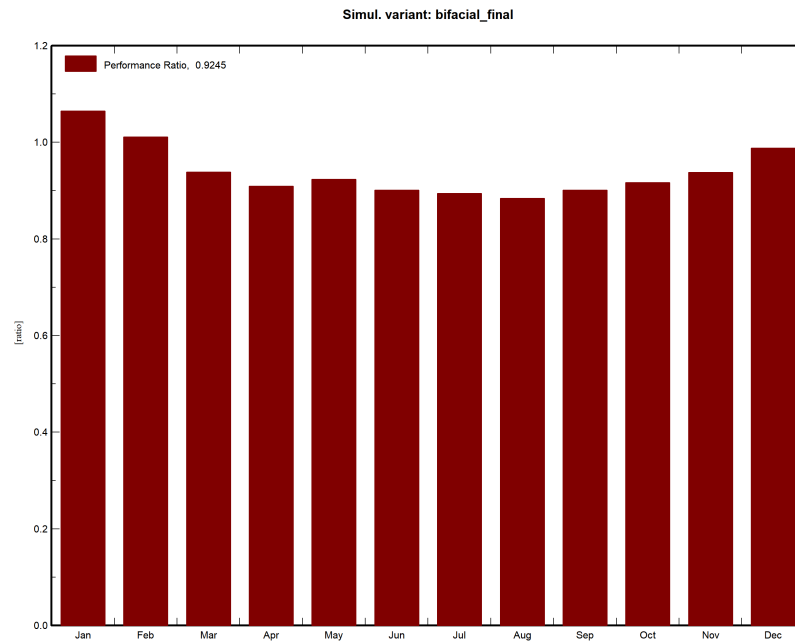


Figure 62: Μηνιαίο Performance Ratio: bifacial fixed-tilt plane

Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ημερήσιας παραγωγής του συστήματος για κάθε μήνα.

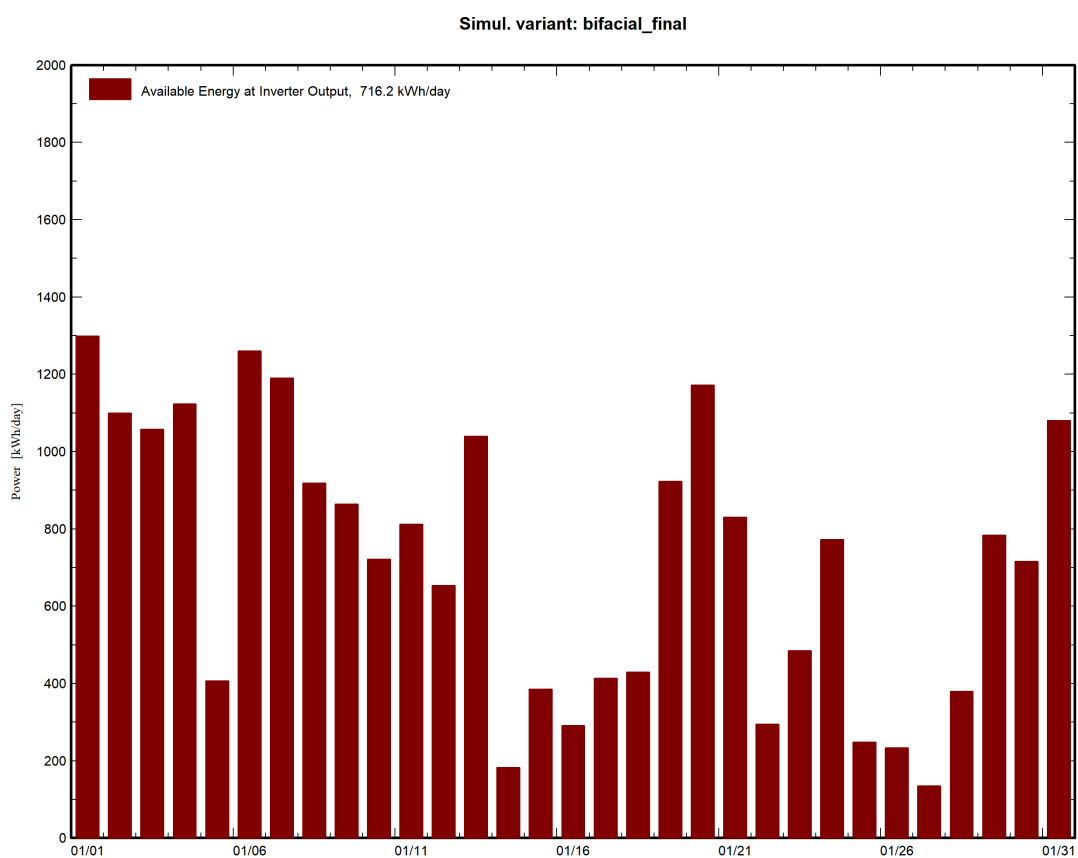


Figure 63: Ημερήσια Παραγωγή Ιανουαρίου-bifacial fixed-tilt plane

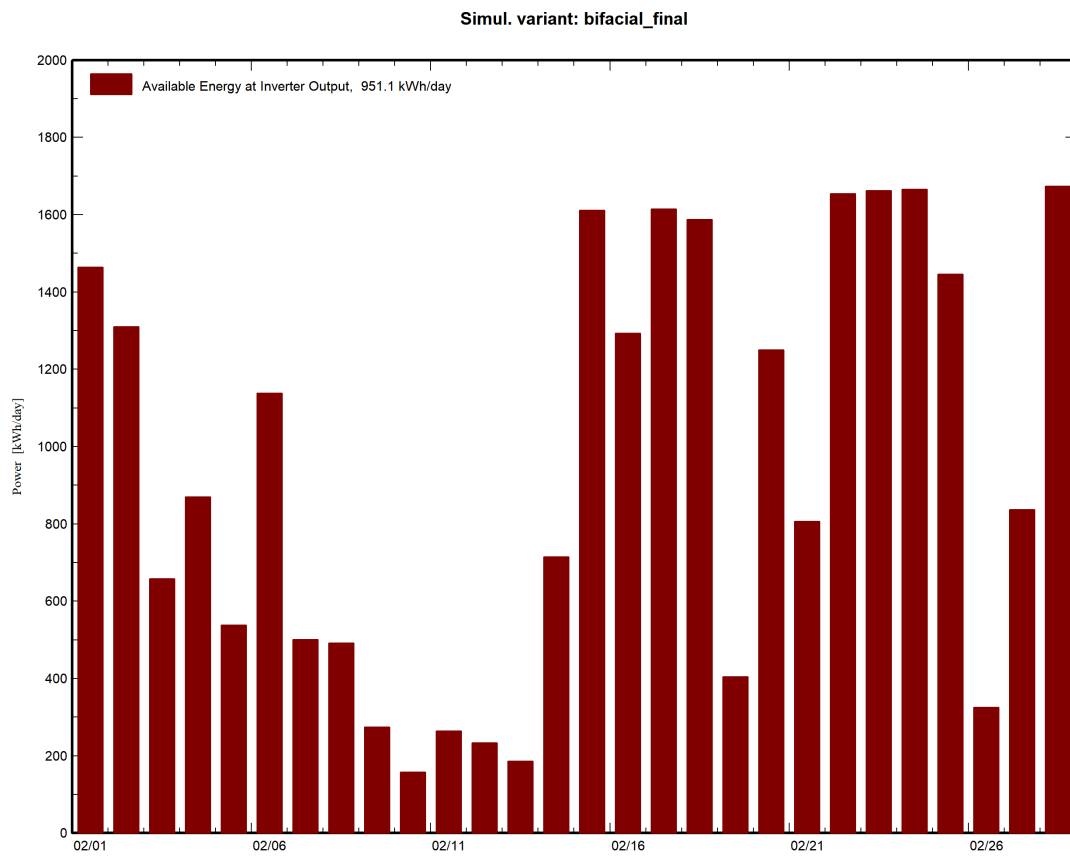


Figure 64: Ημερήσια Παραγωγή Φεβρουαρίου-bifacial fixed-tilt plane

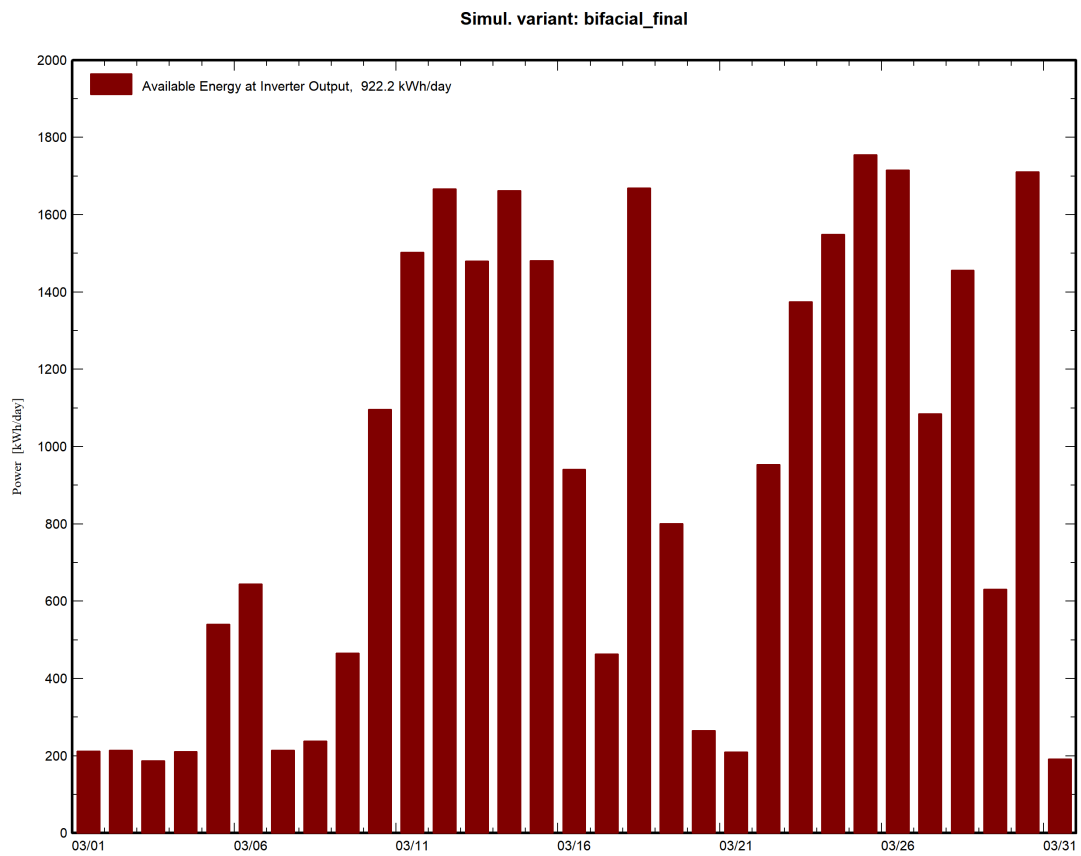


Figure 65: Ημερήσια Παραγωγή Μαρτίου-bifacial fixed-tilt plane

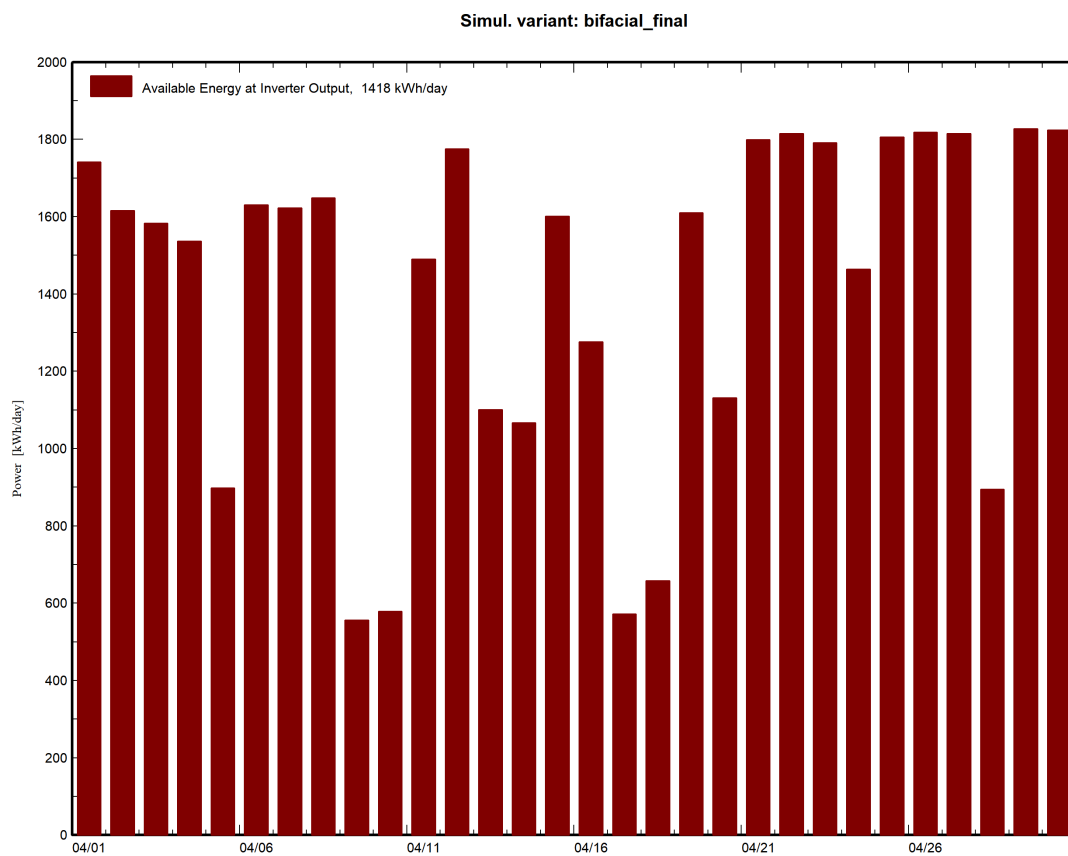


Figure 66: Ημερήσια Παραγωγή Απριλίου-bifacial fixed-tilt plane

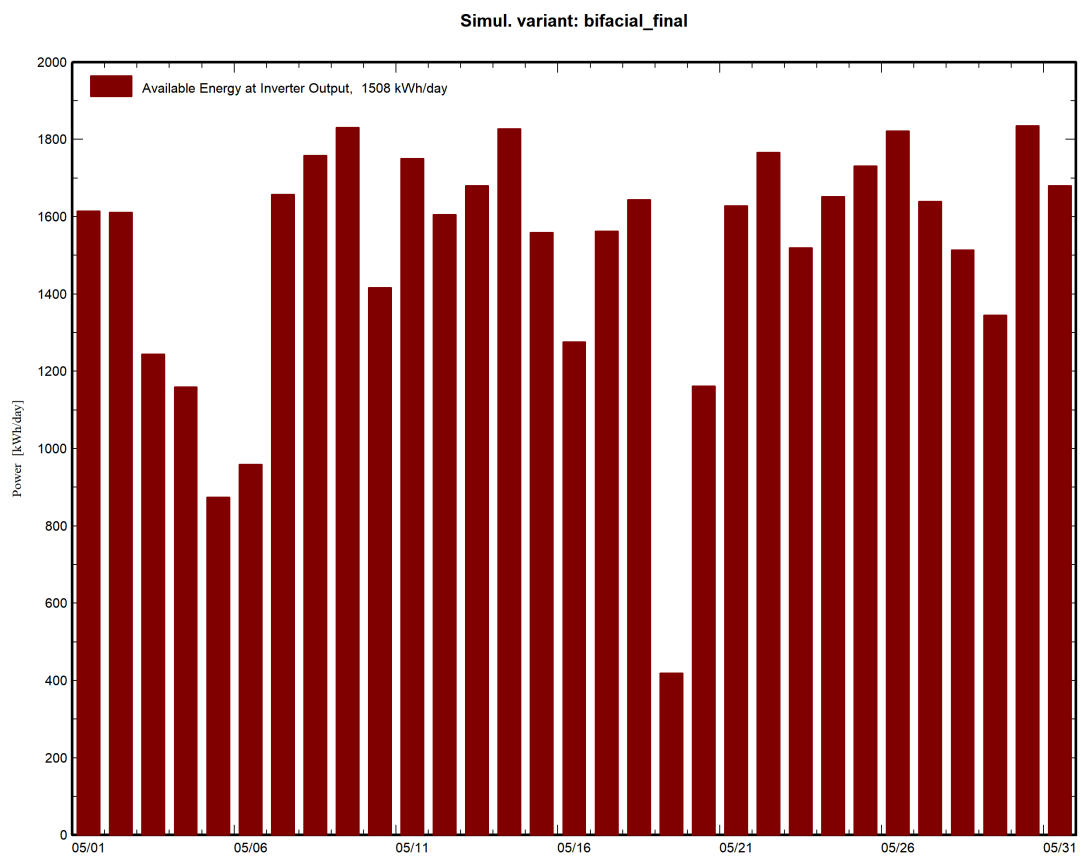


Figure 67: Ημερήσια Παραγωγή Μαΐου-bifacial fixed-tilt plane



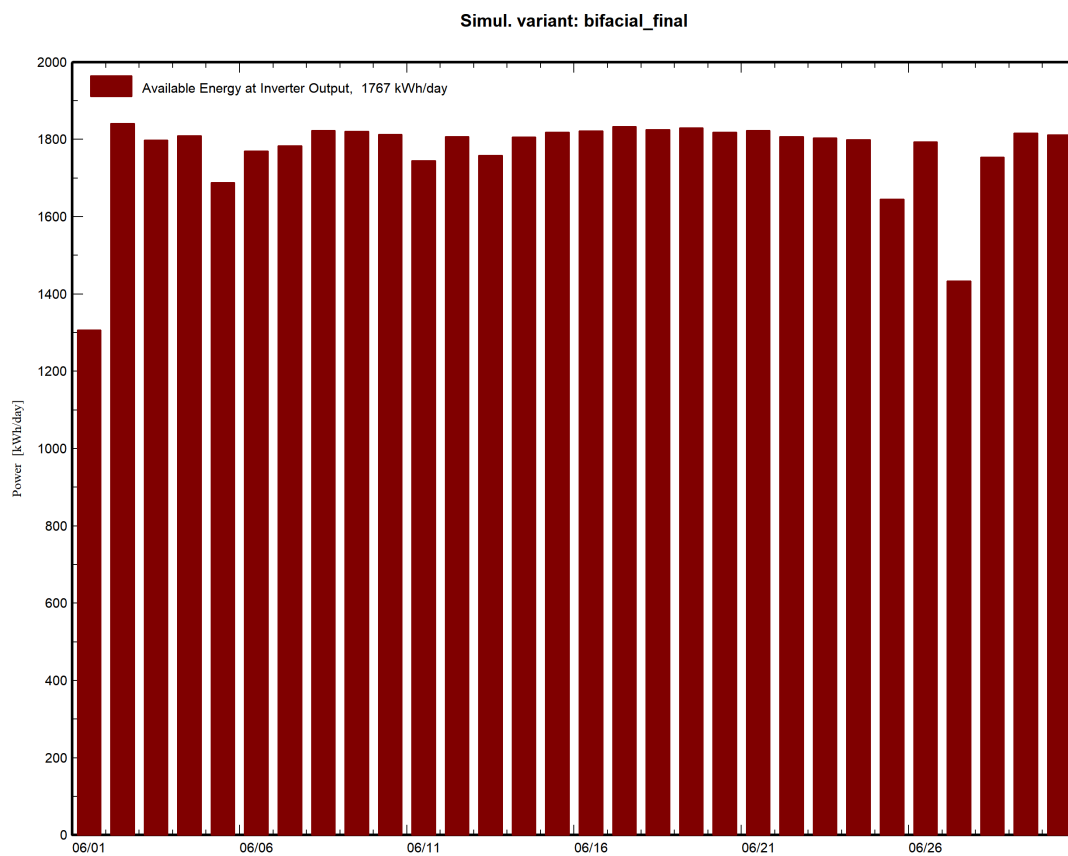


Figure 68: Ημερήσια Παραγωγή Ιουνίου-bifacial fixed-tilt plane

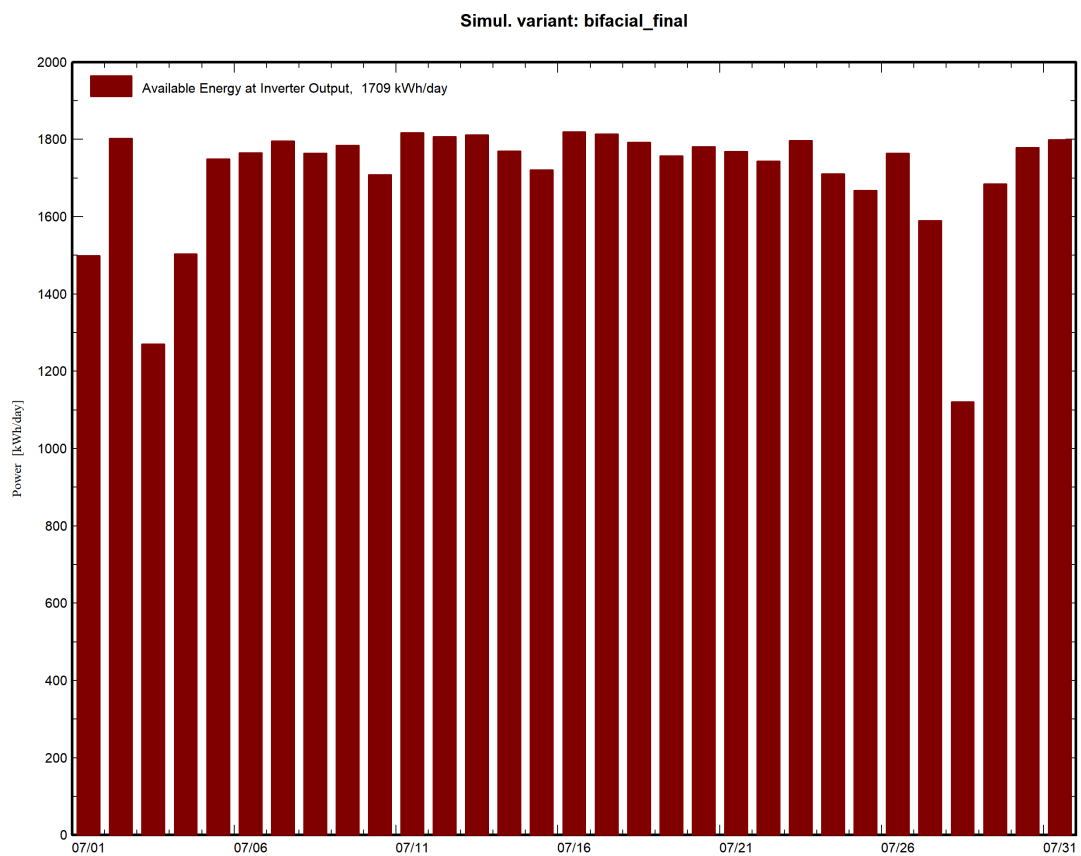


Figure 69: Ημερήσια Παραγωγή Ιουλίου-bifacial fixed-tilt plane

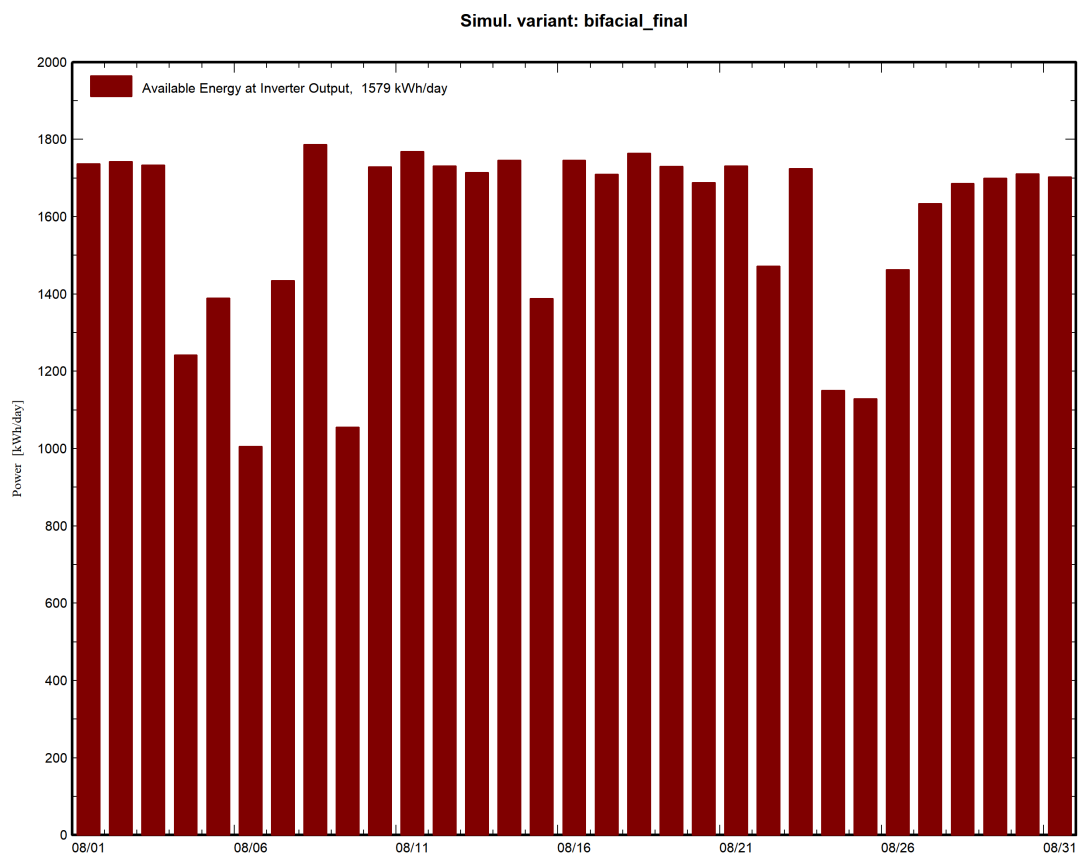


Figure 70: Ημερήσια Παραγωγή Αυγούστου-bifacial fixed-tilt plane

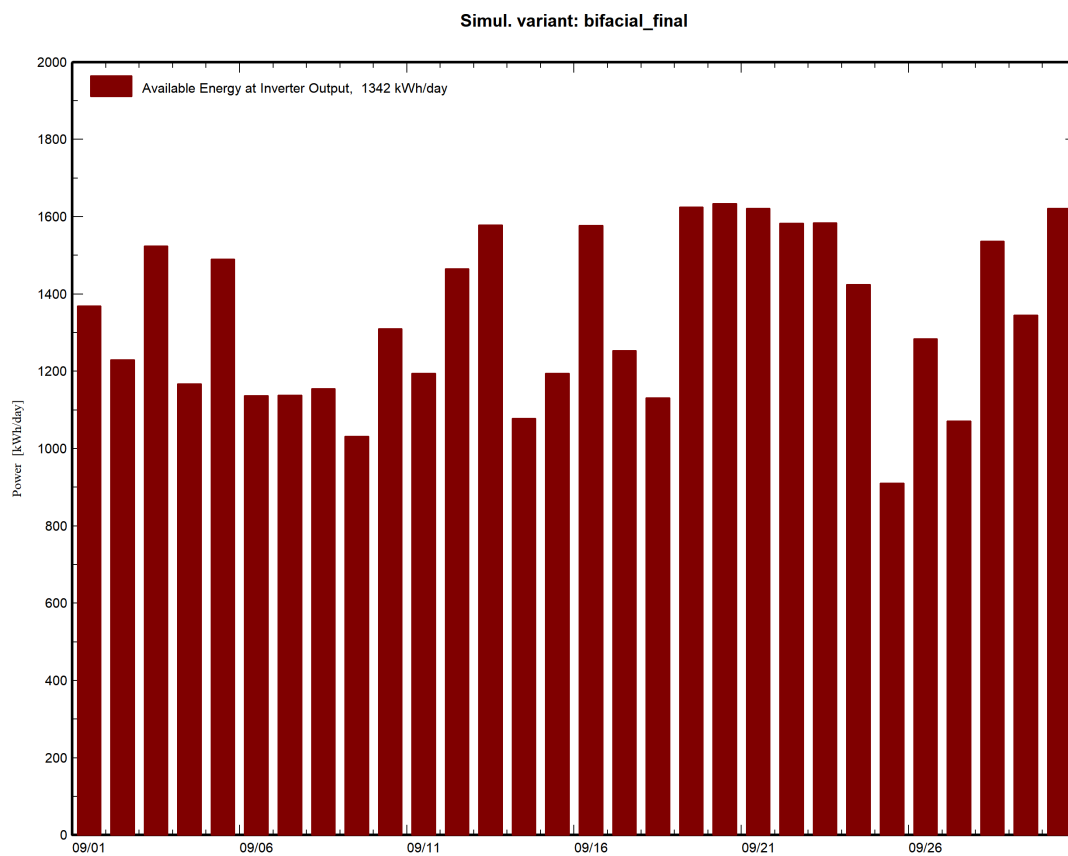


Figure 71: Ημερήσια Παραγωγή Σεπτεμβρίου-bifacial fixed-tilt plane

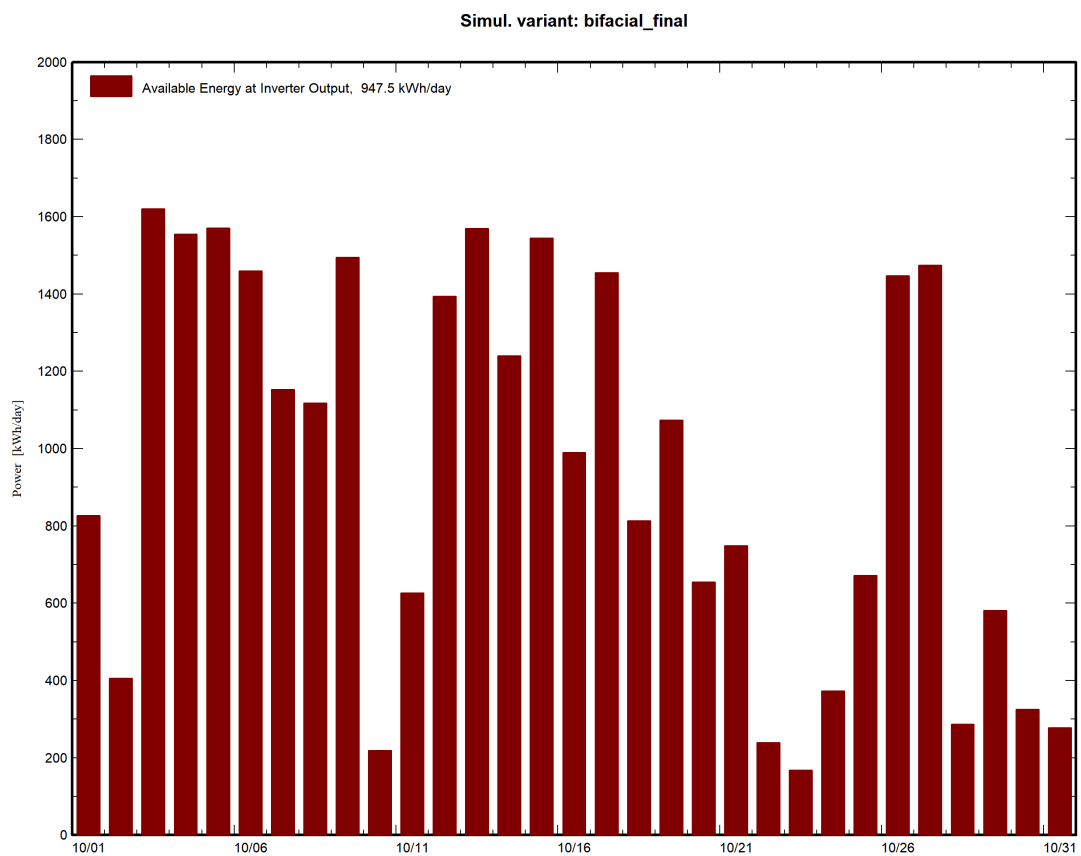


Figure 72: Ημερήσια Παραγωγή Οκτωβρίου-bifacial fixed-tilt plane

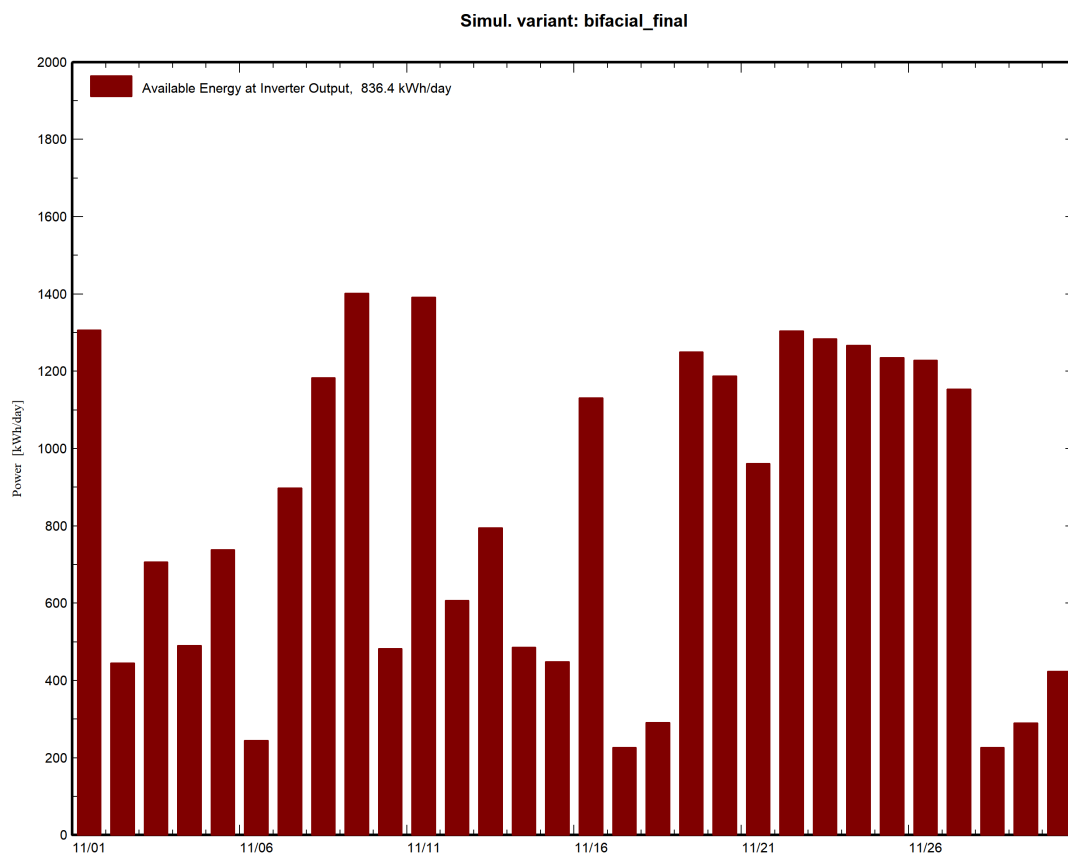


Figure 73: Ημερήσια Παραγωγή Νοεμβρίου-bifacial fixed-tilt plane

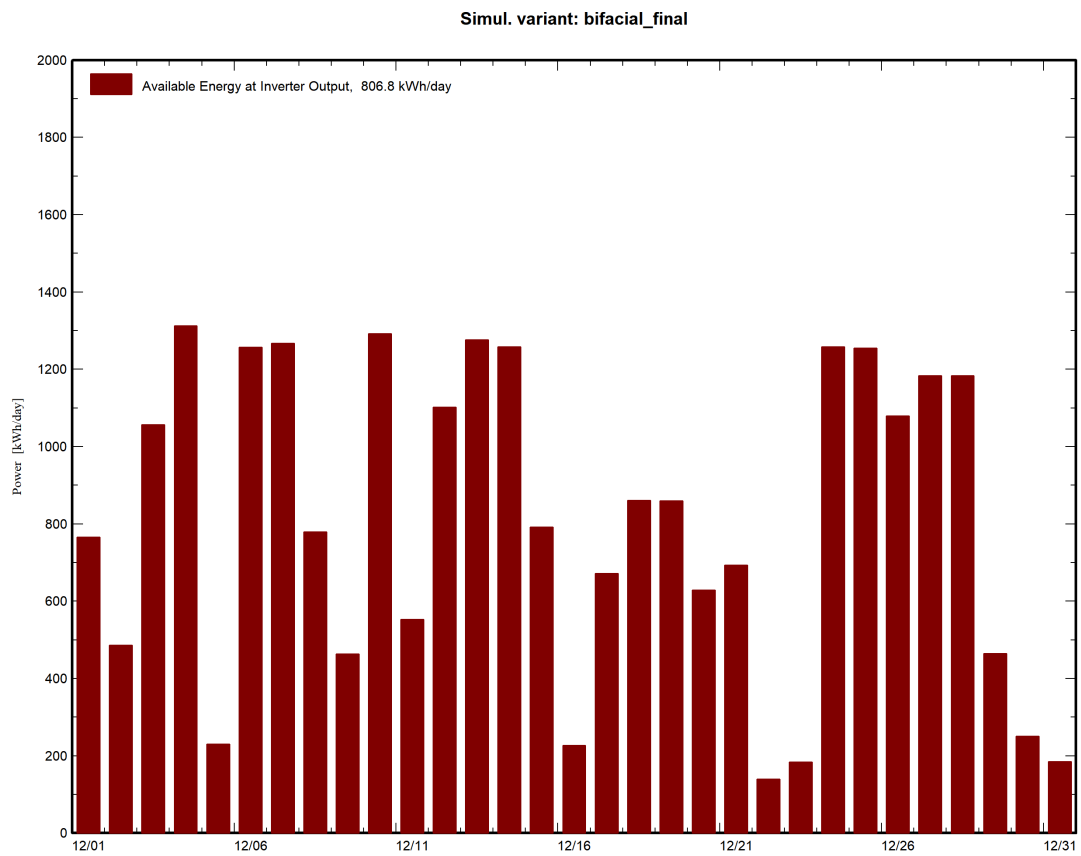


Figure 74: Ημερήσια Παραγωγή Δεκεμβρίου-bifacial fixed-tilt plane

#### 4.4 Σύγκριση των συστημάτων

Στο κεφάλαιο αυτό θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δύο συστημάτων. Αρχικά παρατίθεται ο πίνακας 4.1 με τις κύριες παραμέτρους σχεδίασης του κάθε συστήματος.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι σχεδίασης συστημάτων		
	monofacial	bifacial
υψος από το έδαφος	1.5m	1.5m
κλίση πλαισίων (tilt)	30°	30°
αζιμούθιο	0°	0°
pitch	6m	6m
orientation model	fixed-tilt plane	unlimited sheds

Οι διάφοροι παράμετροι σχεδίασης έχουν παραμείνει ίδιες, όπου αυτό είναι εφικτό, ώστε να γίνει πιο εμφανές το αποτέλεσμα που έχει το bifaciality στην συνολική λειτουργία του συστήματος.

Στον πίνακα 4.2 βρίσκονται τα κύρια αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων και ακολουθούν διαγράμματα σύγκρισης της μηνιαίας παραγωγής του κάθε συστήματος, του μηνιαίου performance ratio των συστημάτων και τέλος ένα διάγραμμα του μηνιαίου bifacial gain.



Πίνακας 4.2: Σύγκριση Κύριων Αποτελεσμάτων		
	monofacial	bifacial
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια	403 MWh	441 MWh
Ετησια Παραγωγή ανά kWp	1625 kWh/kWp	1779 kWh/kWp
Performance Ratio	0.845	0.924
Μέση Μηνιαία Απόδοση	0.1795	0.1965

Στην συνέχεια ακολουθεί διάγραμμα με τις μηνιαίες τιμές παραγόμενης ενέργειας των δύο συστημάτων (figure 75).

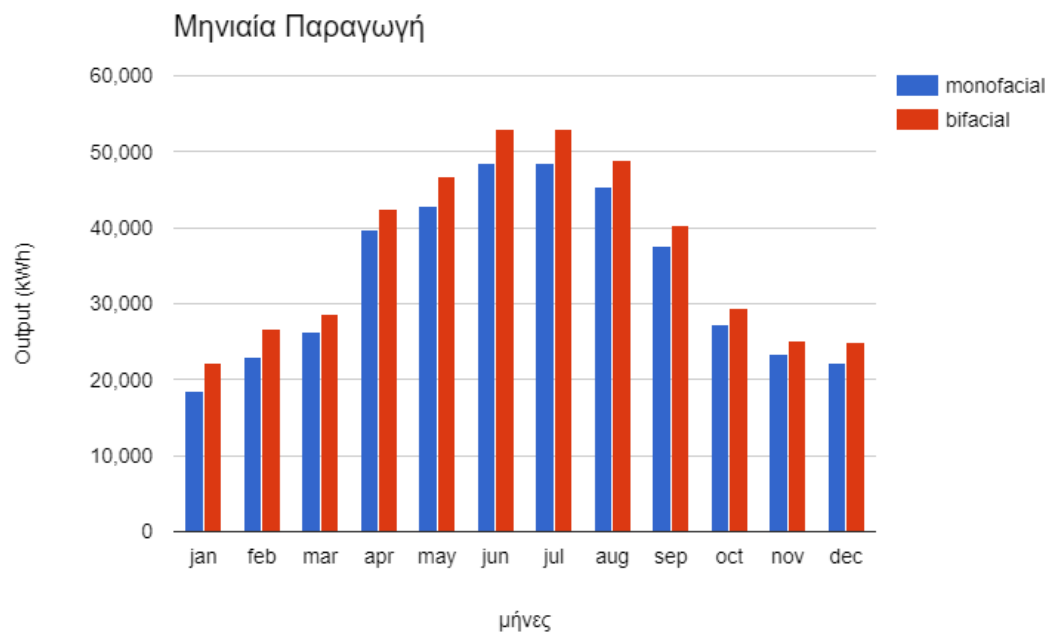


Figure 75: Σύγκριση μηνιαίας παραγωγής ενέργειας

Παρατηρείται όπως ήταν αναμενόμενο ότι το σύστημα με πάνελ διπλής όψης είχε μεγαλύτερη παραγωγή όλους τους μήνες του έτους. Στον πίνακα 4.3 παρατίθενται οι μέγιστες και ελάχιστες μηνιαίες παραγωγές των δύο συστημάτων.

Πίνακας 4.3: Μέγιστες και Ελάχιστες Μηνιαίες παραγωγές				
			monofacial	bifacial
Ελάχιστη	Μηνιαία	παραγωγή	18415.7578 (Ιανουάριος)	22201.8848 (Ιανουάριος)
(kWh)				
Μέγιστη	Μηνιαία	παραγωγή	148593.0313 (Ιούλιος)	53007.6055 (Ιούνιος)
(kWh)				

Στη συνέχεια παρατίθεται γράφημα όπου γίνεται η σύγκριση των μηνιαίων τιμών του performance ratio των δύο συστημάτων (figure 76).

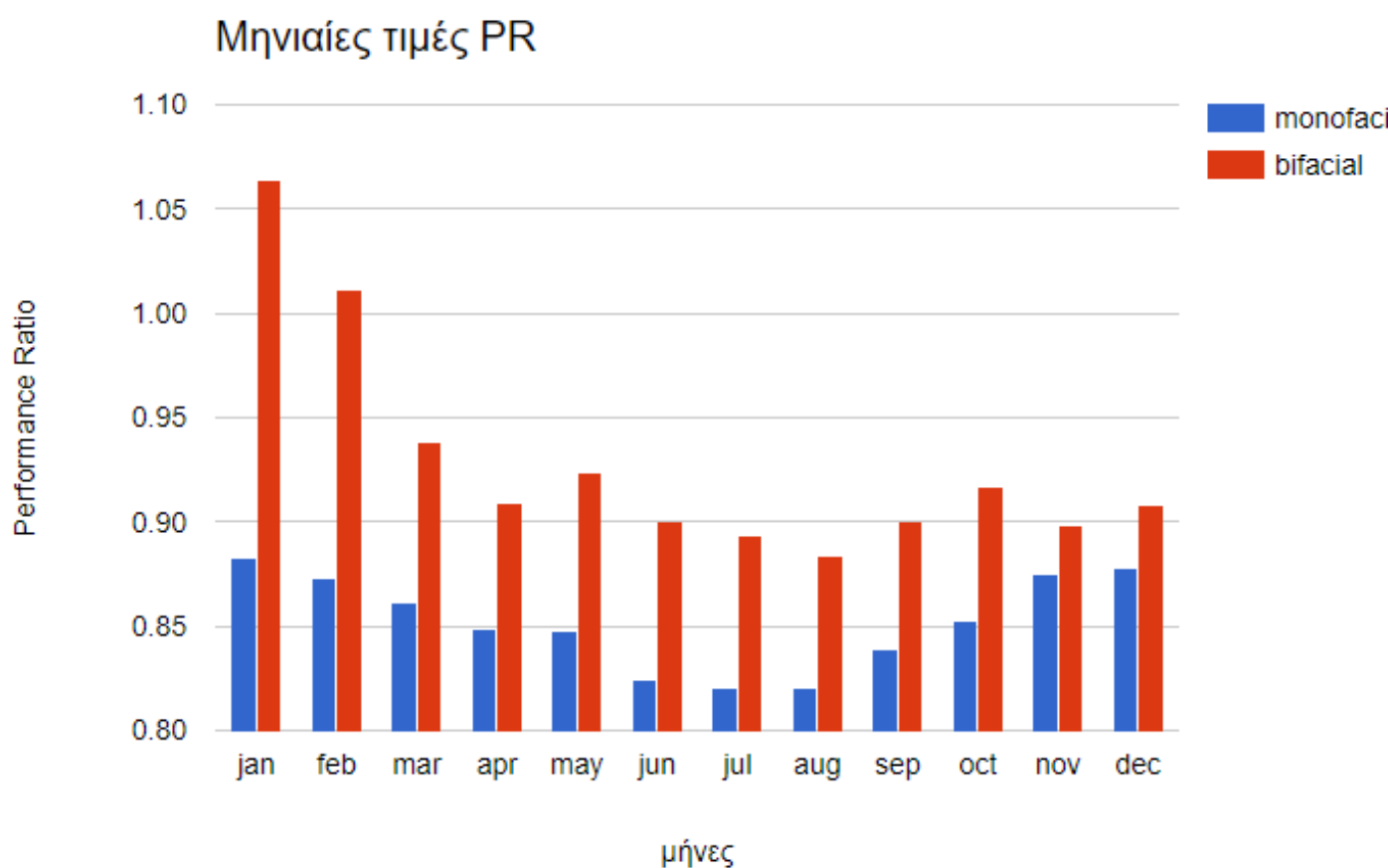


Figure 76: Σύγκριση μηνιαίου PR

Παρατηρείται ότι το bifacial σύστημα σταθερών βάσεων έχει μεγαλύτερο PR από το Monofacial καθ'όλη την διάρκεια της χρονιάς.

Ακόμα, παρατίθεται διάγραμμα του μηνιαίου bifacial gain του συστήματος. Το ετήσιο bifacial gain του συστήματος ανέρχεται στο 9.42% ωστόσο, όπως φαίνεται στο γράφημα του figure 77, δεν είναι σταθερό όλη την χρονιά αλλά κυμαίνεται μεταξύ 7.09% τον απρίλιο και 20.55% τον Ιανουάριο.

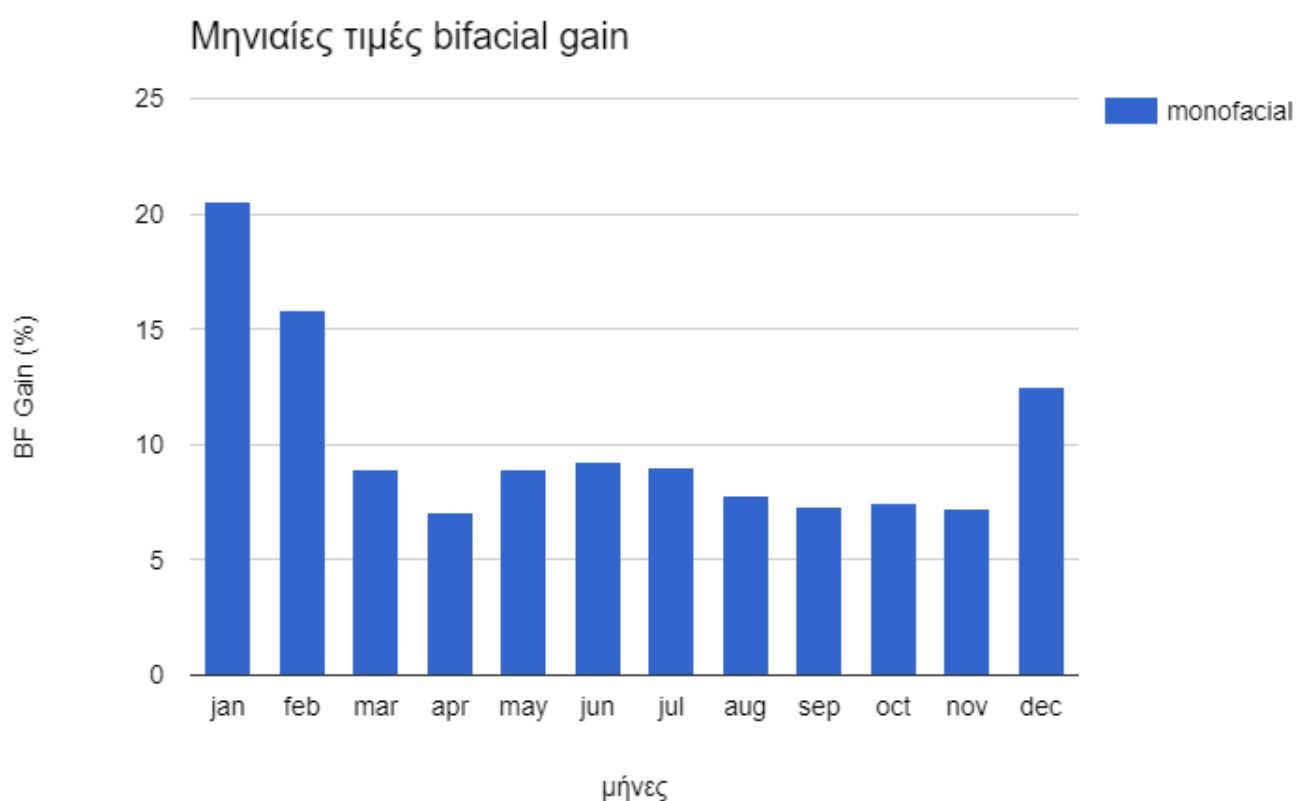


Figure 77: τιμές BF gain ανά τους μήνες

## 5 Οικονομική Μελέτη

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει οικονομική αξιολόγηση για το σύστημα με Φ/B πλαίσια διπλής όψης. Παρουσιάζονται τα οικονομικά δεδομένα που συλλέχθηκαν, η εισαγωγή τους στο PVsyst και υπολογίζονται παράμετροι που κρίνουν την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης.

### 5.1 Παρουσίαση Οικονομικών Δεδομένων

Το σύστημα αποτελείται από 598 PV Modules Jollywood HD108N και 2 Inverters Huawei Sun2000-100KTL. Εκτός από τα κόστη του εξοπλισμού, πρέπει να ληφθεί υπόψη και το κόστος εγκατάστασης.

Το κόστος των πλαισίων είναι  $598 \times 104.90 = 62730.20\text{€}$  και αναλογεί περίπου στο 36% του συνολικού κόστους του συστήματος(11). Άρα το συνολικό κόστος του συστήματος μπορεί να προσεγγιστεί στα  $62730.20 \div 0.36 = 174250.56\text{€}$ .

Το συνολικό κόστος των λοιπών στοιχείων του συστήματος (balance of system, BOS), δηλαδή των καλωδιώσεων, των βάσεων στήριξης, των αντιστροφών αλλά και των χρεώσεων εγκατάστασης, ανέρχεται περίπου στο 28% του κόστους του συστήματος(11). Άρα,  $BOS = 0.28 \times 174250.56 = 48790.15\text{€}$ .

Ωστόσο γνωρίζουμε συγκεκριμένα το κόστος των inverters που έχουν χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό του συστήματος και ανέρχεται στα 7390€ ανά αντιστροφή άρα συνολικά, για 2 inverters:  $InvCost = 7390 \times 2 = 14780\text{€}$ .

Έτσι, τα λοιπά κόστη εξοπλισμού και εγκατάστασης υπολογίζονται ως  $InstCost = BOS - InvCost = 48790.15 - 14780 = 34010.15\text{€}$

Επίσης θεωρήθηκε ότι η τιμή του οικοπέδου αναλογεί στο 7% της αξίας της επένδυσης(11). Άρα,  $SiteCost = 0.07 \times 174250.20 = 12197.51\text{€}$

Οι παραπάνω παράμετροι παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.1:

Πίνακας 5.1: Κόστος Εξοπλισμού Συστήματος			
	ποσότητα	κόστος μονάδας (€)	συνολικό κόστος (€)
Πλαίσια	598	104.90	62730
Inverters	2	7390	14780
Λοιπά κόστη εγκατάστασης	1	34010.15	34010.15
Οικόπεδο	1	1	12197.51
Συνολικό κόστος			111532.35

Εκτός από τα κόστη εγκατάστασης, υπάρχουν και τα ετήσια λειτουργικά κόστη (OPEX) τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτά περιλαμβάνουν κόστη συντήρησης, καθαρισμού, επισκευών αλλά και κόστη ασφάλισης και φόρους. Αυτά τα κόστη παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 5.2: Ετήσιες Δαπάνες Λειτουργίας	
Ετήσιο Κόστος Συντήρησης	2600 €
Ετήσια Δαπάνη Ασφάλισης	1500€
Ετήσιος Φόρος	6000€
Συνολικά ετήσια OPEX	10100€

Για την οικονομική μελέτη του συστήματος πρέπει να οριστούν ακόμα κάποιες οικονομικές παράμετροι. Αυτές είναι, ο πληθωρισμός (inflation rate) ο οποίος ορίστηκε στο 2.26%/έτος(12), ο συντελεστής προεξόφλησης (discount rate) ο οποίος ορίστηκε στο 4.5%(13), ο φόρος εισοδήματος (income tax) ο οποίος ορίστηκε στο 22%, το προσωπικό κεφάλαιο που χρησιμοποιήθηκε στην επένδυση (own funds) που ορίστηκε στα 63717.86€, το δάνειο (loan) που ορίστηκε στα 60000€ και το επιτόκιο του δανείου (interest rate) που ορίστηκε στο 7.73%. Οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 5.3: Οικονομικές Παράμετροι	
inflation (%)	2.26
discount rate (%)	4.5
Income Tax (%)	22
own funds (€)	63717.86
loan (€)	60000
interest rate (%)	7.73

## 5.2 Εισαγωγή Δεδομένων Στο Pvsyst

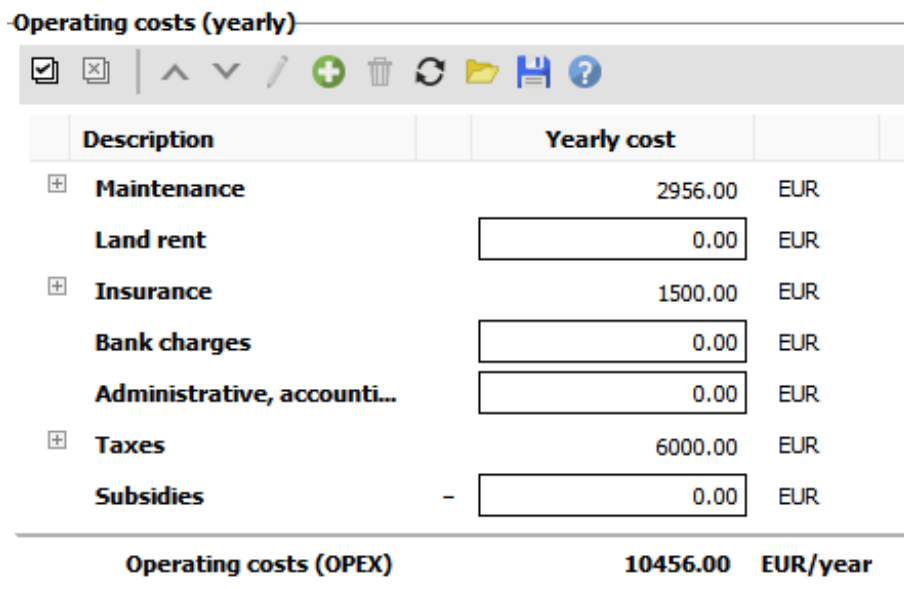
Στην συνέχεια εισήχθησαν τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στο Pvsyst ώστε να γίνει η οικονομική μελέτη. Στο figure 78 φαίνονται τα κόστη εγκατάστασης, όπως αυτά εισήχθησαν στο Pvsyst.

Installation costs					
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>   ^ v					
Description	Quantity	Unit price		Total	
<input type="checkbox"/> <b>PV modules</b>				62730.20	EUR
JW-HD108N-415-Black Module	598.00	104.90		62730.20	EUR
Supports for modules	598.00	0.00		0.00	EUR
<input type="checkbox"/> <b>Inverters</b>				14780.00	EUR
SUN2000-100KTL-M1-480Vac	2.00	7390.00		14780.00	EUR
<input type="checkbox"/> <b>Other components</b>				0.00	EUR
<input type="checkbox"/> <b>Studies and analysis</b>				0.00	EUR
<input type="checkbox"/> <b>Installation</b>				34010.15	EUR
Global installation cost per ...	598.00	56.87		34010.15	EUR
Global installation cost per i...	2.00	0.00		0.00	EUR
Transport	0.00	0.00		0.00	EUR
Settings	0.00	0.00		0.00	EUR
Grid connection	0.00	0.00		0.00	EUR
<input type="checkbox"/> <b>Insurance</b>				0.00	EUR
<input type="checkbox"/> <b>Land costs</b>				12197.51	EUR
Land purchase	1.00	12197.51		12197.51	EUR
Land preparation	0.00	0.00		0.00	EUR
Land taxes (%)	0.00%	of 0.00		0.00	EUR
<b>Loan bank charges</b>	0.00	0.00		0.00	EUR
<input type="checkbox"/> <b>Taxes</b>				0.00	EUR
<b>Total installation cost</b>				<b>123717.86</b>	<b>EUR</b>
Depreciable asset				77510.20	EUR

Figure 78: Pvsyst-Εισαγωγή δαπανών εγκατάστασης

Ακόμα, εισάγουμε τις ετήσιες λειτουργικές δαπάνες, όπως φαίνεται στο figure 79

**Operating costs (yearly)**



Description	Yearly cost	
<input type="checkbox"/> Maintenance	2956.00	EUR
Land rent	<input type="text" value="0.00"/>	EUR
<input type="checkbox"/> Insurance	1500.00	EUR
Bank charges	<input type="text" value="0.00"/>	EUR
Administrative, accounti...	<input type="text" value="0.00"/>	EUR
<input type="checkbox"/> Taxes	6000.00	EUR
Subsidies	- <input type="text" value="0.00"/>	EUR
<b>Operating costs (OPEX)</b>	<b>10456.00</b>	<b>EUR/year</b>

Figure 79: PVsyst-Εισαγωγή ετήσιων δαπανών λειτουργίας

Έπειτα εισάγουμε στο PVsyst τις άλλες οικονομικές παραμέτρους που παρουσιάστηκαν, όπως φαίνεται στο figure 80 και την χρηματοδότηση του συστήματος όπως φαίνεται στο figure 81.



**Simulation period**

Project lifetime  years Start year

**Projected variations**

Inflation  %/year Discount rate  %/year

Production variation (aging)

☒ Linear  %/year ☐ Aging tool results

**Income dependent expenses**

Income tax  %/year Dividends  %/year

Other income tax  %/year

**Tax depreciation**

Asset	Type	Depreciation period	Depreciable
<b>PV modules</b>			
JW-HD108N-4	Straight-line	20 years	62730.20 EUR
<b>Inverters</b>			
SUN2000-100K	Straight-line	20 years	14780.00 EUR
<b>Total redeemable</b>			<b>77510.20 EUR</b>

Figure 80: PVsyst-Εισαγωγή οικονομικών παραμέτρων

**Financing**

Investment 123717.86 EUR

Own funds  EUR

Subsidies  EUR

Loans

EUR  years  %

Figure 81: PVsyst-Εισαγωγή στοιχείων χρηματοδότησης επένδυσης

Τέλος, εισάγεται η τιμή πώλησης KWh (Tarriiff) η οποία είναι 0.064 EUR/KWh(14), όπως φαίνεται στο figure 82.

The screenshot shows the 'Pricing type' and 'Other general parameters' sections of the PVsyst software. In the 'Pricing type' section, 'Fixed tariff' is selected. In the 'Feed-in tariff' section, the 'Fixed feed-in tariff' is set to 0.06400 EUR/kWh. The 'Other general parameters' section includes fields for 'Annual connection tax' (0.000 EUR/year), 'Annual tariff variation' (0.00 %/year), 'Duration of tariff warranty' (30 years), and 'Feed-in tariff decrease after warranty' (0.0 %).

Figure 82: PVsyst-Εισαγωγή Τιμής κιλοβατώρας

### 5.3 Αποτελέσματα Οικονομικής Μελέτης

Αφού εισήχθησαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα, το προόγραμμα υπολογίζει μεγέθη όπως το ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE), την καθαρά παρούσα αξία (NPV), τον χρόνο αποπληρωμής και την επιστροφή επί της επένδυσης (ROI).

Το LCOE υπολογίζεται από την σχέση:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + T_t}{(1+i)^n}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^n}}$$

(15) Όπου

$I_t$  = το τοκοχρεολύσιο για το έτος  $t$

$M_t$  = τα έξοδα συντήρησης και ασφάλισης για το έτος  $t$

$T_t$  = τα έξοδα λόγω εφορίας για το έτος  $t$

$E_t$  = η παραχθείσα ενέργεια για το έτος  $t$

$i$  = είναι το Discount rate

$n$  = ο χρονικός ορίζοντας της επένδυσης

Σημαντικός δείκτης σε μία επένδυση είναι και η καθαρή παρούσα αξία ή NPV (net present value). Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται από τον τύπο:

$$NPV = -C_{in} + \sum_{t=0}^n \frac{P_t}{(1+i)^t}$$

(16) όπου

$C_{in}$  = Το κεφάλαιο του επενδυτή (own funds)

$P_t$  = Τα καθαρά κέρδη της επένδυσης το έτος  $t$

$i$  = το Discount rate

$n$  = ο χρονικός ορίζοντας της επένδυσης

Εφόσον ο δείκτης NPV είναι θετικός, η επιχείρηση είναι κερδοφόρα. Σε περίπτωση που ο δείκτης είναι μηδενικός, τα κέρδη καλύπτουν το κόστος της επένδυσης χωρίς επιπλέον όφελος για τον επενδυτή. Σε περίπτωση που ο δείκτης NPV είναι αρνητικός, η επένδυση καταλήγει σε ζημία.(16)

Το LCOE και ο χρόνος πλήρους αποπληρωμής της επένδυσης (συμπεριλαμβανομένου του δανείου) φαίνεται στο figure 83.

<b>Financial summary</b>	
Installation costs	<b>123717.86</b> EUR
Total yearly cost	<b>17580.01</b> EUR/year
LCOE	<b>0.0473</b> EUR/kWh
Payback period	<b>11.8</b> years

Figure 83: PVsyst: σύνοψη μελέτης

Ο δείκτης NPV και το ROI της επένδυσης, δηλαδή το συνολικό κέρδος της επένδυσης ως ποσοστό επί της αρχικής επένδυσης, παρουσιάζονται στο figure 84.

<b>Return on investment</b>	
Net present value (NPV)	<b>84785.47 EUR</b>
Internal rate of return (IRR)	<b>12.04 %</b>
Payback period	<b>11.8 years</b>
Return on investment (ROI)	<b>68.5 %</b>

Figure 84: PVsyst: επιστροφή επί της επένδυσης

Στον πίνακα του figure 85 παρουσιάζονται τα πλήρη οικονομικά στοιχεία της επένδυσης ανά έτος.

Detailed economic results (EUR)											
Year	Electricity sale	Own funds	Loan principal	Loan interest	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Cumul. profit	% amort.
0	0	63718	0	0	0	0	0	0	0	-63718	0.0%
1	28251	0	8000	4838	10466	3876	9281	2042	5115	-58623	8.8%
2	28364	0	8000	4174	10892	3876	9622	2117	5381	-53890	17.0%
3	28477	0	8000	3710	10934	3876	9958	2191	5642	-48951	26.5%
4	28591	0	8000	3247	11181	3876	10288	2283	5900	-44004	35.3%
5	28706	0	8000	2783	11434	3876	10614	2335	6154	-39085	44.2%
6	28821	0	8000	2319	11692	3876	10934	2405	6404	-34148	53.0%
7	28936	0	8000	1855	11956	3876	11249	2475	6649	-29202	61.8%
8	29052	0	8000	1391	12227	3876	11558	2543	6891	-24416	70.6%
9	29168	0	8000	928	12503	3876	11862	2610	7128	-19620	79.3%
10	29284	0	8000	464	12786	3876	12160	2675	7360	-14880	88.0%
11	29402	0	0	0	13074	3876	12452	2738	13588	-5558	94.7%
12	29519	0	0	0	13370	3876	12774	2700	13449	1423	101.1%
13	29637	0	0	0	13672	3876	12090	2660	13305	8931	107.2%
14	29756	0	0	0	13981	3876	11899	2618	13157	18035	113.0%
15	29875	0	0	0	14297	3876	11702	2574	13003	22754	118.4%
16	29994	0	0	0	14620	3876	11499	2530	12844	29105	123.3%
17	30114	0	0	0	14951	3876	11288	2483	12680	35105	128.4%
18	30235	0	0	0	15288	3876	11071	2436	12511	40770	133.0%
19	30356	0	0	0	15634	3876	10846	2386	12338	46115	137.3%
20	30477	0	0	0	15987	3876	10614	2335	12155	51155	141.3%
21	30599	0	0	0	16349	0	14250	3135	11115	55595	144.8%
22	30721	0	0	0	16718	0	14003	3081	10923	59713	148.3%
23	30844	0	0	0	17096	0	13748	3025	10724	63699	151.4%
24	30968	0	0	0	17482	0	13485	2967	10519	67296	154.4%
25	31092	0	0	0	17877	0	13214	2907	10307	70696	157.1%
26	31216	0	0	0	18281	0	12934	2846	10089	73908	159.7%
27	31341	0	0	0	18695	0	12648	2782	9864	76914	162.2%
28	31466	0	0	0	19117	0	12349	2717	9632	79722	164.4%
29	31592	0	0	0	19549	0	12043	2649	9393	82343	166.6%
30	31718	0	0	0	19991	0	11727	2580	9147	84785	168.5%
Total	898571	63718	80000	25599	441891	77510	353661	77805	253386	84785	168.5%

Figure 85: Αναλυτικά οικονομικά στοιχεία ανά έτος

Στο γράφημα του figure 86 αποτυπώνονται τα καθαρά έσοδα της επένδυσης για κάθε χρονιά. Το απότομο άλμα που παρατηρείται, οφείλεται στην ολοκλήρωση της αποπληρωμής του δανείου.

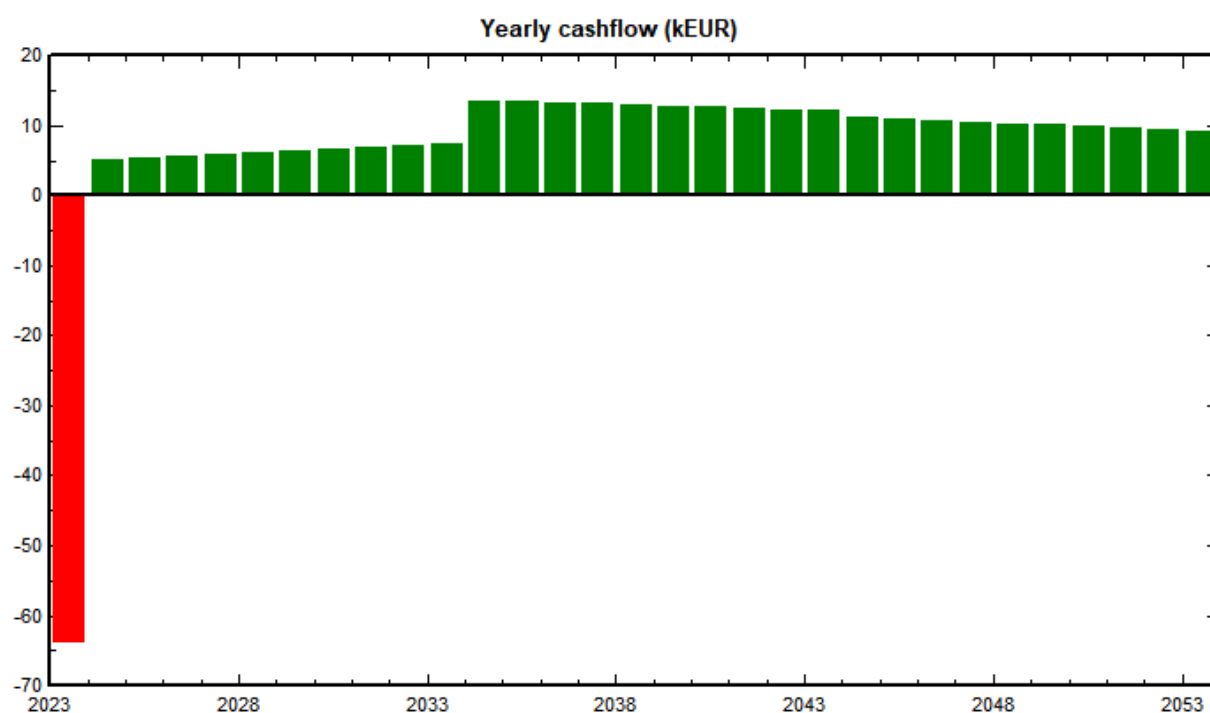


Figure 86: Ετήσια έσοδα

Τέλος, στο figure 87 παρατίθεται το διάγραμμα που απεικονίζει την συνολική οικονομική απόδοση του συστήματος, όπου παρατηρούμε ότι η επένδυση γίνεται κερδοφόρα στο 11ο έτος της.

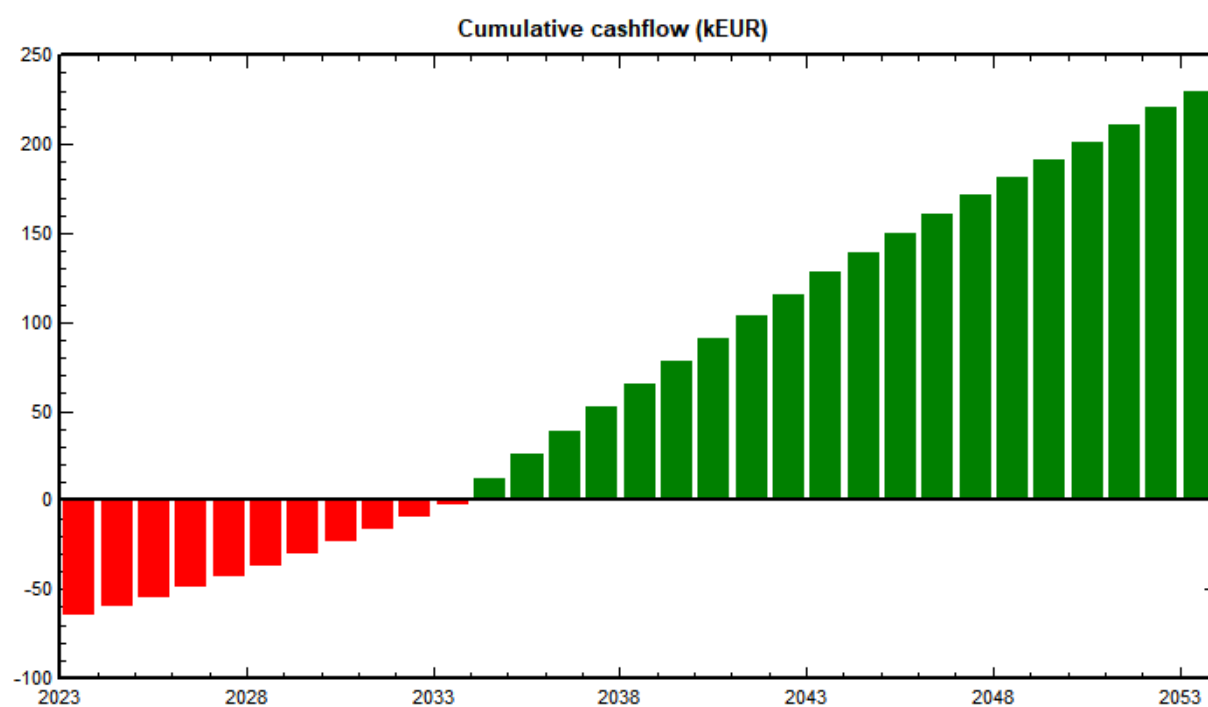


Figure 87: Συνολική οικονομική απόδοση συστήματος

## 5.4 Οικονομική μελέτη monofacial συστήματος

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οικονομικής μελέτης του monofacial συστήματος. Εφόσον το πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του monofacial συστήματος, δεν υπάρχει καθώς είναι το ίδιο με αυτό του bifacial συστήματος αλλά με "ανενεργή" την οπίσθια όψη, η τιμή του πλαισίου ορίστηκε στα 66 ευρώ ανά πλαίσιο. Αυτή η τιμή είναι προσέγγιση που έγινε με βάση στατιστικά στοιχεία για την τιμή των πλαισίων ανά εγκατεστημένη WP στην Ευρώπη (17).

Οι υπόλοιπες παράμετροι της οικονομικής μελέτης παρέμειναν όπως παρουσιάστηκαν στην οικονομική μελέτη του bifacial συστήματος, με την εξαίρεση του ποσού δανεισμού το οποίο άλλαξε αντιστοιχώς ώστε να αποτελεί το 48.5% της συνολικής επένδυσης, όπως ήταν και στο bifacial σύστημα.

Με βάση τα παραπάνω, υπήρξαν τα κατωθί αποτελέσματα:

Αρχικά, στο figure 88 φαίνεται το LCOE και ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης.

<b>Financial summary</b>	
Installation costs	<b>100692.97</b> EUR
Total yearly cost	<b>17126.26</b> EUR/year
LCOE	<b>0.0483</b> EUR/kWh
Payback period	<b>11.3</b> years

Figure 88: PVsyst: σύνοψη μελέτης monofacial system



Στην συνέχεια, στο figure 89 φαίνεται ο δείκτης NPV και το ROI του συστήματος:

Return on investment	
Net present value (NPV)	<b>72517.44 EUR</b>
Internal rate of return (IRR)	<b>12.90 %</b>
Payback period	<b>11.3 years</b>
Return on investment (ROI)	<b>72.0 %</b>

Figure 89: PVsyst: επιστροφή επί της επένδυσης

Έπειτα, στον πίνακα του figure 90 παρουσιάζονται τα αναλυτικά οικονομικά στοιχεία της επένδυσης, ανά έτος.

Detailed economic results (EUR)											
Year	Electricity sale	Own funds	Loan principal	Loan interest	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Cumul. profit	% amort.
0	0	51857	0	0	0	0	0	0	0	-51857	0.0%
1	25911	0	3416	3778	10458	2724	8856	1948	6908	-45907	9.3%
2	25915	0	3679	3511	10692	2724	8987	1977	7009	-40392	18.6%
3	26018	0	3963	3227	10934	2724	9133	2009	7085	-35204	27.6%
4	26122	0	4269	2920	11181	2724	9297	2045	7107	-30419	36.6%
5	26227	0	4599	2590	11434	2724	9478	2085	7116	-25991	46.6%
6	26332	0	4955	2235	11692	2724	9680	2130	7120	-21905	54.6%
7	26437	0	5338	1852	11956	2724	9905	2179	7112	-18149	63.6%
8	26543	0	5750	1439	12227	2724	10153	2234	6983	-14708	72.6%
9	26649	0	6195	995	12503	2724	10427	2294	6653	-11571	81.6%
10	26756	0	6674	516	12785	2724	10730	2361	6220	-8724	91.3%
11	26863	0	0	0	13074	2724	11054	2434	5754	-1728	98.3%
12	26970	0	0	0	13370	2724	10879	2393	5320	4681	104.8%
13	27076	0	0	0	13672	2724	10682	2350	4925	11119	111.0%
14	27196	0	0	0	13981	2724	10461	2306	4559	17005	116.9%
15	27295	0	0	0	14297	2724	10274	2280	4175	22553	122.4%
16	27404	0	0	0	14620	2724	10080	2213	3771	27790	127.8%
17	27514	0	0	0	14951	2724	9839	2165	3359	32701	132.5%
18	27624	0	0	0	15288	2724	9611	2114	2921	37329	137.1%
19	27734	0	0	0	15634	2724	9378	2063	2458	41678	141.4%
20	27845	0	0	0	15987	2724	9134	2009	1989	45762	145.4%
21	27957	0	0	0	16349	0	11008	2554	9054	49354	149.0%
22	28069	0	0	0	16718	0	11351	2497	8853	52716	152.4%
23	28181	0	0	0	17096	0	11085	2439	8640	55856	155.5%
24	28294	0	0	0	17482	0	10811	2378	8423	58790	158.4%
25	28407	0	0	0	17877	0	10529	2318	8213	61523	161.1%
26	28520	0	0	0	18281	0	10239	2253	7996	64065	163.8%
27	28634	0	0	0	18695	0	9940	2187	7773	66426	166.0%
28	28749	0	0	0	19117	0	9632	2119	7543	68616	168.1%
29	28864	0	0	0	19549	0	9315	2049	7306	70645	170.2%
30	28979	0	0	0	19991	0	8989	1977	7011	72517	172.0%
Total	820980	51857	48936	23060	441891	54487	301541	66339	240853	72517	172.0%

Figure 90: PVsyst: Αναλυτικά οικονομικά στοιχεία ανά έτος

Στο γράφημα του figure 91 αποτυπώνονται τα καθαρά έσοδα της επένδυσης για κάθε χρονιά.

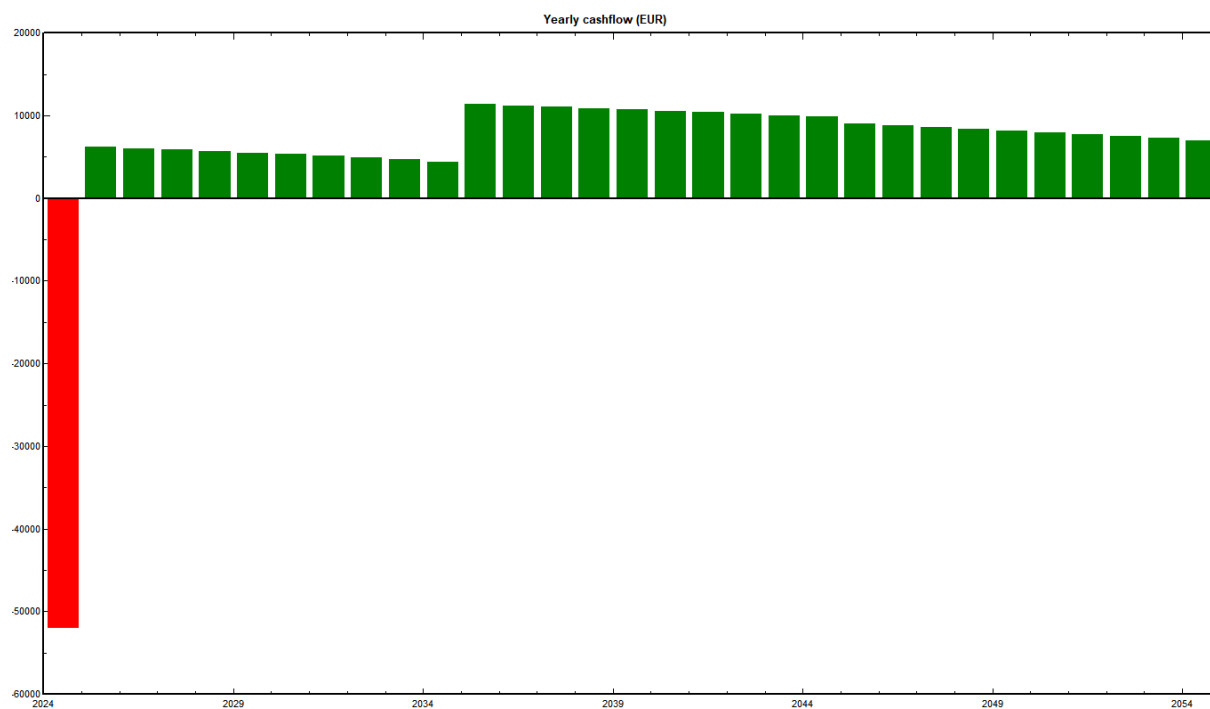


Figure 91: Ετήσια έσοδα monofacial συστήματος

Τέλος, στο γράφημα του figure 92 παρατίθεται το διάγραμμα που απεικονίζει την συνολική οικονομική απόδοση του συστήματος.

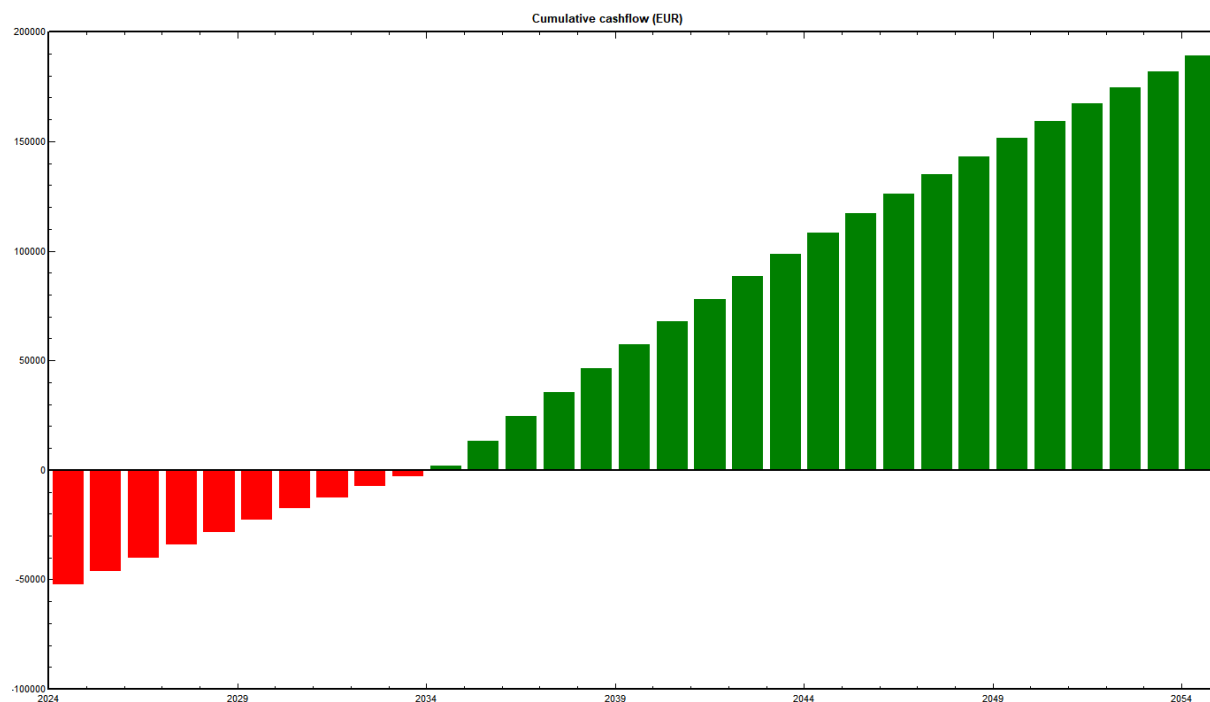


Figure 92: Συνολική οικονομική απόδοση monofacial συστήματος

## 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων οικονομικής μελέτης

Στον πίνακα 5.4 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των οικονομικών μελετών των δύο συστημάτων.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα οικονομικών μελετών		
	monofacial	bifacial
Κόστος εγκατάστασης	100692.97 €	123727.86 €
LCOE	0.0483 €/kWh	0.0473 €/kWh
Χρόνος αποπληρωμής επένδυσης	11.3 χρόνια	11.8 χρόνια
NPV	72517.44 €	84785.47 €
ROI	72 %	68.5 %

Τόσο το monofacial όσο και το bifacial σύστημα, αποτελούν βιώσιμες επενδύσεις όπως φαίνεται από το γεγονός ότι και στις δύο περιπτώσεις ο δείκτης NPV είναι θετικός. Το monofacial σύστημα είναι φθηνότερο ως προς την εγκατάσταση του με κόστος 100692.97 ευρώ έναντι 123717.86 ευρώ που είναι το κόστος εγκατάστασης του bifacial συστήματος. Ωστόσο παρατηρούμε ότι το LCOE του monofacial συστήματος είναι 0.0483 EUR/kWh έναντι του LCOE του bifacial συστήματος που είναι 0.0473 EUR/kWh. Η διαφορά είναι μικρή ωστόσο το LCOE είναι ένας καλός δείκτης της ποιότητας του συστήματος. Παρομοίως το NPV του bifacial συστήματος είναι μεγαλύτερο από το NPV του monofacial συστήματος το οποίο σημαίνει ότι η επένδυση με τα bifacial πλαίσια είναι πιο κερδοφόρα.

## 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελέτη

Σε αυτή τη διπλωματική έγινε μελέτη των bifacial συστημάτων. Αρχικά έγινε εισαγωγή στο ενεργειακό πρόβλημα με σκοπό να τονιστεί η αναγκαιότητα στροφής προς τις ΑΠΕ. Έγινε ανάλυση ενός εκ των μεθόδων εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αναλύοντας τις κύριες τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών πλαισίων και εστιάζοντας στα πλαίσια διπλής όψης.

Σχεδιάστηκαν δύο συστήματα με πανομοιότυπες παραμέτρους σχεδίασης, το πρώτο με την χρήση συμβατικών Φ/B πλαισίων και το δεύτερο με την χρήση πλαισίων διπλής όψης και συγκρίθηκαν οι παραγωγές τους. Από την σύγκριση παρατηρήσαμε την αυξημένη παραγωγή του bifacial συστήματος, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες.

Έγινε οικονομική μελέτη των δύο συστημάτων και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα αυτών, όπου διαπιστώθηκε ότι, παρά το αυξημένο κόστος εγκατάστασης, το bifacial σύστημα υπερτερεί του monofacial. Έτσι, φαίνεται ότι η τεχνολογία των bifacial συστημάτων, έχει χώρο στην αγορά και έχει την δυνατότητα να αντικαταστήσει τα monofacial συστήματα.

Το ζήτημα επιδέχεται βαθύτερης μελέτης. Στο πνεύμα αυτό προτείνονται κάποιες ιδέες:

- Έρευνα στα υλικά που θα μπορούσαν να μειώσουν το κόστος των bifacial modules.
- Υπολογισμός ελάχιστου bifacial gain ώστε το bifacial σύστημα να σημειώνει μικρότερο LCOE από το αντίστοιχο monofacial.
- Συνδυασμός bifacial συστημάτων με τεχνολογίες όπως 1p και 2p tracking

## 7 Αναφορές Συστημάτων από το PVsyst

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται αυτούσιες οι αναφορές των προσομοιώσεων των δύο συστημάτων, όπως αυτές δημιουργούνται από το PVsyst.

### 7.1 Monofacial Σύστημα

# PVsyst - Simulation report

## Grid-Connected System

Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Tables on a building

System power: 248 kWp

Psári - Greece

### Author

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**PVsyst V7.4.8**

VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

**Project: bifacialThesis**

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**Project summary**

<b>Geographical Site</b>	<b>Situation</b>	<b>Project settings</b>
<b>Psári</b>	Latitude 37.87 °N	Albedo 0.20
Greece	Longitude 22.53 °E	
	Altitude 802 m	
	Time zone UTC+2	
<b>Weather data</b>		
Psári		
PVGIS api TMY		

**System summary**

<b>Grid-Connected System</b>	<b>Tables on a building</b>	
<b>PV Field Orientation</b>	<b>Near Shadings</b>	<b>User's needs</b>
Fixed plane	Linear shadings : Fast (table)	Unlimited load (grid)
Tilt/Azimuth 30 / 0 °		
<b>System information</b>		
<b>PV Array</b>	<b>Inverters</b>	
Nb. of modules 598 units	Nb. of units 2 units	
Pnom total 248 kWp	Pnom total 200 kWac	
	Pnom ratio 1.241	

**Results summary**

Produced Energy 403273 kWh/year	Specific production 1625 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR 84.47 %
---------------------------------	---------------------------------------	------------------------

**Table of contents**

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Horizon definition	4
Near shading definition - Iso-shadings diagram	5
Main results	6
Loss diagram	7
Predef. graphs	8
Single-line diagram	9
Cost of the system	10
Financial analysis	11
CO <sub>2</sub> Emission Balance	14



**PVsyst V7.4.8**

VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

**Project: bifacialThesis**

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**General parameters**

General parameters					
Grid-Connected System		Tables on a building			
PV Field Orientation		Sheds configuration		Models used	
Orientation		Nb. of sheds	64 units	Transposition	Perez
Fixed plane		Sizes		Diffuse	Imported
Tilt/Azimuth	30 / 0 °	Sheds spacing	6.00 m	Circumsolar	separate
		Collector width	2.21 m		
		Ground Cov. Ratio (GCR)	36.9 %		
		Shading limit angle			
		Limit profile angle	15.2 °		
Horizon		Near Shadings		User's needs	
Average Height	7.2 °	Linear shadings : Fast (table)		Unlimited load (grid)	

**PV Array Characteristics**

<b>PV module</b>		<b>Inverter</b>	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	JW-HD108N-415-Black Module	Model	SUN2000-100KTL-M1-480Vac
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	415 Wp	Unit Nom. Power	100 kWac
Number of PV modules	598 units	Number of inverters	2 units
Nominal (STC)	248 kWp	Total power	200 kWac
Modules	23 string x 26 In series	Operating voltage	200-1000 V
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Max. power (>=40°C)	110 kWac
Pmpp	230 kWp	Pnom ratio (DC:AC)	1.24
U mpp	751 V	Power sharing within this inverter	
I mpp	306 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	248 kWp	Total power	200 kWac
Total	598 modules	Max. power	220 kWac
Module area	1168 m <sup>2</sup>	Number of inverters	2 units
		Pnom ratio	1.24

**Array losses**

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance

Uc (const)20.0 W/m²K

Uv (wind)0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res.40 mΩ

Loss Fraction1.5 % at STC

Module Quality Loss

Loss Fraction-0.4 %

Module mismatch losses

Loss Fraction2.0 % at MPP

IAM loss factor

Incidence effect (IAM): Fresnel smooth glass, n = 1.526

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.998	0.981	0.948	0.862	0.776	0.636	0.403	0.000



PVsyst V7.4.8

VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

#### Horizon definition

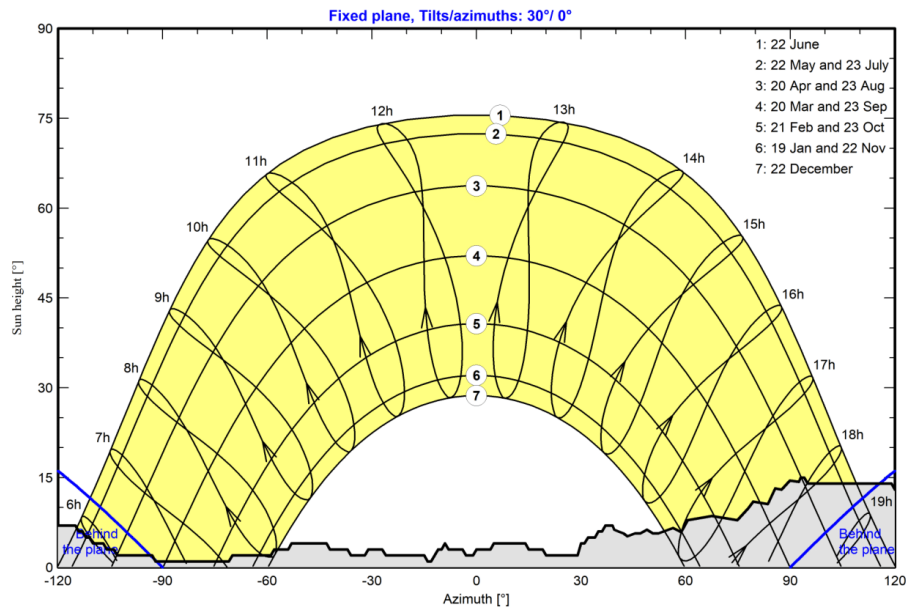
Horizon from Meteonorm web service, lat=37.8654, lon=22.5269

Average Height	7.2 °	Albedo Factor	0.83
Diffuse Factor	0.97	Albedo Fraction	100 %

#### Horizon profile

Azimuth [°]	-180	-174	-158	-157	-136	-135	-131	-115	-114	-112	-107	-106	-103	-71
Height [°]	13.0	14.0	13.0	12.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
Azimuth [°]	-70	-58	-43	-42	-36	-27	-26	-14	-10	-9	-4	0	4	5
Height [°]	2.0	3.0	4.0	3.0	2.0	3.0	2.0	1.0	3.0	4.0	3.0	3.0	3.0	4.0
Azimuth [°]	14	20	30	31	35	37	39	42	46	47	52	59	61	75
Height [°]	4.0	2.0	4.0	4.0	6.0	7.0	7.0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.9	7.9	7.9
Azimuth [°]	79	84	90	93	94	120	126	131	139	142	157	174	176	179
Height [°]	11.0	10.6	14.5	15.0	15.0	13.0	12.0	12.0	10.0	9.0	9.0	12.0	13.0	13.0

#### Sun Paths (Height / Azimuth diagram)





**PVsyst V7.4.8**  
VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

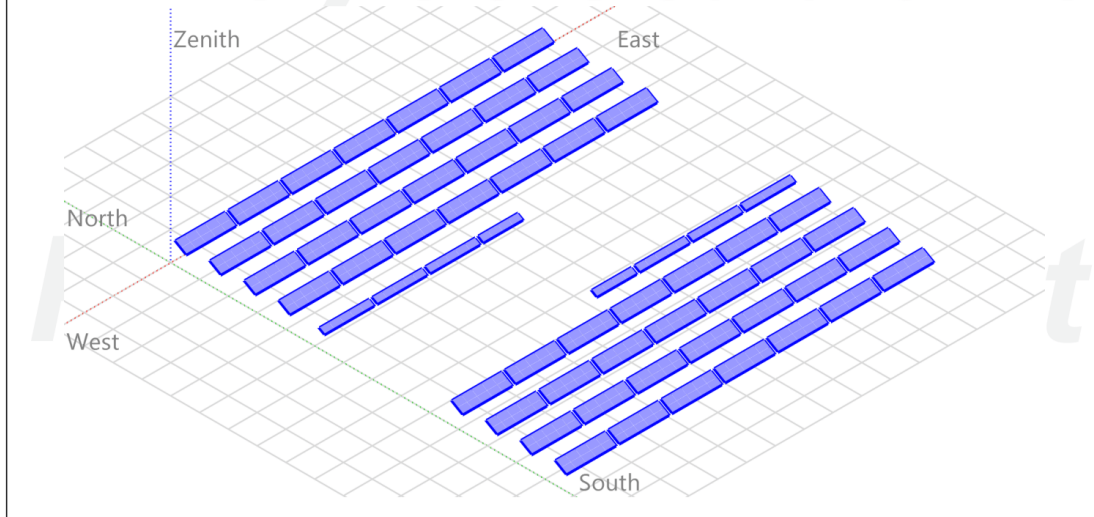
Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### Near shadings parameter

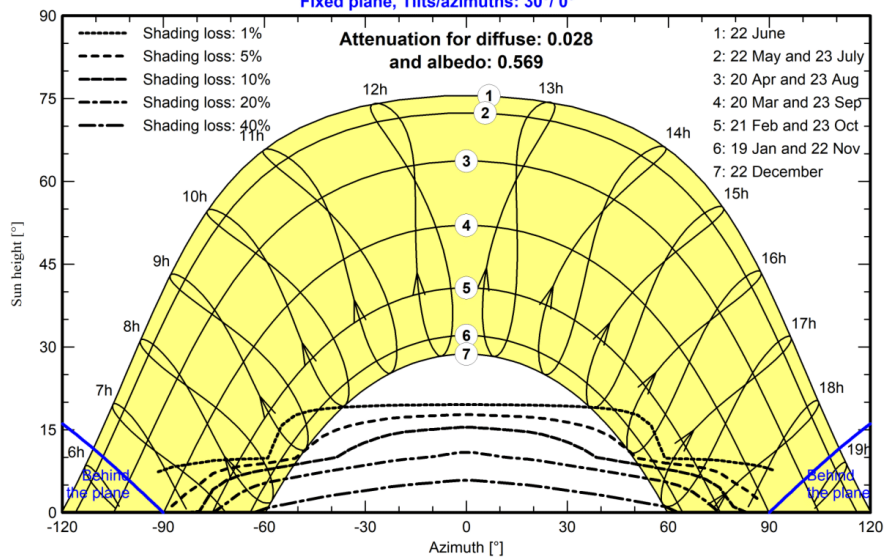
#### Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



### Iso-shadings diagram

#### Orientation #1

Fixed plane, Tilts/azimuths: 30°/ 0°





PVsyst V7.4.8

VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### Main results

#### System Production

Produced Energy 403273 kWh/year

Specific production

1625 kWh/kWp/year

Perf. Ratio PR

84.47 %

#### Economic evaluation

##### Investment

Global 100692.97 EUR

Specific 0.41 EUR/Wp

##### Yearly cost

Annuities

7189.63 EUR/yr

Run. costs

14729.71 EUR/yr

Payback period

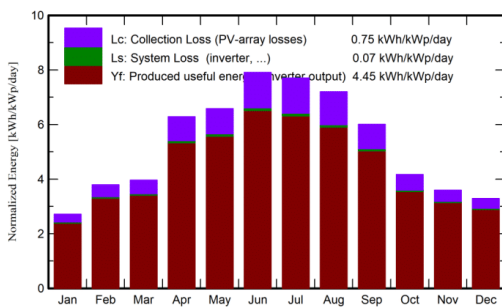
11.3 years

##### LCOE

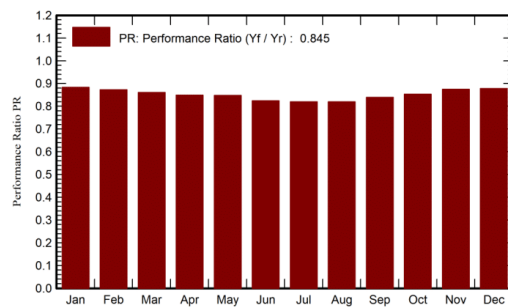
Energy cost

0.05 EUR/kWh

#### Normalized productions (per installed kWp)



#### Performance Ratio PR



#### Balances and main results

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	°C	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh	ratio
January	58.1	33.94	5.85	84.0	78.8	18708	18416	0.883
February	78.2	35.47	6.98	106.1	100.3	23344	22983	0.873
March	105.2	52.17	7.25	122.8	115.5	26658	26240	0.861
April	175.1	65.29	12.91	188.6	179.4	40341	39733	0.849
May	208.2	80.16	16.52	204.0	194.1	43554	42906	0.847
June	253.2	59.05	23.63	237.1	226.2	49260	48514	0.824
July	248.4	61.61	25.34	238.7	227.7	49347	48593	0.820
August	212.6	60.33	24.43	223.2	212.4	46110	45413	0.820
September	153.6	59.21	20.35	180.1	171.3	38077	37516	0.839
October	100.3	46.49	15.43	129.1	122.2	27745	27328	0.853
November	71.9	33.47	10.14	107.8	101.7	23764	23407	0.875
December	62.9	29.11	6.64	102.0	95.4	22570	22224	0.878
Year	1727.8	616.29	14.66	1923.9	1825.0	409480	403273	0.845

#### Legends

GlobHor Global horizontal irradiation

DiffHor Horizontal diffuse irradiation

T\_Amb Ambient Temperature

GlobInc Global incident in coll. plane

GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

EArray Effective energy at the output of the array

E\_Grid Energy injected into grid

PR Performance Ratio

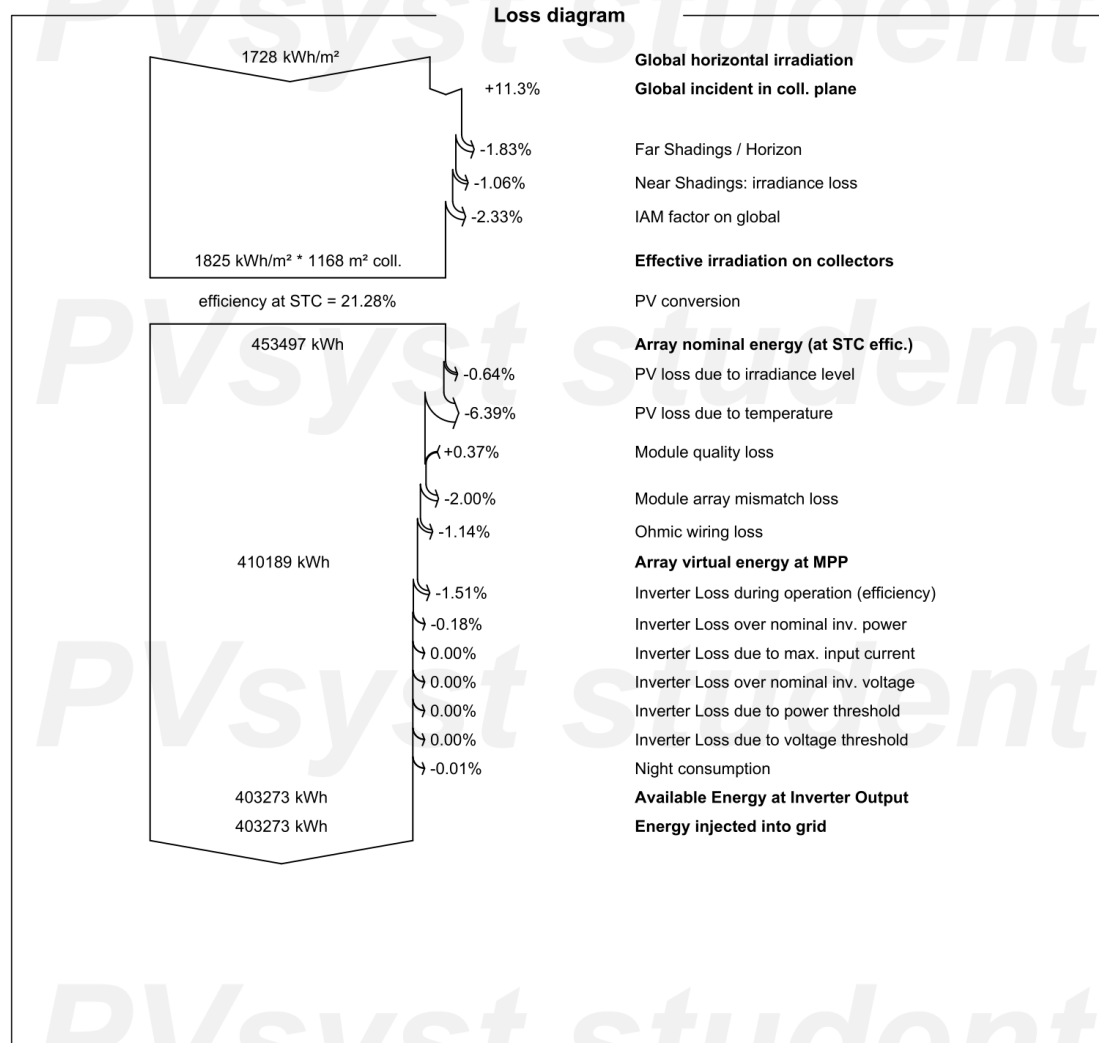


**PVsyst V7.4.8**  
VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)





**PVsyst V7.4.8**

VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

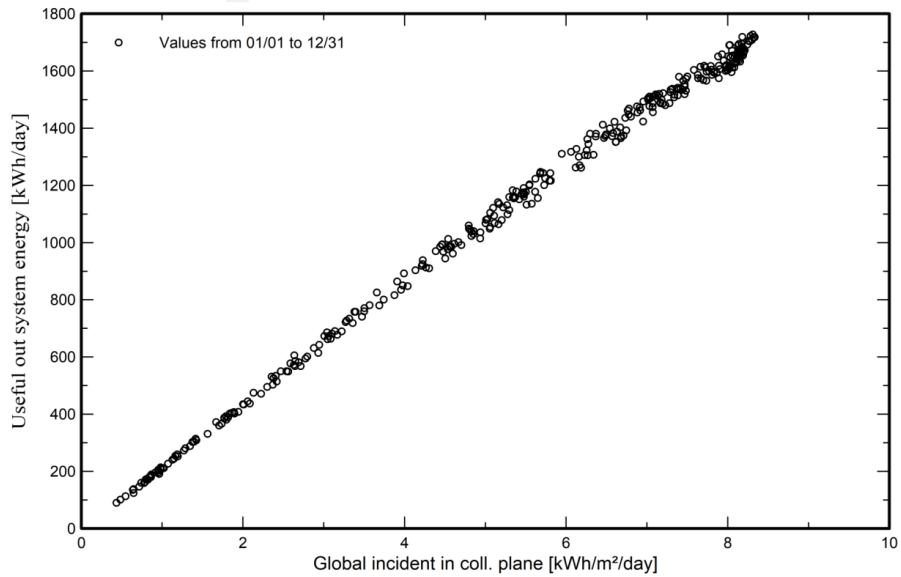
Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

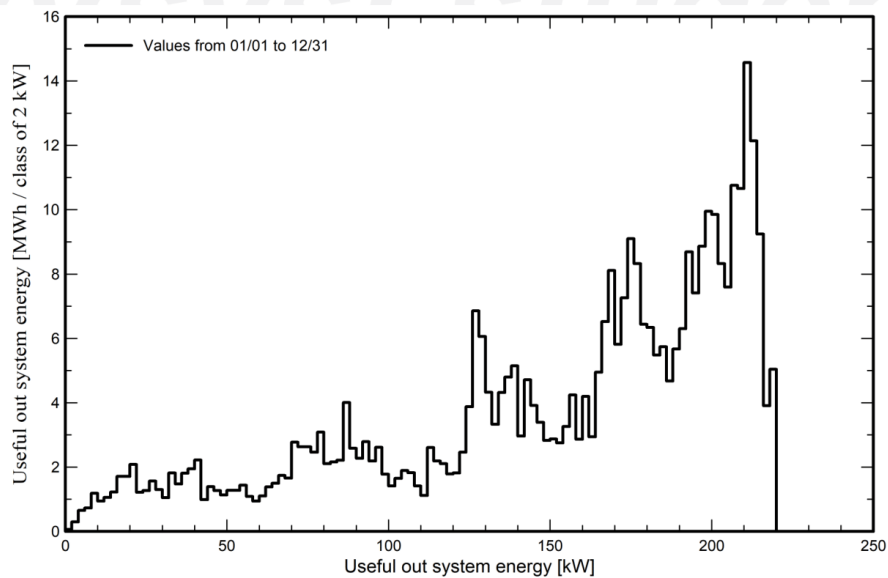
Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

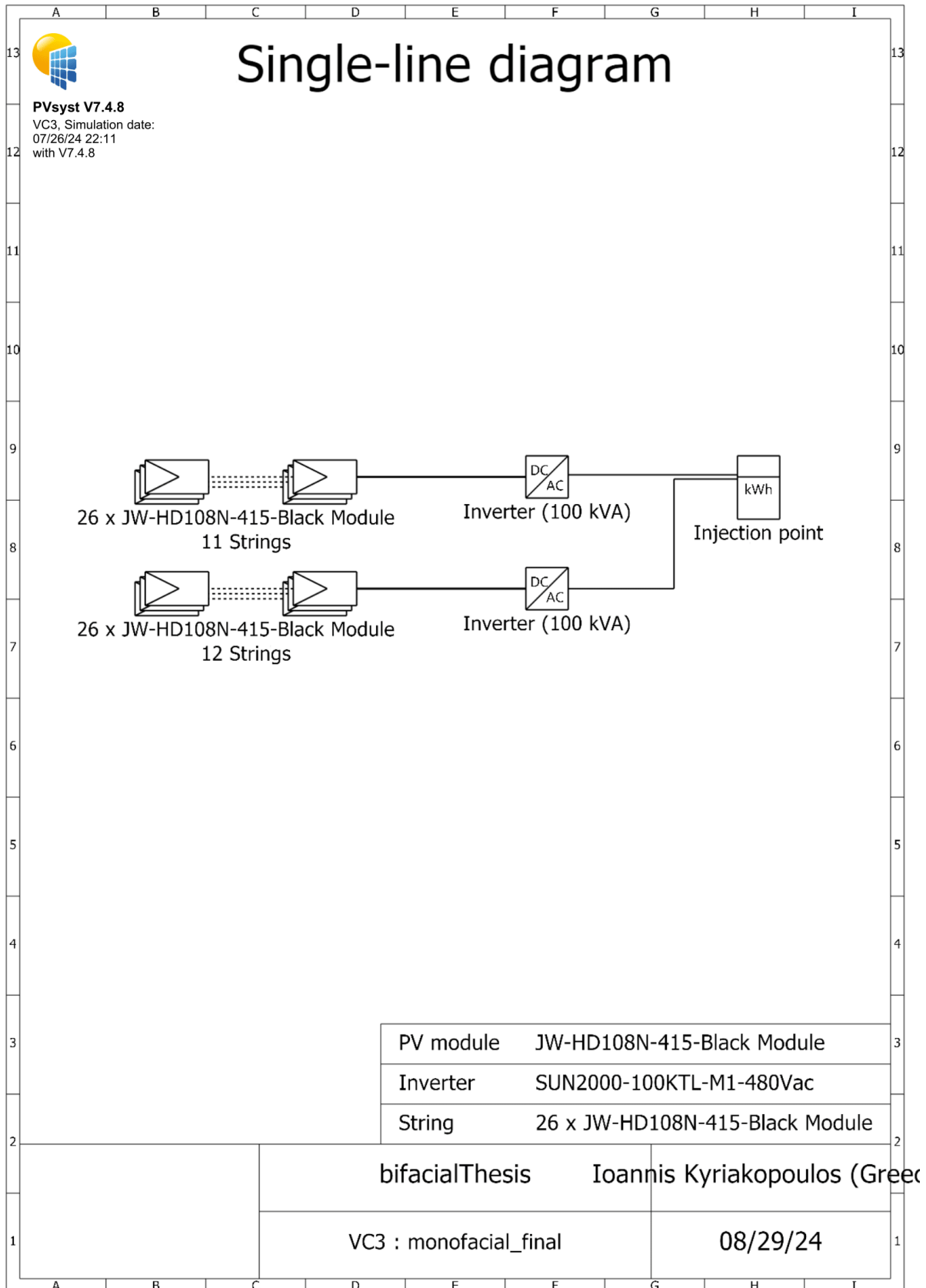
### Predef. graphs

#### Daily Input/Output diagram



#### System Output Power Distribution





**PVsyst V7.4.8**

VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**Cost of the system****Installation costs**

Item	Quantity units	Cost EUR	Total EUR
PV modules			
JW-HD108N-415-Black Module	598	66.40	39707.20
Inverters			
SUN2000-100KTL-M1-480Vac	2	7390.00	14780.00
Installation			
Global installation cost per module	598	56.87	34008.26
Land costs			
Land purchase	1	12197.51	12197.51
Total			100692.97
Depreciable asset			54487.20

**Operating costs**

Item	Total EUR/year
Maintenance	
Salaries	2956.00
Insurance	
Facilities insurance	1500.00
Taxes	
Federal taxes	6000.00
Total (OPEX)	10456.00
Including inflation (2.26%)	14729.71

**System summary**

Total installation cost	100692.97 EUR
Operating costs (incl. inflation 2.26%/year)	14729.71 EUR/year
Produced Energy	403 MWh/year
Cost of produced energy (LCOE)	0.0483 EUR/kWh





**PVsyst V7.4.8**

VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### Financial analysis

#### Simulation period

Project lifetime 30 years Start year 2025

#### Income variation over time

Inflation 2.26 %/year  
Production variation (aging) 0.40 %/year  
Discount rate 4.50 %/year

#### Income dependent expenses

Income tax rate 22.00 %/year  
Other income tax 0.00 %/year  
Dividends 0.00 %/year

#### Depreciable assets

Asset	Depreciation method	Depreciation period (years)	Salvage value (EUR)	Depreciable (EUR)
PV modules				
JW-HD108N-415-Black Module	Straight-line	20	0.00	39707.20
Inverters				
SUN2000-100KTL-M1-480Vac	Straight-line	20	0.00	14780.00
		Total	0.00	54487.20

#### Financing

Own funds 51856.88 EUR  
Loan - Redeemable with fixed annuity - 10 years 48836.09 EUR Interest rate: 7.73%/year

#### Electricity sale

Feed-in tariff 0.06400 EUR/kWh  
Duration of tariff warranty 30 years  
Annual connection tax 0.00 EUR/kWh  
Annual tariff variation 0.0 %/year  
Feed-in tariff decrease after warranty 0.00 %

#### Return on investment

Payback period 11.3 years  
Net present value (NPV) 72517.44 EUR  
Internal rate of return (IRR) 12.90 %  
Return on investment (ROI) 72.0 %



**PVsyst V7.4.8**  
VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**Financial analysis**  
**Detailed economic results (EUR)**

Year	Electricity sale	Own funds	Loan principal	Loan interest	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Cumul. profit	% amorti.
0	0	51857	0	0	0	0	0	0	0	-51857	0.0%
1	25811	0	3415	3775	10456	2724	8856	1948	6218	-45907	9.3%
2	25915	0	3679	3511	10692	2724	8987	1977	6056	-40362	18.5%
3	26018	0	3963	3227	10934	2724	9133	2009	5885	-35204	27.5%
4	26122	0	4269	2920	11181	2724	9297	2045	5707	-30419	36.5%
5	26227	0	4599	2590	11434	2724	9478	2085	5518	-25991	45.5%
6	26332	0	4955	2235	11692	2724	9680	2130	5320	-21905	54.5%
7	26437	0	5338	1852	11956	2724	9905	2179	5112	-18149	63.5%
8	26543	0	5750	1439	12227	2724	10153	2234	4893	-14708	72.6%
9	26649	0	6195	995	12503	2724	10427	2294	4663	-11571	81.9%
10	26756	0	6674	516	12785	2724	10730	2361	4420	-8724	91.3%
11	26863	0	0	0	13074	2724	11064	2434	11354	-1728	98.3%
12	26970	0	0	0	13370	2724	10876	2393	11208	4881	104.8%
13	27078	0	0	0	13672	2724	10682	2350	11056	11119	111.0%
14	27186	0	0	0	13981	2724	10481	2306	10899	17005	116.9%
15	27295	0	0	0	14297	2724	10274	2260	10738	22553	122.4%
16	27404	0	0	0	14620	2724	10060	2213	10571	27780	127.6%
17	27514	0	0	0	14951	2724	9839	2165	10399	32701	132.5%
18	27624	0	0	0	15288	2724	9611	2114	10221	37329	137.1%
19	27734	0	0	0	15634	2724	9376	2063	10038	41678	141.4%
20	27845	0	0	0	15987	2724	9134	2009	9849	45762	145.4%
21	27957	0	0	0	16349	0	11608	2554	9054	49354	149.0%
22	28069	0	0	0	16718	0	11351	2497	8853	52716	152.4%
23	28181	0	0	0	17096	0	11085	2439	8646	55858	155.5%
24	28294	0	0	0	17482	0	10811	2378	8433	58790	158.4%
25	28407	0	0	0	17877	0	10529	2316	8213	61523	161.1%
26	28520	0	0	0	18281	0	10239	2253	7986	64065	163.6%
27	28634	0	0	0	18695	0	9940	2187	7753	66428	166.0%
28	28749	0	0	0	19117	0	9632	2119	7513	68618	168.1%
29	28864	0	0	0	19549	0	9315	2049	7266	70645	170.2%
30	28979	0	0	0	19991	0	8989	1977	7011	72517	172.0%
<b>Total</b>	<b>820980</b>	<b>51857</b>	<b>48836</b>	<b>23060</b>	<b>441891</b>	<b>54487</b>	<b>301541</b>	<b>66339</b>	<b>240853</b>	<b>72517</b>	<b>172.0%</b>



**PVsyst V7.4.8**  
VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

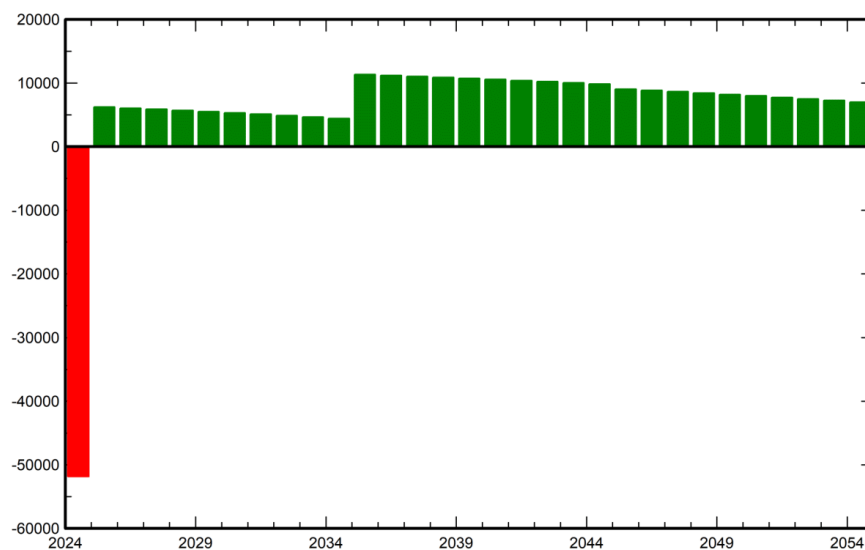
Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

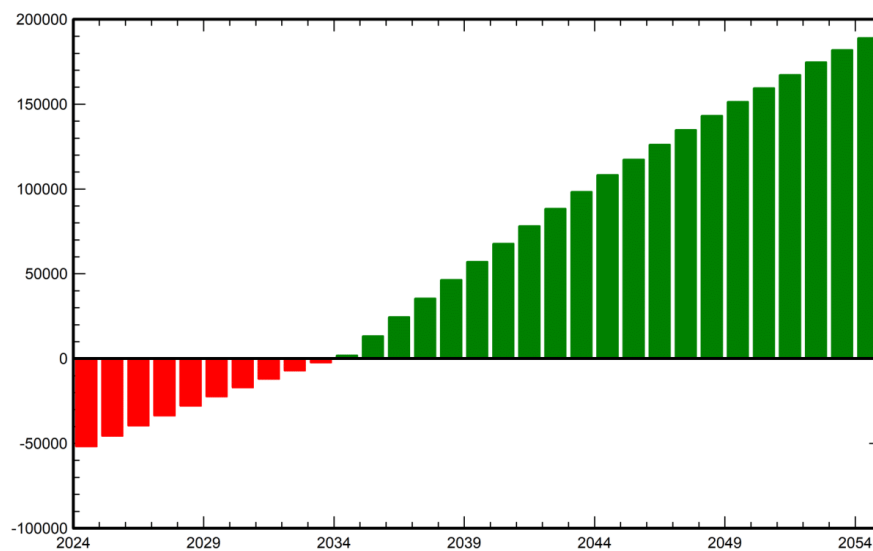
Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### Financial analysis

Yearly net profit (EUR)



Cumulative cashflow (EUR)





PVsyst V7.4.8

VC3, Simulation date:  
07/26/24 22:11  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: monofacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### CO<sub>2</sub> Emission Balance

Total: 7104.3 tCO<sub>2</sub>

#### Generated emissions

Total: 558.68 tCO<sub>2</sub>

Source: Detailed calculation from table below

#### Replaced Emissions

Total: 8831.7 tCO<sub>2</sub>

System production: 403.27 MWh/yr

Grid Lifecycle Emissions: 730 gCO<sub>2</sub>/kWh

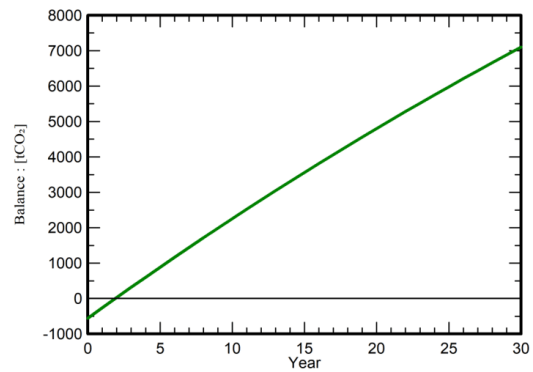
Source: IEA List

Country: Greece

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

#### Saved CO<sub>2</sub> Emission vs. Time



#### System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			[kgCO <sub>2</sub> ]
Modules	1383 kgCO <sub>2</sub> /kWp	372 kWp	514090
Supports	4.87 kgCO <sub>2</sub> /kg	8960 kg	43627
Inverters	482 kgCO <sub>2</sub> /units	2.00 units	965

## 7.2 Bifacial Σύστημα

# PVsyst - Simulation report

## Grid-Connected System

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Unlimited sheds

System power: 248 kWp

Psári - Greece

**Author**

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**PVsyst V7.4.8**

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

**Project: bifacialThesis**

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**Project summary**

<b>Geographical Site</b>	<b>Situation</b>	<b>Project settings</b>
<b>Psári</b>	Latitude 37.87 °N	Albedo 0.20
Greece	Longitude 22.53 °E	
	Altitude 802 m	
	Time zone UTC+2	
<b>Weather data</b>		
Psári		
PVGIS api TMY		

**System summary**

<b>Grid-Connected System</b>	<b>Unlimited sheds</b>	
<b>PV Field Orientation</b>	<b>Near Shadings</b>	<b>User's needs</b>
Sheds	Mutual shadings of sheds	Unlimited load (grid)
Tilt 30 °	Electrical effect	
Azimuth 0 °		
<b>System information</b>		
<b>PV Array</b>	<b>Inverters</b>	
Nb. of modules 598 units	Nb. of units 2 units	
Pnom total 248 kWp	Pnom total 200 kWac	
	Pnom ratio 1.241	

**Results summary**

Produced Energy 441389 kWh/year	Specific production 1779 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR 92.45 %
---------------------------------	---------------------------------------	------------------------

**Table of contents**

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Horizon definition	5
Main results	6
Loss diagram	7
Predef. graphs	8
Single-line diagram	9
Cost of the system	10
Financial analysis	11
CO <sub>2</sub> Emission Balance	14

**PVsyst V7.4.8**

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

**Project: bifacialThesis**

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**General parameters****Grid-Connected System****PV Field Orientation****Orientation**

Sheds  
Tilt 30 °  
Azimuth 0 °

**Unlimited sheds****Sheds configuration**

Nb. of sheds 5 units  
Unlimited sheds

**Sizes**

Sheds spacing 6.00 m  
Collector width 2.29 m  
Ground Cov. Ratio (GCR) 38.2 %  
Top inactive band 0.02 m  
Bottom inactive band 0.02 m

**Shading limit angle**

Limit profile angle 16.1 °

**Shadings electrical effect**

Cell size 15.6 cm  
Strings in width 3 units

**Models used**

Transposition Perez  
Diffuse Imported  
Circumsolar separate

**Horizon**

Average Height 7.2 °

**Near Shadings**

Mutual shadings of sheds  
Electrical effect

**User's needs**

Unlimited load (grid)

**Bifacial system**

Model 2D Calculation  
unlimited sheds

**Bifacial model geometry**

Sheds spacing 6.00 m  
Sheds width 2.33 m  
Limit profile angle 16.3 °  
GCR 38.8 %  
Height above ground 1.50 m

**Bifacial model definitions**

Ground albedo average 0.39  
Bifaciality factor 80 %  
Rear shading factor 5.0 %  
Rear mismatch loss 10.0 %  
Shed transparent fraction 0.0 %

**Monthly ground albedo values**

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
0.90	0.70	0.30	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.30	0.70	0.39

**PV Array Characteristics****PV module**

Manufacturer Generic  
Model JW-HD108N-415-Black Module  
(Original PVsyst database)  
Unit Nom. Power 415 Wp  
Number of PV modules 598 units  
Nominal (STC) 248 kWp  
Modules 23 string x 26 In series

**At operating cond. (50°C)**

Pmpp 230 kWp  
U mpp 751 V  
I mpp 306 A

**Inverter**

Manufacturer Generic  
Model SUN2000-100KTL-M1-480Vac  
(Original PVsyst database)  
Unit Nom. Power 100 kWac  
Number of inverters 2 units  
Total power 200 kWac  
Operating voltage 200-1000 V  
Max. power (=>40°C) 110 kWac  
Pnom ratio (DC:AC) 1.24  
Power sharing within this inverter



**PVsyst V7.4.8**

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**PV Array Characteristics****Total PV power**

Nominal (STC)

248 kWp

Total

598 modules

Module area

1168 m<sup>2</sup>**Total inverter power**

Total power

200 kWac

Max. power

220 kWac

Number of inverters

2 units

Pnom ratio

1.24

**Array losses****Thermal Loss factor**

Module temperature according to irradiance

Uc (const)

20.0 W/m<sup>2</sup>K

Uv (wind)

0.0 W/m<sup>2</sup>K/m/s**DC wiring losses**

Global array res.

40 mΩ

Loss Fraction

1.5 % at STC

**Module Quality Loss**

Loss Fraction

-0.4 %

**Module mismatch losses**

Loss Fraction

2.0 % at MPP

**IAM loss factor**

Incidence effect (IAM): Fresnel smooth glass, n = 1.526

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.998	0.981	0.948	0.862	0.776	0.636	0.403	0.000



PVsyst V7.4.8

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

#### Horizon definition

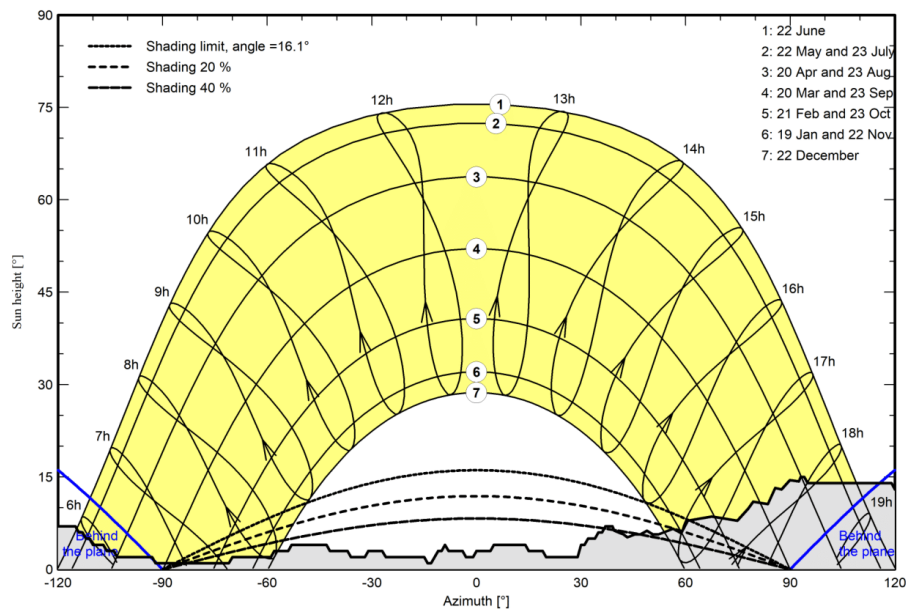
Horizon from Meteonorm web service, lat=37.8654, lon=22.5269

Average Height	7.2 °	Albedo Factor	0.83
Diffuse Factor	0.97	Albedo Fraction	100 %

#### Horizon profile

Azimuth [°]	-180	-174	-158	-157	-136	-135	-131	-115	-114	-112	-107	-106	-103	-71
Height [°]	13.0	14.0	13.0	12.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
Azimuth [°]	-70	-58	-43	-42	-36	-27	-26	-14	-10	-9	-4	0	4	5
Height [°]	2.0	3.0	4.0	3.0	2.0	3.0	2.0	1.0	3.0	4.0	3.0	3.0	3.0	4.0
Azimuth [°]	14	20	30	31	35	37	39	42	46	47	52	59	61	75
Height [°]	4.0	2.0	4.0	4.0	6.0	7.0	7.0	5.7	5.7	5.7	5.7	5.9	7.9	7.9
Azimuth [°]	79	84	90	93	94	120	126	131	139	142	157	174	176	179
Height [°]	11.0	10.6	14.5	15.0	15.0	13.0	12.0	12.0	10.0	9.0	9.0	12.0	13.0	13.0

#### Sun Paths (Height / Azimuth diagram)





PVsyst V7.4.8

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### Main results

#### System Production

Produced Energy 441389 kWh/year Specific production 1779 kWh/kWp/year  
Perf. Ratio PR 92.45 %

#### Economic evaluation

##### Investment

Global 123717.86 EUR  
Specific 0.50 EUR/Wp

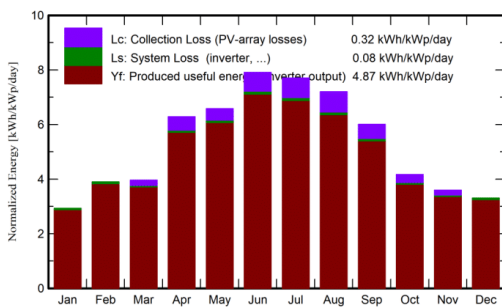
##### Yearly cost

Annuities 10638.00 EUR/yr  
Run. costs 14729.71 EUR/yr  
Payback period 11.8 years

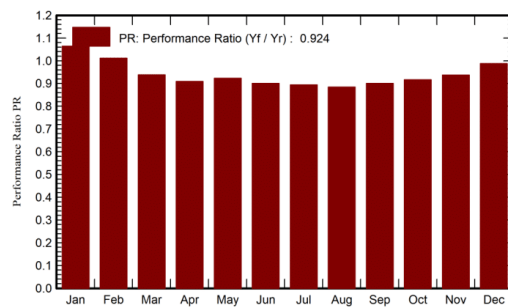
##### LCOE

Energy cost 0.05 EUR/kWh

#### Normalized productions (per installed kWp)



#### Performance Ratio PR



#### Balances and main results

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	°C	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh	ratio
January	58.1	33.94	5.85	84.0	79.7	22552	22202	1.064
February	78.2	35.47	6.98	106.1	101.2	27056	26630	1.011
March	105.2	52.17	7.25	122.8	115.9	29044	28587	0.938
April	175.1	65.29	12.91	188.6	179.9	43211	42553	0.909
May	208.2	80.16	16.52	204.0	194.7	47461	46749	0.923
June	253.2	59.05	23.63	237.1	227.1	53826	53008	0.901
July	248.4	61.61	25.34	238.7	228.5	53788	52965	0.894
August	212.6	60.33	24.43	223.2	213.1	49705	48951	0.884
September	153.6	59.21	20.35	180.1	171.7	40876	40267	0.901
October	100.3	46.49	15.43	129.1	122.5	29823	29373	0.916
November	71.9	33.47	10.14	107.8	102.1	25478	25093	0.938
December	62.9	29.11	6.64	102.0	96.2	25404	25012	0.988
Year	1727.8	616.29	14.66	1923.9	1832.6	448225	441389	0.924

#### Legends

GlobHor Global horizontal irradiation  
DiffHor Horizontal diffuse irradiation  
T\_Amb Ambient Temperature  
GlobInc Global incident in coll. plane  
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings  
EArray Effective energy at the output of the array  
E\_Grid Energy injected into grid  
PR Performance Ratio



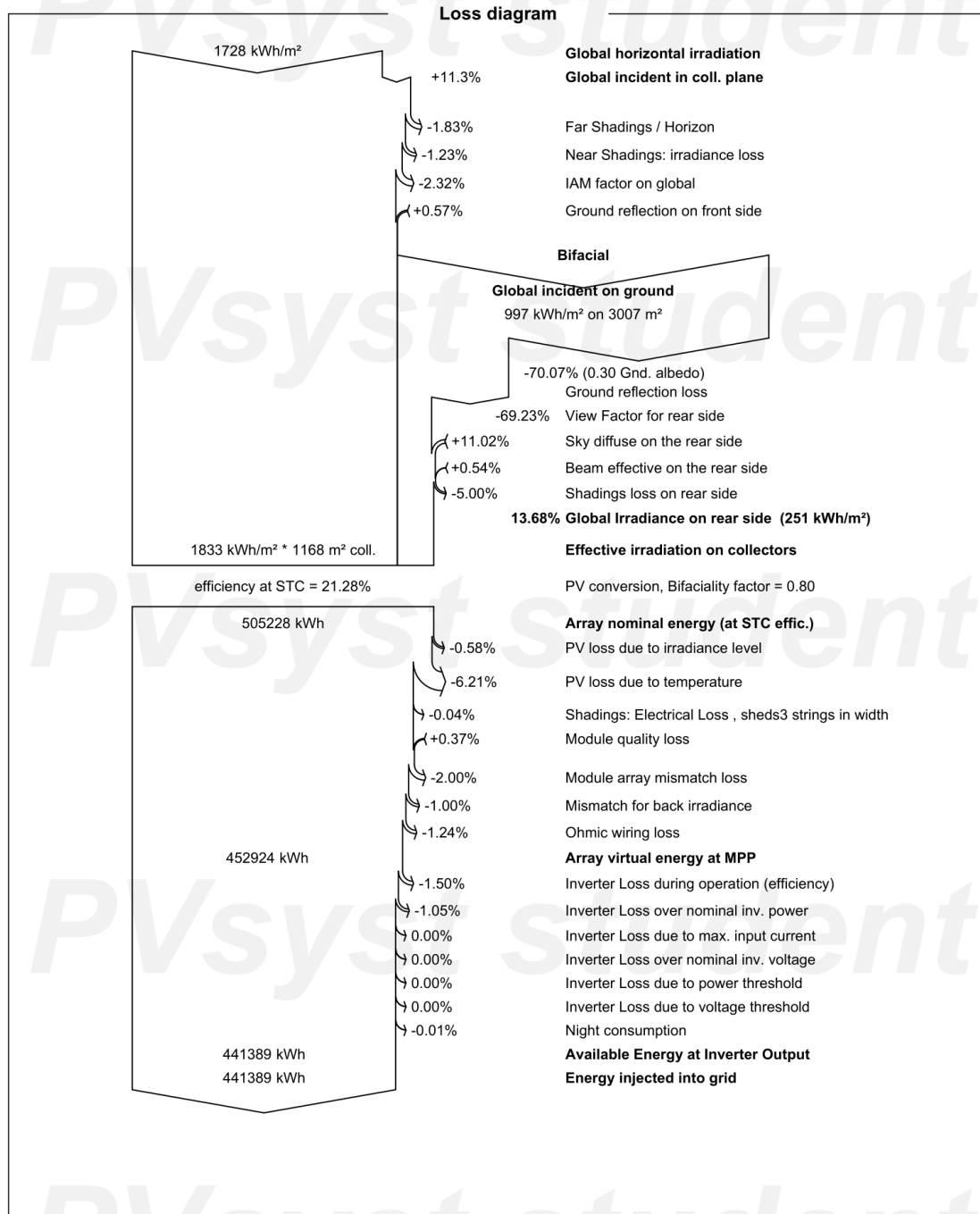
**PVsyst V7.4.8**

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)





**PVsyst V7.4.8**

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

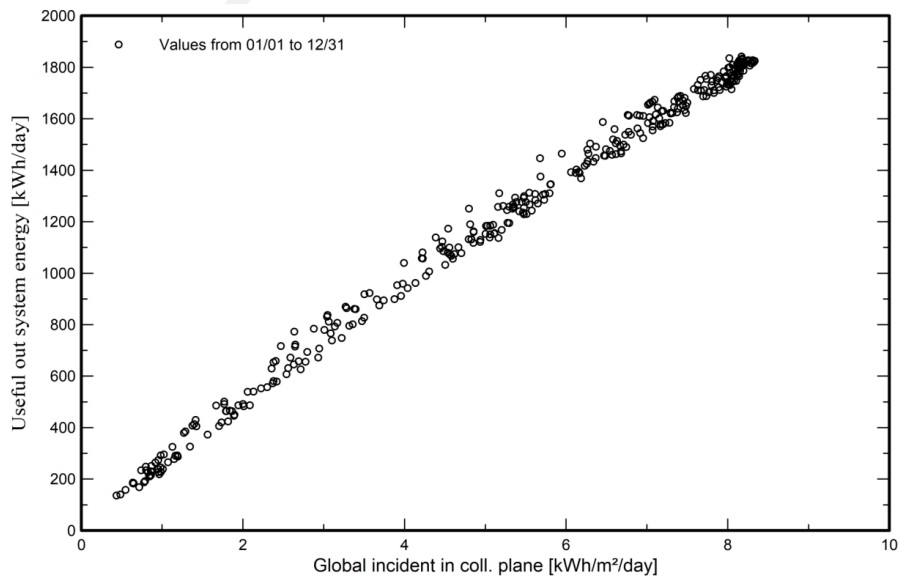
Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

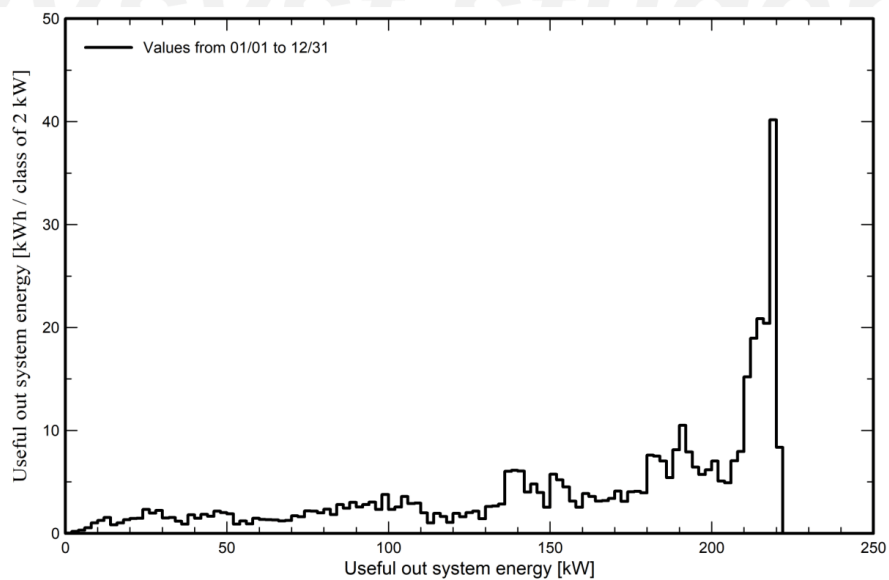
Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

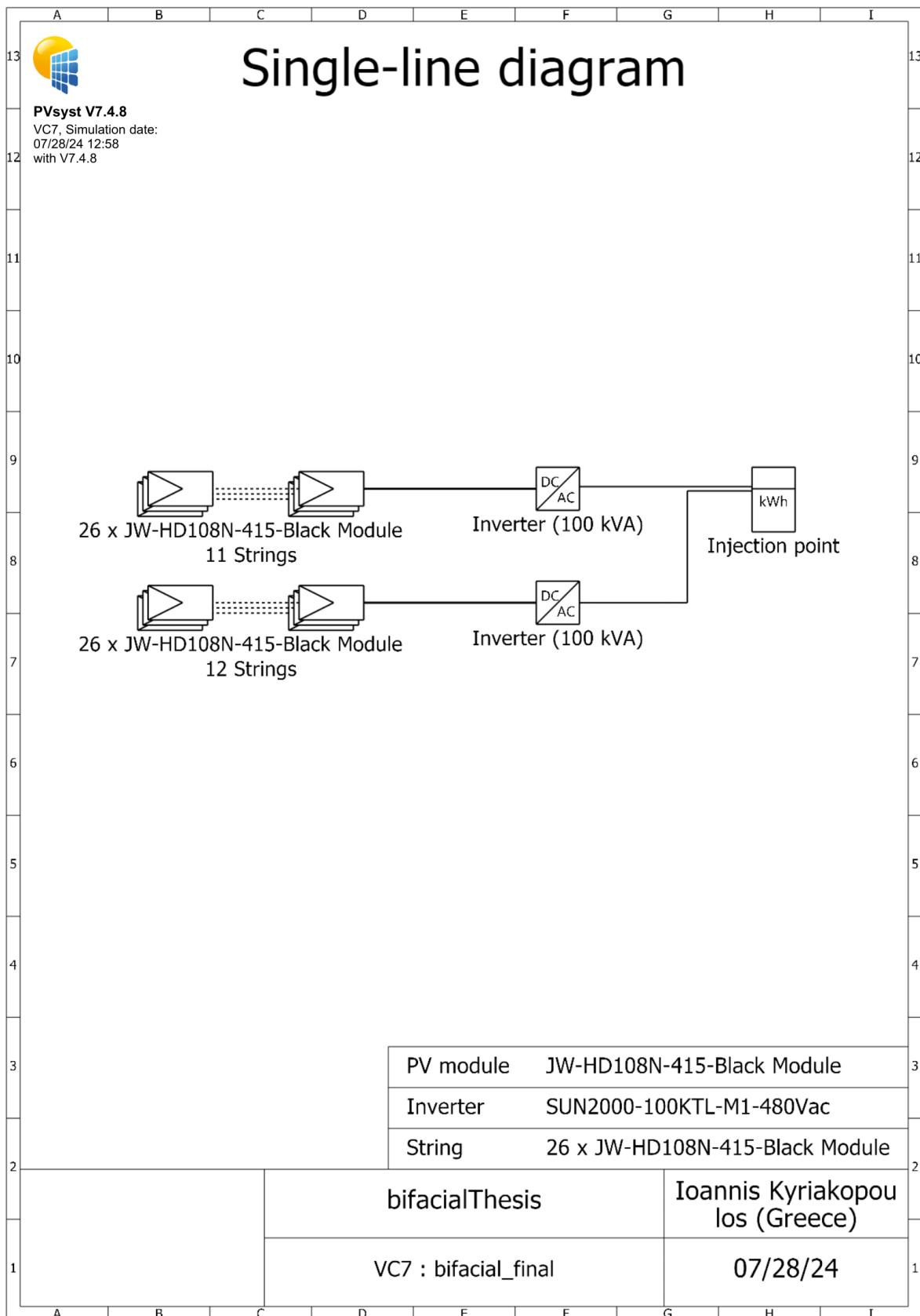
### Predef. graphs

#### Daily Input/Output diagram



#### System Output Power Distribution





**PVsyst V7.4.8**

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**Cost of the system****Installation costs**

Item	Quantity units	Cost EUR	Total EUR
PV modules			
JW-HD108N-415-Black Module	598	104.90	62730.20
Inverters			
SUN2000-100KTL-M1-480Vac	2	7390.00	14780.00
Installation			
Global installation cost per module	598	56.87	34010.15
Land costs			
Land purchase	1	12197.51	12197.51
Total			123717.86
Depreciable asset			77510.20

**Operating costs**

Item	Total EUR/year
Maintenance	
Provision for inverter replacement	2956.00
Insurance	
Facilities insurance	1500.00
Taxes	
Federal taxes	6000.00
Total (OPEX)	10456.00
Including inflation (2.26%)	14729.71

**System summary**

Total installation cost	123717.86 EUR
Operating costs (incl. inflation 2.26%/year)	14729.71 EUR/year
Produced Energy	441 MWh/year
Cost of produced energy (LCOE)	0.0473 EUR/kWh



**PVsyst V7.4.8**

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### Financial analysis

#### Simulation period

Project lifetime 30 years Start year 2024

#### Income variation over time

Inflation 2.26 %/year  
Production variation (aging) 0.40 %/year  
Discount rate 4.50 %/year

#### Income dependent expenses

Income tax rate 22.00 %/year  
Other income tax 0.00 %/year  
Dividends 0.00 %/year

#### Depreciable assets

Asset	Depreciation method	Depreciation period (years)	Salvage value (EUR)	Depreciable (EUR)
PV modules				
JW-HD108N-415-Black Module	Straight-line	20	0.00	62730.20
Inverters				
SUN2000-100KTL-M1-480Vac	Straight-line	20	0.00	14780.00
		Total	0.00	77510.20

#### Financing

Own funds 63717.86 EUR  
Loan - Redeemable with fixed amortization - 10 years 60000.00 EUR Interest rate: 7.73%/year

#### Electricity sale

Feed-in tariff 0.06400 EUR/kWh  
Duration of tariff warranty 30 years  
Annual connection tax 0.00 EUR/kWh  
Annual tariff variation 0.0 %/year  
Feed-in tariff decrease after warranty 0.00 %

#### Return on investment

Payback period 11.8 years  
Net present value (NPV) 84785.47 EUR  
Internal rate of return (IRR) 12.04 %  
Return on investment (ROI) 68.5 %





**PVsyst V7.4.8**  
VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

**Financial analysis**  
**Detailed economic results (EUR)**

Year	Electricity sale	Own funds	Loan principal	Loan interest	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Cumul. profit	% amorti.
0	0	63718	0	0	0	0	0	0	0	-63718	0.0%
1	28251	0	6000	4638	10456	3876	9281	2042	5115	-58823	8.8%
2	28364	0	6000	4174	10692	3876	9622	2117	5381	-53896	17.6%
3	28477	0	6000	3710	10934	3876	9958	2191	5642	-48951	26.5%
4	28591	0	6000	3247	11181	3876	10288	2263	5900	-44004	35.3%
5	28706	0	6000	2783	11434	3876	10614	2335	6154	-39065	44.2%
6	28821	0	6000	2319	11692	3876	10934	2405	6404	-34148	53.0%
7	28936	0	6000	1855	11956	3876	11249	2475	6649	-29262	61.8%
8	29052	0	6000	1391	12227	3876	11558	2543	6891	-24416	70.6%
9	29168	0	6000	928	12503	3876	11862	2610	7128	-19620	79.3%
10	29284	0	6000	464	12785	3876	12160	2675	7360	-14880	88.0%
11	29402	0	0	0	13074	3876	12452	2739	13588	-6508	94.7%
12	29519	0	0	0	13370	3876	12274	2700	13449	1423	101.1%
13	29637	0	0	0	13672	3876	12090	2660	13305	8931	107.2%
14	29756	0	0	0	13981	3876	11899	2618	13157	16035	113.0%
15	29875	0	0	0	14297	3876	11702	2574	13003	22754	118.4%
16	29994	0	0	0	14620	3876	11499	2530	12844	29105	123.5%
17	30114	0	0	0	14951	3876	11288	2483	12680	35105	128.4%
18	30235	0	0	0	15288	3876	11071	2436	12511	40770	133.0%
19	30356	0	0	0	15634	3876	10846	2386	12336	46115	137.3%
20	30477	0	0	0	15987	3876	10614	2335	12155	51155	141.3%
21	30599	0	0	0	16349	0	14250	3135	11115	55565	144.9%
22	30721	0	0	0	16718	0	14003	3081	10923	59713	148.3%
23	30844	0	0	0	17096	0	13748	3025	10724	63609	151.4%
24	30968	0	0	0	17482	0	13485	2967	10519	67266	154.4%
25	31092	0	0	0	17877	0	13214	2907	10307	70696	157.1%
26	31216	0	0	0	18281	0	12934	2846	10089	73908	159.7%
27	31341	0	0	0	18695	0	12646	2782	9864	76914	162.2%
28	31466	0	0	0	19117	0	12349	2717	9632	79722	164.4%
29	31592	0	0	0	19549	0	12043	2649	9393	82343	166.6%
30	31718	0	0	0	19991	0	11727	2580	9147	84785	168.5%
Total	898571	63718	60000	25509	441891	77510	353661	77805	293366	84785	168.5%



PVsyst V7.4.8

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

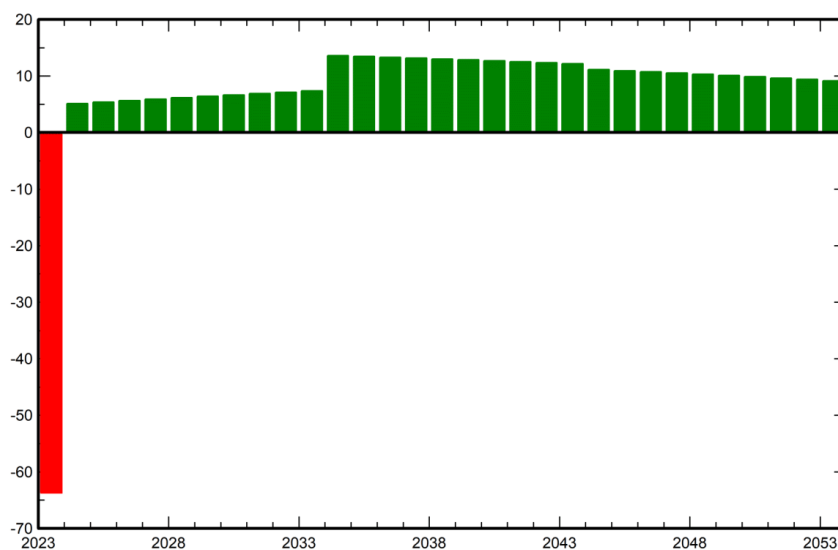
Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

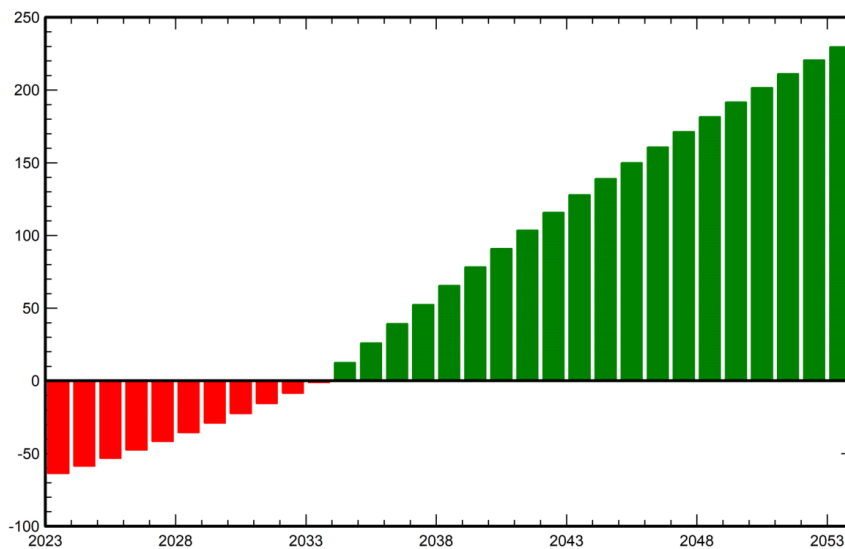
Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### Financial analysis

Yearly net profit (kEUR)



Cumulative cashflow (kEUR)





**PVsyst V7.4.8**

VC7, Simulation date:  
07/28/24 12:58  
with V7.4.8

Project: bifacialThesis

Variant: bifacial\_final

Ioannis Kyriakopoulos (Greece)

### CO<sub>2</sub> Emission Balance

Total: 7828.5 tCO<sub>2</sub>

#### Generated emissions

Total: 558.68 tCO<sub>2</sub>

Source: Detailed calculation from table below

#### Replaced Emissions

Total: 9666.4 tCO<sub>2</sub>

System production: 441.39 MWh/yr

Grid Lifecycle Emissions: 730 gCO<sub>2</sub>/kWh

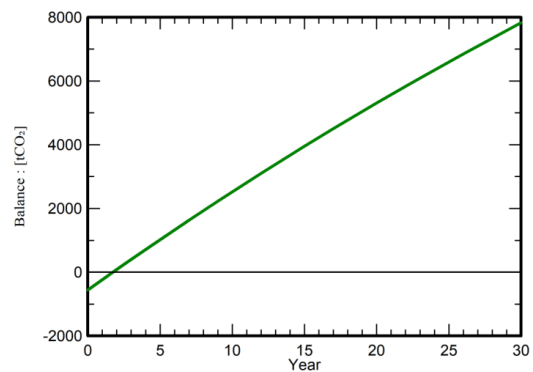
Source: IEA List

Country: Greece

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

#### Saved CO<sub>2</sub> Emission vs. Time



#### System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			[kgCO <sub>2</sub> ]
Modules	1383 kgCO <sub>2</sub> /kWp	372 kWp	514090
Supports	4.87 kgCO <sub>2</sub> /kg	8960 kg	43627
Inverters	482 kgCO <sub>2</sub> /units	2.00 units	965

## 8 Βιβλιογραφία

### References

1. H. Ritchie, P. Rosado, M. Roser, *Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/energy> (2023).
2. H. Ritchie, P. Rosado, *Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (2017).
3. H. Ritchie, M. Roser, P. Rosado, *Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/renewable-energy> (2020).
4. *Photoelectric effect* ([https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect)).
5. D. de B Mesquita, J. L. de S Silva, H. S. Moreira, M. Kitayama, M. G. Villalva, [https://www.researchgate.net/profile/Joao-Lucas-De-Souza-Silva/publication/337195909\\_Areviewreview\\_and\\_analysis\\_of\\_technologies\\_applied\\_in\\_PV\\_modules.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Joao-Lucas-De-Souza-Silva/publication/337195909_Areviewreview_and_analysis_of_technologies_applied_in_PV_modules.pdf) (2019).
6. J. Libal, R. Kopechek, *Bifacial Photovoltaics: Technology, applications and economics* (The Institution of Engineering and Technology, 2018).
7. *Bifacial Design Guide* ([https://www.lg.com/global/business/download/resources/solar/Bifacial\\_design\\_guide\\_Full\\_ver.pdf](https://www.lg.com/global/business/download/resources/solar/Bifacial_design_guide_Full_ver.pdf)).
8. *jolywood panel* (<https://www.fotistikosmos.gr/photosoltak-panel-jolywood-ntype-415wp-ip68-bifacial/>).
9. *huawei sun2000* (<https://www.mipesun.gr/%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B9%CF%83%CF%84%CF%81%CE%BF%CF%86%CE%B5%CE%B9%CF%83/%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%83%CF%85%CE%BD%CE%B4%CE%B5%CE%B4%CE%B5%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%B1-%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%B1/abb/huawei-sun2000-100kt1.htm>).
10. E. Αμωνατίδης, *Φωτοβολταϊκά Πάρκα* ([https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CMNG2115/2015/%CE%91%CE%9D%CE%9F%CE%99%CE%9ACE%A4%CE%91%20%CE%9C%CE%91%CE%98%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91-%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%94%CE%9F%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1%204%20\\_%20%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%](https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CMNG2115/2015/%CE%91%CE%9D%CE%9F%CE%99%CE%9ACE%A4%CE%91%20%CE%9C%CE%91%CE%98%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91-%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%94%CE%9F%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1%204%20_%20%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%)

B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%AC%20%CE%A0%CE%AC%CF%81%CE%BA%CE%B1.pdf).

11. <https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic> (2024).
12. *Inflation Rates in Greece* (<https://www.worlddata.info/europe/greece/inflation-rates.php>).
13. *Interest Rate in Greece* (<https://tradingeconomics.com/greece/interest-rate>).
14. *Τιμή Πώλησης Κιλοβατώρας Στην Ελλάδα* (<https://novavolt.gr/blogs/fotoboltaika/timi-pwlshs-kilobatoras-fwtoboltaikwn>).
15. *Levelized Cost of Energy* ([https://en.wikipedia.org/wiki/Levelized\\_cost\\_of\\_electricity](https://en.wikipedia.org/wiki/Levelized_cost_of_electricity)).
16. *Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) (Net present value (NPV))* (<https://euretirio.com/kathari-parousa-axia-kpa-npv/>).
17. *PV price index* (<https://www.pvxchange.com/Price-Index>).