

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΜΕ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΟΨΕΩΣ
(Bifacial PV modules): Σχεδιασμός
φωτοβολταϊκών πάρκων και
σύγκριση ανάμεσα στα bifacial και
στα monofacial Φ/Β**

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Τζιβανίδης Χρήστος, Καθηγητής ΕΜΠ



Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Λεβέντης Νεκτάριος

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	6
Περίληψη.....	7
Abstract.....	8
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Ενεργειακή κατάσταση.....	9
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	11
1.2.1.1 Ηλιακή Ενέργεια.....	11
1.2.1.2 Αιολική ενέργεια.....	11
1.2.1.3 Υδραυλική ενέργεια.....	12
1.2.1.4 Γεωθερμική ενέργεια.....	12
1.2.1.5 Θαλάσσια ενέργεια.....	13
1.2.1.6 Βιομάζα.....	13
1.3 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι.....	14
1.4 Οριοθέτηση.....	15
1.5 Διάρθρωση της Εργασίας.....	15
2. Ηλιακή Ενέργεια.....	16
2.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....	16
2.1.1.1 Χρήσιμοι τύποι για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας.....	16
2.2 Τρόποι αξιοποίησης ηλιακής ακτινοβολίας.....	17
2.2.1.1 Θερμικά ηλιακά πάνελ.....	17
2.2.1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	23
2.2.1.3 Παθητικά ηλιακά συστήματα.....	24
2.3 Φωτοβολταϊκά Πάνελ.....	25
2.3.1.1 Τρόπος Λειτουργίας - φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	25
2.3.1.2 Είδη φωτοβολταϊκών και χαρακτηριστικά κατασκευής τους.....	27
3. Bifacial Φωτοβολταϊκά.....	32
3.1 Ιστορική Αναδρομή.....	32
3.2 Τρόπος Λειτουργίας.....	34
3.3 Είδη Τεχνολογιών Bifacial φωτοβολταϊκών.....	35
3.3.1.1 PERC+.....	35
3.3.1.2 n-PERT.....	36
3.3.1.3 IBC.....	37
3.4 Παράγοντες σχεδίασης.....	38
3.4.1.1 Albedo.....	38
3.4.1.2 Ανύψωση από το έδαφος.....	39
3.4.1.3 Γεωγραφικό Πλάτος / Κλίση Πλαισίων.....	40
3.4.1.4 Αξονική Απόσταση (Pitch).....	41

3.5 Πλεονεκτήματα των bifacial έναντι των monofacial φωτοβολταϊκών.....	43
4. Παραμετρική μελέτη φωτοβολταϊκού πάρκου.....	44
4.1 Λογισμικό Προσομοίωσης - PVsyst.....	44
4.2 Περιγραφή Μελέτης.....	47
4.3 Επιλογή φωτοβολταϊκού πλαισίου και inverter.....	48
4.4 Αιανή Κοζάνης.....	49
4.4.1.1 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού πάρκου για σύστημα με σταθερές βάσεις στήριξης.....	50
4.4.1.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης.....	53
4.4.1.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσει του ύψους από την επιφάνεια του εδάφους.....	54
4.4.1.4 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού πάρκου για σύστημα Ιχνηλατών Ενιαίου Άξονα.....	55
4.5 Βεστερός Σουηδίας.....	58
4.5.1.1 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού πάρκου για σύστημα με σταθερές βάσεις στήριξης.....	59
4.5.1.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης.....	59
4.5.1.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσει του ύψους από την επιφάνεια του εδάφους.....	60
4.5.1.4 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού πάρκου για σύστημα Ιχνηλατών Ενιαίου Άξονα.....	61
5. Αποτελέσματα Μελέτης.....	63
5.1 Αποτελέσματα μελέτης για την Αιανή Κοζάνης.....	63
5.1.1.1 Αποτελέσματα για Fixed Tilted Plane.....	63
5.1.1.2 Αποτελέσματα για Tracking, horizontal axis N-S.....	73
5.2 Αποτελέσματα μελέτης για την Βεστερός Σουηδίας.....	78
5.2.1.1 Αποτελέσματα για Fixed Tilted Plane.....	78
5.2.1.2 Αποτελέσματα για Tracking, horizontal axis N-S.....	88
6. Οικονομική Μελέτη.....	93
6.1 Αναφορά των οικονομικών δεδομένων.....	93
6.2 Χρήση PVsyst για οικονομική μελέτη.....	95
6.3 Αποτελέσματα οικονομικής μελέτης.....	97
7. Συμπεράσματα - προτάσεις για μελλοντική μελέτη.....	100
Κατάλογος Εικόνων.....	102
Κατάλογος Πινάκων.....	106
Κατάλογος Αναφορών.....	107

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χρήστο Τζιβανίδη, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και σύγχρονο θέμα, καθώς και για την καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου Ράνια και τα αδέρφια μου Βασίλη και Γεωργία, για την πολύπλευρη στήριξή τους, στην μέχρι τώρα πορεία μου. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου για τη συμπαράστασή τους, όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Είναι γενικά παραδεκτό, ότι τα τελευταία έτη έχει κλιμακωθεί το ενεργειακό πρόβλημα. Επιπλέον, η ρύπανση του πλανήτη έχει αυξηθεί ραγδαία. Για τον λόγο αυτό, γίνεται περισσότερο αναγκαία από ποτέ η ανάγκη χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η παρούσα διπλωματική αναλύει την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών διπλής όψεως (bifacial PV modules), η οποία βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας των συμβατικών φωτοβολταϊκών, ενώ παρέχει και τη δυνατότητα λήψης ηλιακής ακτινοβολίας από τη διαφανή οπίσθια όψη των πλαισίων.

Αρχικά, παρουσιάζεται το ενεργειακό πρόβλημα της σημερινής εποχής, ενώ γίνεται αναφορά και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στη συνέχεια, αναλύεται η ηλιακή ενέργεια και οι τρόποι εκμετάλλευσής της. Ακολουθεί η περιγραφή των βασικών τεχνολογιών bifacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ μελετώνται και οι διάφοροι παράγοντες σχεδίασης για την εγκατάσταση των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Το υπόλοιπο κομμάτι της εργασίας, αφορά τη σχεδίαση δύο φωτοβολταϊκών πάρκων, για δύο διαφορετικές περιοχές μέσα από το λογισμικό προσομοίωσης, PVsyst. Θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση ανάμεσα σε πάρκο με bifacial, αλλά και σε πάρκο με mono-facial φωτοβολταϊκά πλαίσια, έτσι ώστε να αναδειχθεί, υπό τη μεταβολή διάφορων παραμέτρων, το ετήσιο κέρδος στην παραγόμενη ενέργεια που προσφέρουν τα bifacial πάνελ.

Στο τέλος, πραγματοποιείται μέσα από το λογισμικό, οικονομική μελέτη, ώστε να διαπιστωθεί εάν είναι οικονομικά συμφέρουσα η τεχνολογία των bifacial φωτοβολταϊκών.

Τα αποτελέσματα που εξάγονται, έχουν ιδιαίτερη σημασία, για μετέπειτα μελέτες φωτοβολταϊκών πάρκων, ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο είδος φωτοβολταϊκού και υπό την κατάλληλη διάταξη.

Abstract

It is generally accepted that the energy problem has escalated in recent years. In addition, the pollution of the planet has increased rapidly. For this reason, the need to use renewable energy sources becomes more necessary than ever. This diploma analyzes the technology of bifacial PV modules, which is based on the operation mode of conventional photovoltaics, while also providing the possibility of receiving solar radiation from the transparent back side of the panels.

Firstly, the energy problem of today is presented, while reference is also made to renewable energy sources. Then solar energy and its exploitation methods are analyzed. The following is the description of the basic technologies of bifacial photovoltaic panels, while the various design factors for the installation of the specific photovoltaic systems are also studied.

The remaining part of the work concerns the design of two photovoltaic parks, for two different areas, through the simulation software, PVsyst. The comparison will be made between a park with bifacial, but also a park with monofacial photovoltaic panels, to highlight, under the change of various parameters, the annual gain in the energy produced by the bifacial panels.

In the end, an economic study is carried out through the software, to determine whether the bifacial photovoltaic technology is economically advantageous.

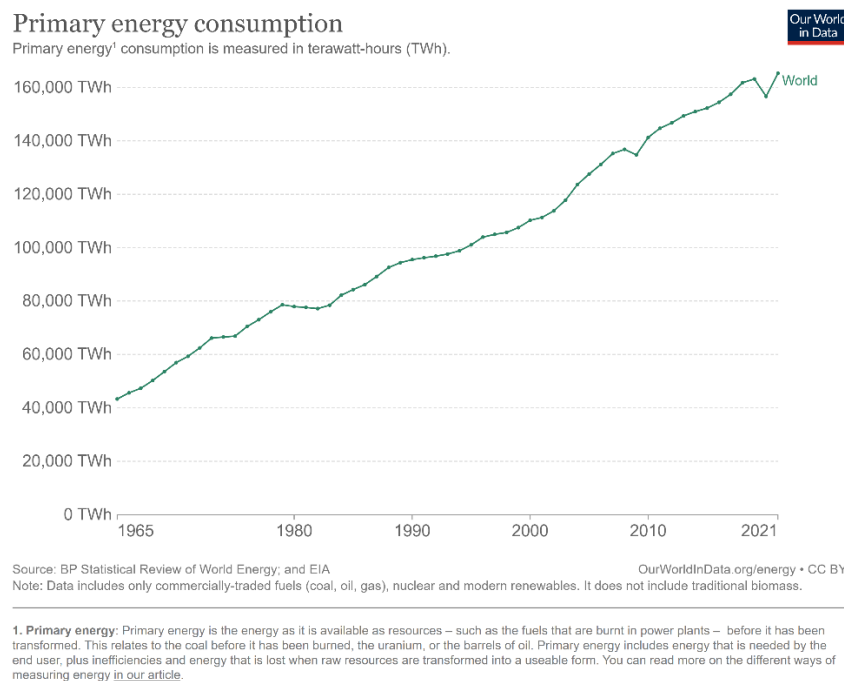
The extracted results are of particular importance for subsequent studies of photovoltaic parks, to choose the suitable type of photovoltaic and under the appropriate arrangement.

1. Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακή Κατάσταση

Η ανθρωπότητα στη σημερινή εποχή, βρίσκεται αντιμέτωπη με μία παγκόσμια ενεργειακή κρίση. Αυτό οφείλεται στην κλιμάκωση της ενεργειακής ζήτησης. Η κλιμάκωση αυτή είναι απόρροια της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της τεχνολογίας, καθώς και λόγω του βελτιωμένου επιπέδου ζωής σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια.

Η τεχνολογία έχει βελτιώσει κατακόρυφα την ανθρώπινη κοινωνία και είναι αρωγός του ανθρώπου για την εξέλιξή του, ενισχύοντας το βιοτικό επίπεδο και τις συνθήκες ζωής του. Όμως, προϋποθέτει την κατανάλωση μεγάλων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη ζήτηση να αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, διαιωνίζεται το πρόβλημα της ενεργειακής κρίσης, το οποίο τίθεται προς αντιμετώπιση. Στην **Εικόνα 1.1**, φαίνεται η ανάγκη για ενέργεια με την πάροδο των ετών.



Εικόνα 1.1: Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση από το 1965 έως το 2021 [1]

Είναι αντιληπτό, από την **Εικόνα 1.1**, ότι με την πάροδο των ετών η ανάγκη για ενέργεια έχει εκτοξευτεί. Με την αύξηση της ενεργειακής ζήτησης/κατανάλωσης, τίθεται ένα σημαντικό θέμα. Αυτό αφορά τις πηγές αξιοποίησης για ενέργεια.

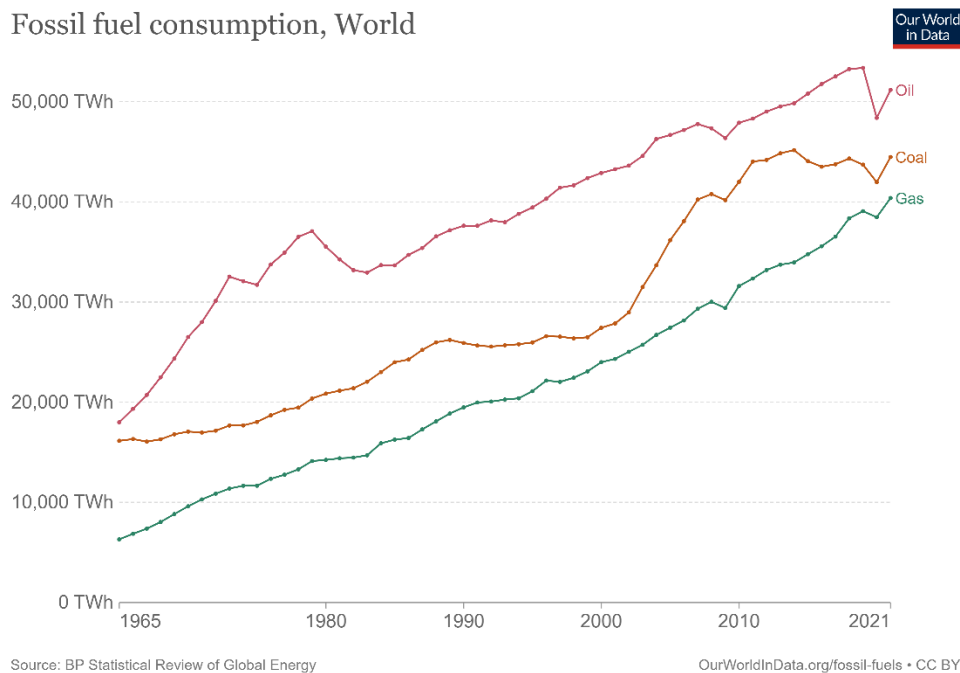
Οι πηγές άντλησης ενέργειας είναι πλέον αρκετές. Βέβαια, ακόμα και σήμερα δεν έχουν αξιοποιηθεί όλες στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους.

Οι κύριες πηγές είναι:

- Άνθρακας
- Πετρέλαιο
- Φυσικό αέριο

Φυσικά, το πρόβλημα αυτών είναι ότι δεν είναι ανεξάντλητες πηγές. Υπάρχουν συγκεκριμένα αποθέματα για τα επόμενα χρόνια και τα περισσότερα εξ αυτών έχουν ήδη αξιοποιηθεί.

Στην **Εικόνα 1.2**, φαίνεται αυτό ακριβώς το πρόβλημα, δηλαδή της υπερβολικής χρήσης των συγκεκριμένων πηγών ενέργειας.



Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων από το 1965 έως το 2021 [1]

Ο κόσμος, βρίσκεται πλέον στην δυσμενή αυτή κατάσταση και είναι ακόμα πιο μεγάλο το πρόβλημα, αν αναλογιστεί κανείς, ότι πλέον ο πληθυσμός της γης έχει ξεπεράσει τα 8 δισεκατομμύρια [2]. Ένα ποσό αρκετά μεγάλο ακόμα και για τα δεδομένα του 2022, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Με λίγα λόγια, είναι μεγάλης σημασίας και θέτει άμεσης επίλυσης το ενεργειακό ζήτημα, καθώς είναι ένα φαινόμενο παγκόσμιο και είτε έχει, είτε θα έχει στο μέλλον επιπτώσεις σε όλες τις χώρες και τους κατοίκους τους.

1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Σε όλα τα παραπάνω προβλήματα που έχουν προκύψει από την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, η ανθρωπότητα κατέφυγε στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτές οι πηγές είναι μία πολύ καλή λύση, η οποία όμως, ακόμα δεν είναι σε θέση να αντικαταστήσει πλήρως τις μη ανανεώσιμες.

Οι κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναλύονται παρακάτω.

1.2.1.1 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια σχετίζεται με την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Πραγματοποιείται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Παθητικά ηλιακά συστήματα
- Ενεργητικά ηλιακά συστήματα
- Φωτοβολταϊκά συστήματα (**Εικόνα 1.3**)

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική αναπτύσσεται η ηλιακή ενέργεια στο **Κεφάλαιο 3**.



Εικόνα 1.3: Συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια από φωτοβολταϊκά πάνελ [3]

1.2.1.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αξιοποιεί τον άνεμο για την παραγωγή κυρίως ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστική εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας, αποτελούν οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική, ενισχύοντας έτσι το δίκτυο. Διασυνδέονται σε αυτό διαρκώς, όλο και περισσότερα αιολικά πάρκα (**Εικόνα 1.4**), με σκοπό την κάλυψη των αναγκών της εκάστοτε χώρας και τη σταδιακή απεξάρτηση από τη χρησιμοποίηση των ορυκτών καυσίμων.



Εικόνα 1.4: Ανεμογεννήτριες στα ανοιχτά των ακτών των ΗΠΑ [4]

1.2.1.3 Υδραυλική ενέργεια

Η υδραυλική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία αξιοποιεί το τρεχούμενο νερό (**Εικόνα 1.5**). Τα υδροηλεκτρικά έργα εκμεταλλεύονται το νερό των ποταμών και μέσω υδροστροβίλων, παράγεται μηχανική ενέργεια, η οποία τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική, ώστε να αξιοποιηθεί από το Σύστημα.



Εικόνα 1.5: Υδροηλεκτρικό Φράγμα στη Σλοβενία [5]

1.2.1.4 Γεωθερμική ενέργεια

Με τον όρο γεωθερμική ενέργεια ή γεωθερμία, ονομάζουμε τη θερμική ενέργεια που βρίσκεται στο εσωτερικό της γης (**Εικόνα 1.6**). Κάποιες από τις εφαρμογές της είναι:

- Η ηλεκτροπαραγωγή
- Η θέρμανση των χώρων
- Η ψύξη και ο κλιματισμός
- και διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές



Εικόνα 1.6: Αναδυόμενος Ατμός από Γεωθερμικό Σταθμό στην Ισλανδία [6]

1.2.1.5 Θαλάσσια ενέργεια

Η θαλάσσια ενέργεια αξιοποιεί τα κύματα, τις παλίρροιες και τους ωκεανούς της θάλασσας. Συνεπώς, όπως και στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών, υπάρχουν διάφοροι υδροστρόβιλοι, οι οποίοι μέσω του ρέοντος ύδατος (**Εικόνα 1.7**) και της περιστροφής τους, επιτυγχάνουν την παράγωγη ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης συνηθίζεται η τοποθέτηση κατάλληλων φραγμάτων για την εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας του νερού.



Εικόνα 1.7: Θαλάσσια ενέργεια από κύματα [7]

1.2.1.6 Βιομάζα

Ως βιομάζα, ορίζουμε τα διάφορα προϊόντα, απόβλητα ή υπολείμματα βιολογικής προέλευσης, από φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας (**Εικόνα 1.8**). Έτσι, μέσα από κατάλληλη επεξεργασία της βιομάζας, δημιουργούνται τα βιοκαύσιμα, όπως η βιοαιθανόλη και το βιοντίζελ, τα οποία χρησιμοποιούνται ως καύσιμα κίνησης [8].



Εικόνα 1.8: Γεωργική Βιομάζα που προορίζεται για ενεργειακή χρήση [9]

Όπως φαίνεται, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αρκετές. Ωστόσο, δεν έχουν ακόμα την ανάπτυξη που ίσως θα περίμεναν οι περισσότεροι. Με τις νέες τεχνολογίες βέβαια δίνονται περισσότερες επιλογές για την αξιοποίησή τους, όπως θα φανεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

1.3 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των bifacial φωτοβολταϊκών πλαισίων και ειδικότερα η σύγκρισή τους με τα monofacial.

Αυτό θα επιτευχθεί, μέσω παραμετρικής μελέτης με το λογισμικό του PVsyst, δημιουργώντας φωτοβολταϊκά πάρκα, bifacial και monofacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, αντίστοιχα, για δύο διαφορετικές χώρες, τη Σουηδία και την Ελλάδα, έτσι ώστε να αναδειχθεί το επιπλέον κέρδος ενέργειας των φωτοβολταϊκών διπλής όψης.

Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα των bifacial έναντι των monofacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ θα πραγματοποιηθεί και οικονομική μελέτη, έτσι ώστε να εξεταστεί το αν είναι η συμφέρουσα η επένδυση για το πάρκο των bifacial φωτοβολταϊκών.

Τα ερωτήματα που γεννιούνται μέσα από τη συγκεκριμένη διπλωματική, είναι κατά πόσο συμφέρει η επιλογή των φωτοβολταϊκών διπλής όψης και το αν είναι εφικτό στο μέλλον να λάβουν υψηλότερο μερίδιο στην αγορά φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Οπότε, στόχος της διπλωματικής είναι να εξεταστεί αυτή η καινούρια τεχνολογία φωτοβολταϊκών. Αυτό γίνεται σε σύγκριση πάντα με τα συμβατικά με σκοπό να αναδειχθεί μέσα από ποικίλες παραμέτρους η αποτελεσματικότητα και η χρησιμότητα των φωτοβολταϊκών διπλής όψης για το μέλλον.

1.4 Οριοθέτηση

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η λειτουργία, ο τρόπος κατασκευής και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση φωτοβολταϊκών πάρκων με bifacial. Η διπλωματική πραγματεύεται την παραμετρική μελέτη δύο παρόμοιων φωτοβολταϊκών πάρκων, με σκοπό την ανάδειξη του κέρδους στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια των bifacial έναντι των monofacial. Σε συνέχεια αυτού γίνεται και οικονομοτεχνική μελέτη.

1.5 Διάρθρωση της Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο, έγινε μία εισαγωγή στο ενεργειακό πρόβλημα και τη λύση του μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αρχικά, γίνεται εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια στον τρόπο αξιοποίησής της, δίνοντας έμφαση στα φωτοβολταϊκά πάνελ. Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύονται τα bifacial φωτοβολταϊκά, τόσο ως προς τον τρόπο λειτουργίας όσο και ως προς τους παράγοντες σχεδίασής τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική μελέτη. Επιπλέον, αναφέρεται και η επιλογή του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προαναφερόμενης μελέτης υπό τη μορφή διαγραμμάτων τόσο για την Αιανή Κοζάνης όσο και για τη Βεστερός της Σουηδίας. Στο έκτο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε η οικονομική μελέτη των bifacial φωτοβολταϊκών μέσω του PVsyst. Τέλος,

στο έβδομο κεφάλαιο, έγινε ανακεφαλαίωση των αποτελεσμάτων από τη μελέτη και τη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε, ανάμεσα στα δύο είδη φωτοβολταϊκών και παρουσιάστηκαν οι προτάσεις για μελλοντική εργασία γύρω από τα bifacial φωτοβολταϊκά.

2. Ηλιακή Ενέργεια

2.1 Ηλιακή Ακτινοβολία

Ο ήλιος εκπέμπει ακτινοβολία, η οποία αποτελεί την πηγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το ποσό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση, την ημερομηνία του έτους, την ώρα και συνεπώς την απόσταση του ήλιου από τη Γη.

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσεγγίζει την επιφάνεια της γης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες [10]:

- την άμεση ακτινοβολία, η οποία καταλήγει στη γη απευθείας χωρίς να διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα. Επίσης, είναι υπεύθυνη για την παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών.
- τη διάχυτη ακτινοβολία, η οποία αποτελεί το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που έχει σκεδαστεί στην ατμόσφαιρα προτού φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους ή που ανακλάται από την επιφάνεια της γης ξανά στην ατμόσφαιρα [11]. Σημειώνεται ότι είναι υπεύθυνη για το φως της ημέρας.

Η ακτινοβολία προσδιορίζεται με ένα ειδικό όργανο, το ακτινόμετρο.

Τέλος, η ολική ακτινοβολία ισούται με το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας.

2.1.1.1 Χρήσιμοι τύποι για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας

Ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στη γη.

Καταρχάς, στην **Εικόνα 2.1** παρατίθεται ο πίνακας των μέσων ημερών του κάθε μήνα με τις αντίστοιχες ηλιακές αποκλίσεις.

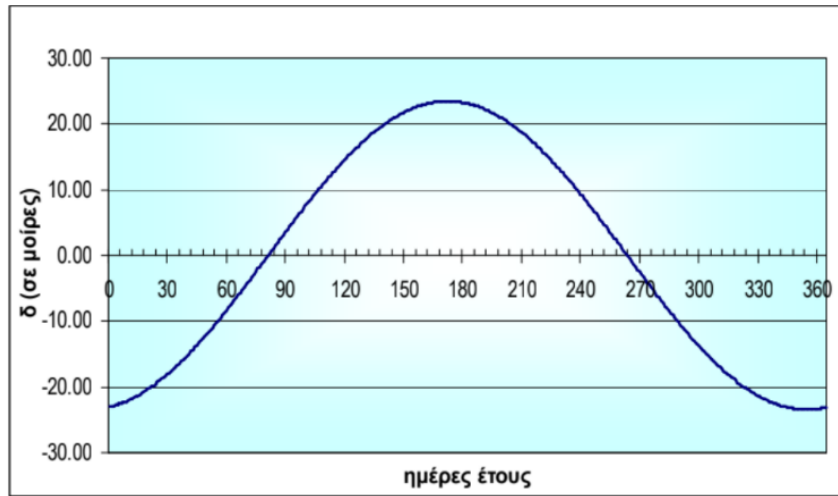
Month	n for i th Day of Month	For Average Day of Month		
		Date	n	δ
January	i	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

Εικόνα 2.1: Αύξων αριθμός της ημέρας του έτους, n , μέση ημέρα κάθε μήνα και αντίστοιχη τιμή της ηλιακής απόκλισης δ [12]

Ως n συμβολίζεται η ημέρα του έτους, με $n = 1 \div 365$, ενώ με δ συμβολίζεται η ηλιακή απόκλιση, η οποία αντιστοιχεί στη γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού [10] και όπως φαίνεται στη **Σχέση 2.1**:

$$\delta = 23.45 * \sin\left(360 * \frac{284+n}{365}\right) \quad (2.1)$$

Η παραπάνω σχέση αντιστοιχεί και στο ακόλουθο διάγραμμα της **Εικόνας 2.2**:



Εικόνα 2.2: Ηλιακή απόκλιση δ , συναρτήσει των ημερών του έτους [13]

Ακολουθούν οι τύποι υπολογισμού της άμεσης ακτινοβολίας για οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια, οι οποίοι φαίνονται αντίστοιχα στις **Σχέσεις 2.2 και 2.3**:

$$G_b = G_{bn} * \cos \theta_z \quad (2.2)$$

$$G_{bT} = G_{bn} * \cos \theta \quad (2.3)$$

όπου ως G_b , G_{bT} και G_{bn} συμβολίζεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται αντίστοιχα, το οριζόντιο, το κεκλιμένο και το κάθετο επίπεδο [10].

Επίσης η γωνία θ , αντιστοιχεί στη γωνία πρόσπτωσης της άμεσου ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια, ενώ η γωνία θ_z στη γωνία ζενίθ ($\beta=0^\circ$) και υπολογίζονται από τις **Σχέσεις 2.4 και 2.5**

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta * \sin \varphi * \cos \beta - \sin \delta * \cos \varphi * \sin \beta * \cos \gamma + \\ &\cos \delta * \cos \varphi * \cos \beta * \cos \omega + \cos \delta * \sin \varphi * \sin \beta * \cos \gamma * \cos \omega + \cos \delta * \\ &\sin \beta * \sin \gamma * \sin \omega \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega \quad (2.5)$$

όπου με φ , συμβολίζεται το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, με β , η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο και με γ το αζιμούθιο της επιφάνειας, το οποίο αντιστοιχεί στη γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση [10].

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει το R_b , το οποίο ορίζεται ως η άμεση ακτινοβολία οριζόντιας προς την άμεση ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας (**Σχέση 2.6**):

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} \quad (2.6)$$

Ειδικότερα, για κεκλιμένες επιφάνειες του βόρειου ημισφαιρίου που είναι στραμμένες προς τον νότο (έχουν μηδενικό αζιμούθιο), συνδυάζοντας τις **Σχέσεις 2.5, 2.6** και τη **Σχέση 2.7**, η οποία ισχύει για κεκλιμένες επιφάνειες του βόρειου ημισφαιρίου με $\gamma=0^\circ$, προκύπτει η **Σχέση 2.8**:

$$\cos \theta = \sin \delta * \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta * \cos(\varphi - \beta) * \cos \omega \quad (2.7)$$

$$R_b = \frac{\sin \delta * \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta * \cos(\varphi - \beta) * \cos \omega}{\sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega} \quad (2.8)$$

όπου ως ωριαία γωνία, ω , ορίζεται η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου, ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, λόγω της περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της, με ρυθμό $15^\circ/h = 0.25^\circ/\text{min}$ [10]. Ισχύει ότι (**Σχέση 2.9**):

$$\omega = 0.25 * \text{min} (\text{από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (2.9)$$

Λαμβάνεται $\omega > 0$ για μ.μ. και $\omega < 0$ για π.μ.

Στη συνέχεια, στη **Σχέση 2.10** παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου, H :

$$H = k_t * H_o \quad (2.10)$$

όπου ως k_t ορίζεται ο ημερήσιος δείκτης αιθριότητας (για μια συγκεκριμένη ημέρα του μήνα) και ως H_o , ορίζεται η ημερήσια ενέργεια που δέχεται οριζόντια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας (σε J/m^2) [10] και υπολογίζεται από τη **Σχέση 2.11**:

$$H_o = \frac{24 * 3600}{\pi} * G_{sc} * (1 + 0.033 * \cos(\frac{360 * n}{365})) * (\cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega_s + \frac{2\pi * \omega_s}{360} * \sin \varphi * \sin \delta) \quad (2.11)$$

όπου ως $G_{sc} = 1353 W/m^2$ ορίζεται η ηλιακή σταθερά και ως ω_s , η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου, η οποία υπολογίζεται από τη **Σχέση 2.12**:

$$\cos \omega_s = - \tan \varphi * \tan \delta \quad (2.12)$$

Οπότε με βάση τα παραπάνω, υπολογίζεται η τιμή της μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου, H_T (**Σχέση 2.13**):

$$H_T = R * H \quad (2.13)$$

Με R ορίζεται ένας συντελεστής του οποίου η σχέση αποτελείται από την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη ακτινοβολία όπως φαίνεται παρακάτω (**Σχέση 2.14**):

$$R = \left[\left(1 - \frac{H_d}{H} \right) * R_b \right] + \left[\frac{H_d}{H} * \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \right] + \left[\rho * \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \right] \quad (2.14)$$

όπου με ρ συμβολίζεται ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους ($\rho=0.2$ για συνηθισμένο έδαφος και $\rho=0.7$ για χιονισμένο έδαφος) [10].

Τέλος, ο λόγος H_d / H αντιστοιχεί στην ημερήσια διάχυτη προς την ημερήσια ολική ακτινοβολία οριζόντιου επιπέδου και υπολογίζεται από τη **Σχέση 2.15**:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 \text{ για } k_t \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272 * k_t + 9.473 * k_t^2 - 21.865 * k_t^3 + 14.648 * k_t^4 \text{ για } 0.17 < k_t \leq 0.75 \\ 0.54 * k_t + 0.632 \text{ για } 0.75 < k_t \leq 0.80 \\ 0.2 \text{ για } k_t \geq 0.80 \end{cases} \quad (2.15)$$

2.2 Τρόποι αξιοποίησης ηλιακής ακτινοβολίας

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

- τα θερμικά ηλιακά πάνελ
- τα φωτοβολταϊκά συστήματα
- και τα παθητικά ηλιακά συστήματα

Σημειώνεται ότι τα παθητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση και την ψύξη, τα φωτοβολταϊκά συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ τα θερμικά ηλιακά πάνελ είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα.

Οι παραπάνω τεχνολογίες εξελίσσονται διαρκώς, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή απόδοση αναλογικά με τις απαιτήσεις των χρηστών, είτε για οικιακή είτε για βιομηχανική χρήση.

2.2.1.1 Θερμικά ηλιακά πάνελ

Τα θερμικά ηλιακά πάνελ ή πιο συνηθισμένα, οι ηλιακοί συλλέκτες, είναι ειδικής μορφής εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Η ιδιαιτερότητα των συγκεκριμένων εναλλακτών σε σχέση με τους συμβατικούς, είναι ότι μεταφέρουν ενέργεια από μακρινή απόσταση (ήλιος) στο ρευστό, σε αντίθεση με τους συμβατικούς, στους οποίους η μεταφορά γίνεται από το ένα ρευστό στο άλλο, με την ακτινοβολία να θεωρείται αμελητέα [10].

Η λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών στηρίζεται στην απορρόφηση ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας από την επιφάνειά τους, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στο υλικό τους [14].

Οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες
- Συλλέκτες κενού
- Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες

Η τεχνολογία των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών χρησιμοποιείται ευρέως στα κτίρια, με εφαρμογές, τη θέρμανση του χώρων, καθώς και του χρησιμοποιούμενου νερού, τον κλιματισμό αλλά και την παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση [10].

Εκμεταλλεύονται την άμεση και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν απόδοση ενέργειας σε θερμοκρασίες έως και 100 °C πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος [10].

Σημειώνεται ότι δεν απαιτούν μηχανισμό κίνησης για την παρακολούθηση του ήλιου, οπότε είναι πιο εύχρηστοι από τους συγκεντρωτικούς και χρειάζονται ελάχιστα συντήρηση ανά τα έτη.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα επίπεδων ηλιακών συλλεκτών στην **Εικόνα 2.3**.

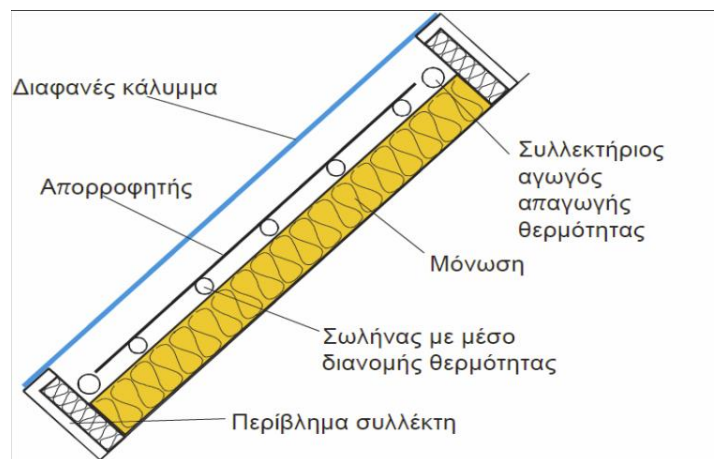


Εικόνα 2.3: Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες [15]

Τα κύρια μέρη των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών είναι [10]:

- ο απορροφητήρας (πλάκα απορρόφησης), μία μαύρη επίπεδη πλάκα, η οποία είναι υπεύθυνη για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και για τη μεταφορά της ενέργειας στο ρευστό
- το κάλυμμα το οποίο βρίσκεται πάνω από τον απορροφητήρα, ώστε να μειώνει τις θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον
- η μόνωση, η οποία εφαρμόζεται πίσω ή παράπλευρα στις επιφάνειες του συλλέκτη για να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες
- το πλαίσιο το οποίο περιβάλλει όλα τα επιμέρους στοιχεία του συλλέκτη

Στην **Εικόνα 2.4**, φαίνονται τα επιμέρους τμήματα του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη:



Εικόνα 2.4: Επιμέρους τμήματα ηλιακού συλλέκτη [16]

Οι συλλέκτες κενού (**Εικόνα 2.5**), αποτελούνται από ένα σύστημα αρθρωτών σωλήνων, έχουν μεγαλύτερη απόδοση από τους επίπεδους συλλέκτες και χαρακτηρίζονται από μειωμένες απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής, με το φως του ηλίου να προσπίπτει κάθετα στην απορροφητική τους επιφάνεια κατά τη διάρκεια της ημέρας [13].

Εκμεταλλούνται την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και σε συνδυασμό με τις ελάχιστες απώλειες θερμότητας, οι συλλέκτες αυτού του τύπου γίνονται ανθεκτικοί σε κρύα κλίματα και σε περιοχές μειωμένης ηλιοφάνειας.

Τέλος, σημειώνεται ότι παρόλο που οι συλλέκτες κενού αγγίζουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες και αποδόσεις από αυτές των επίπεδων συλλεκτών, η κοστολόγησή τους είναι αρκετά ακριβότερη [13].



Εικόνα 2.5: Συλλέκτες κενού [17]

Η τελευταία κατηγορία που θα παρουσιαστεί, αφορά τους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες (**Εικόνα 2.6**). Οι συλλέκτες αυτοί, χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες [13]:

- στους συλλέκτες γραμμικής εστίασης, οι οποίοι εστιάζουν τις ακτίνες του ηλίου κατά μήκος του κέντρου παραβολικής επιφάνειας και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού στην ηλεκτροπαραγωγή
- στους συλλέκτες σημειακής εστίασης, οι οποίοι, επίσης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού

Σημειώνεται ότι το κόστος τους είναι ακριβότερο σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες, καθώς χρησιμοποιούν συστήματα παρακολούθησης του ηλίου, τα οποία προσαρμόζονται διαρκώς στην τροχιά του.



Εικόνα 2.6: Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες [18]

2.2.1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η επόμενη κατηγορία που θα παρουσιαστεί, αφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα (**Εικόνα 2.7**). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, δίχως τη χρησιμοποίηση θερμικής μηχανής. Έτσι, μέσω των ηλιακών κελιών, της επιφάνειά τους και των μηχανισμών που διαθέτουν, μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα του ήλιου σε εναλλασσόμενο προς κάθε διαθέσιμη χρήση.

Παρουσιάζουν, αρκετά υψηλή αξιοπιστία, έχουν μικρό κόστος συντήρησης και διάρκεια ζωής τουλάχιστον 25 ετών, με αντοχή σε πολλές αντίξοες καιρικές συνθήκες. Εξελισσονται διαρκώς, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ζήτησή τους με την πάροδο των ετών.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα αναλυθούν εκτενέστερα στο **Κεφάλαιο 2.3**.



Εικόνα 2.7: Φωτοβολταϊκά συστήματα [19]

2.2.1.3 Παθητικά ηλιακά συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα, χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων, ενώ σε αντίθεση με τα ενεργητικά, δεν αποτελούνται από χημικά ή ηλεκτρικά είδη και συνεπώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και ευκολία ως προς τη συντήρηση [13].

Στην κατασκευή ενός παθητικού ηλιακού κτιρίου, θα πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλα τα παράθυρα, τα δάπεδα και οι τοίχοι, ώστε να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία τον χειμώνα και να τη διανέμουν υπό μορφή θερμότητας στον χώρο, ενώ το καλοκαίρι πρέπει να την απορρίπτουν [20]. Συνεπώς, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη διαστασιολόγηση και την επιλογή του τύπου των υαλοπινάκων, στα φαινόμενα σκίασης και στη θερμομόνωση [20].

2.3 Φωτοβολταϊκά Πάνελ

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στα συμβατικά φωτοβολταϊκά. Η αναφορά για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως θα γίνει στο **Κεφάλαιο 3**.

2.3.1.1 Τρόπος Λειτουργίας - φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι από τους πιο αποτελεσματικούς και ευρέως χρησιμοποιούμενους τρόπους αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, μέσω των ηλιακών κελιών, χωρίς την υποβοήθηση από θερμικές μηχανές. Η παραπάνω διαδικασία ονομάστηκε φωτοβολταϊκό φαινόμενο και παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Alexandre – Edmond Becquerel, το 1839, με την πρόσπτωση του φωτός σε ένα ηλεκτρόδιο μέσα σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα [14].

Για την εξήγηση του παραπάνω φαινομένου, χρειάζεται πρώτα να αναφερθούν ορισμένες βασικές έννοιες, καθώς και ο τρόπος λειτουργίας των **ημιαγωγών**.

Ως ημιαγωγός, ορίζεται κάθε υλικό του οποίου η ειδική αντίσταση φθίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας του, λαμβάνοντας τιμές ανάμεσα σε αυτές των αντιστάσεων, των αγωγών και των μονωτών [21].

Τα ηλεκτρόνια των στοιχείων κατανέμονται σε διάφορες στοιβάδες και υποστοιβάδες. Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας του ατόμου καθορίζουν το αν το άτομο θα αντιδράσει ή θα συνδεθεί με κάποιο γειτονικό άτομο, γι' αυτό και η συγκεκριμένη στοιβάδα ονομάζεται **στοιβάδα σθένους**. Στην στοιβάδα αυτή, υφίστανται κάποια ηλεκτρόνια που μεταπηδούν με ευκολία σε μεγαλύτερη στοιβάδα και άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα και τη θερμότητα. Η στοιβάδα που τα χαρακτηρίζει ονομάζεται **στοιβάδα αγωγιμότητας**, ενώ η διαφορά ενέργειας ενός ηλεκτρονίου ανάμεσα στη στοιβάδα σθένους και στην εσωτερική υποστοιβάδα της στοιβάδας αγωγιμότητας ονομάζεται **ενεργειακό χάσμα** [14].

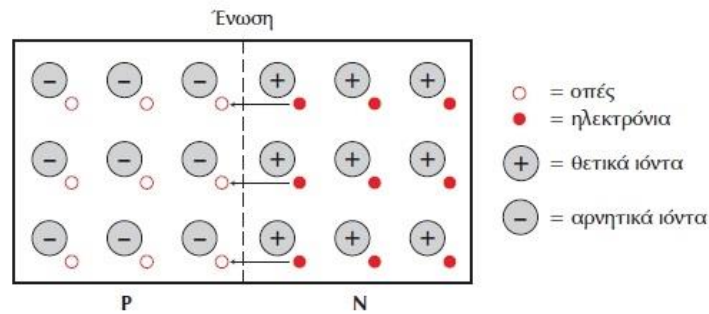
Οι μονωτές χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλό ενεργειακό χάσμα ($>3\text{eV}$), με πλήρεις τις στοιβάδες σθένους τους, σε αντίθεση με τους αγωγούς των οποίων οι στοιβάδες σθένους, φέρουν λίγα ηλεκτρόνια. Επίσης μερικά από τα ηλεκτρόνια τους βρίσκονται στη στοιβάδα αγωγιμότητας.

Οι ημιαγωγοί, από την άλλη, χαρακτηρίζονται από μερικώς πλήρεις στοιβάδες σθένους και από μέτριο ενεργειακό χάσμα ($\leq 3\text{eV}$).

Επιπλέον, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σχετίζεται άμεσα με την **επαφή p-n (Εικόνα 2.8)**.

Ως υλικό τύπου-n, ονομάζεται το υλικό, το οποίο περιέχει κάποια αλλότρια άτομα, που φέρουν περισσότερα ηλεκτρόνια σε σχέση με τα άτομα του κύριου υλικού [14]. Σε αντίθεση με το παραπάνω υλικό, τα άτομα του υλικού τύπου-p περιέχουν λιγότερα ηλεκτρόνια σε σχέση με το κύριο υλικό.

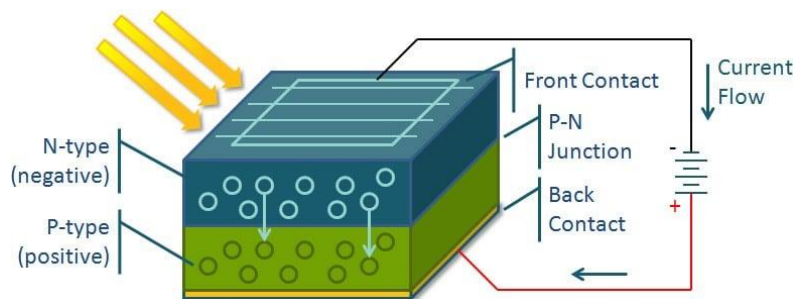
Συνδυάζοντας λοιπόν, τους δύο παραπάνω ορισμούς, μόλις έρθουν σε επαφή οι δύο διαφορετικοί τύποι υλικών, n και p, τα επιπλέον ηλεκτρόνια του υλικού-n τείνουν να πληρώσουν τις σπές του υλικού τύπου-p. Οπότε, το αρνητικό φορτίο της παραπάνω ένωσης θα βρίσκεται από την πλευρά p, ενώ το θετικό, από την πλευρά n, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μετακίνηση των ηλεκτρονίων από την πλευρά p στην n και να περιορίζεται η μετακίνησή τους από την n στην p.



Εικόνα 2.8: Ένωση p-n [22]

Αυτή η διαδικασία ακολουθείται και στις διόδους και εφαρμόζεται κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών κελιών [14].

Η επαφή p-n, αποτελεί τη βάση στην οποία στηρίζεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Εικόνα 2.9), δηλαδή η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων.



Εικόνα 2.9: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [23]

Για τον παραπάνω σκοπό, χρησιμοποιούνται υλικά όπως το αρσενιούχο γάλλιο και ο δισελινιοϊνδιούχος χαλκός, με το πιο διαδεδομένο ημιαγωγικό υλικό των φωτοβολταϊκών να είναι το πυρίτιο (Si), το οποίο δέχεται επεξεργασία, ώστε να αποκτήσει την κατάλληλη καθαρότητα και κρυσταλλική δομή. Είναι άφθονο στη γη και έχει τα καλύτερα δυνατά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά για την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, με μοναδικό μειονέκτημα την ευθραυστότητά του.

Τα ηλιακά κελιά αποτελούνται από δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού από κρυστάλλους πυριτίου. Στο κάτω μέρος του κελιού προστίθεται συχνά Βόριο, για να βοηθήσει στην ανάπτυξη του θετικού φορτίου (p), ενώ το πάνω μέρος ενισχύεται με Φώσφορο, ώστε σε συνδυασμό με το πυρίτιο να αναπτυχθεί το αρνητικό φορτίο (n) [24].

Η ηλιακή ακτινοβολία, αποτελείται από φωτόνια, τα οποία αντιστοιχούν σε 'πακέτα' ηλιακής ενέργειας. Τα φωτόνια αποτελούνται από διαφορετικά ποσά ενέργειας που αντιστοιχούν σε διάφορα μήκη κύματος. Κάθε φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού των φωτοβολταϊκών κυττάρων, μπορεί να απορροφηθεί ώστε να ελευθερωθεί στη συνέχεια ένα ηλεκτρόνιο [25] και να ακολουθηθεί ο τρόπος λειτουργίας της διόδου όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Τέλος, η όλη διάταξη στην οποία βασίζεται το φωτοβολταϊκό, αποτελεί πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία [25].

2.3.1.2 Είδη φωτοβολταϊκών και χαρακτηριστικά κατασκευής τους

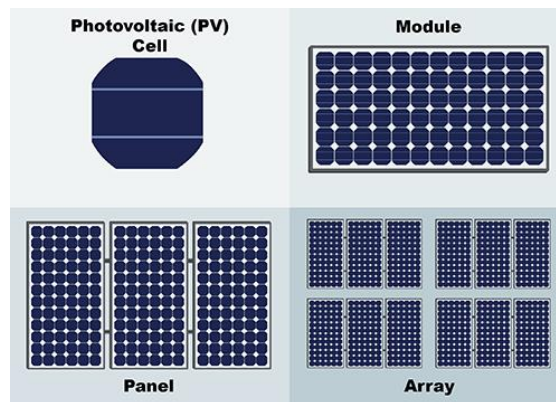
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από προκαλωδιωμένα ηλιακά κελιά σε σειρά, που περικλείονται από προστατευτικά περιβλήματα [25] και συνήθως κατασκευάζονται σε τετραγωνικό σχήμα, ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή τοποθέτησή τους.

Τα φωτοβολταϊκά κελιά, αποτελούν το σημείο έναρξης της κατασκευής του φωτοβολταϊκού. Ενώνοντας πολλά κελιά μεταξύ τους, δημιουργείται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, του οποίου η βάση αποτελείται από μέταλλο ή από πλαστικό.

Σημειώνεται, ότι συνήθως, στα συμβατικά φωτοβολταϊκά, η πίσω πλευρά είναι αδιαφανής και κατασκευάζεται από αλουμίνιο ή πλαστικό, ενώ η μπροστινή είναι γυάλινη, ώστε να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία.

Συνδυάζοντας πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια υπό την ίδια μεταλλική κατασκευή, δημιουργούμε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Με τη σειρά τους, πολλά πάνελ μαζί, δημιουργούν τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες (photovoltaic arrays). Σε περιπτώσεις που είναι αναγκαία η αυξημένη παραγωγή, χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά πάρκα, με τα πάνελ να τοποθετούνται είτε σε σειρά είτε εν παραλλήλω, για τη βέλτιστη αξιοποίηση του υπάρχοντος χώρου.

Στην **Εικόνα 2.10** φαίνονται τα χαρακτηριστικά της δομής των φωτοβολταϊκών που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 2.10: Φωτοβολταϊκό κελί πάνω αριστερά, πλαίσιο πάνω δεξιά, πάνελ κάτω αριστερά και συστοιχία κάτω δεξιά [26]

Οι υπάρχουσες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών ταξινομούνται σε τρεις γενιές ανάλογα με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά:

- 1^η γενιά: Κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία
- 2^η γενιά: Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού φιλμ
- 3^η γενιά: Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων τεχνολογιών

➤ **1^η γενιά: Κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία**

Όπως προαναφέρθηκε, το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι το πυρίτιο.

Στην 1^η γενιά, χρησιμοποιείται κυρίως η μορφή του μονοκρυσταλλικού ή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αυτής της γενιάς διαρκούν περισσότερο και έχουν υψηλότερη απόδοση από άλλα φωτοβολταϊκά κύτταρα. Είναι τα πιο αποτελεσματικά και τα πιο διαδεδομένα ανάμεσα στις τρεις γενιές, όμως παρουσιάζουν υψηλό κόστος κατασκευής και η απόδοσή τους μειώνεται υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας [27].

- **Τεχνολογία Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si)**

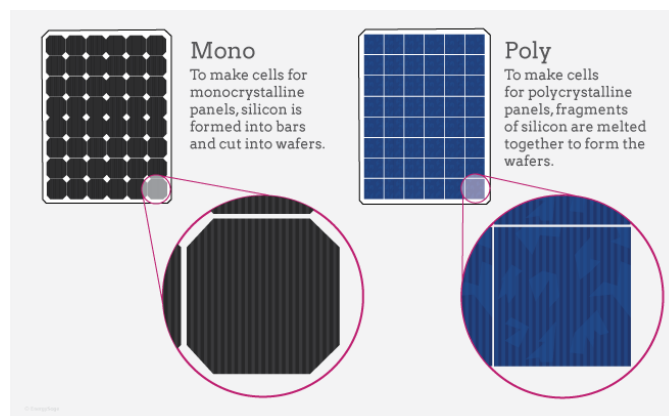
Ανάμεσα στα υπόλοιπα φωτοβολταϊκά κύτταρα που έχουν σαν βάση το πυρίτιο, η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει τους υψηλότερους βαθμούς απόδοσης, αλλά και το υψηλότερο κόστος, καθώς κατασκευάζονται από καθαρούς κρυστάλλους. Τα χρώματά τους είναι μαύρα ή γκρι και ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται από 16% έως 24% [27]. Αποτελούνται από συνεχές κρύσταλλο πυριτίου σε όλη τους την επιφάνεια, και το πάχος τους κυμαίνεται από 0.3 έως και 0.5mm [24].

- **Τεχνολογία Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si)**

Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κύτταρα, κατασκευάζονται από ράβδους κρυσταλλικού πυριτίου, με μεγαλύτερη ευκολία από τα μονοκρυσταλλικά, συνεπώς είναι φθηνότερα, αλλά λιγότερο αποτελεσματικά. Συναντώνται συνήθως σε μπλε χρώμα και ο βαθμός απόδοσής τους έχει εύρος από 14-18% [27].

Μία από τις μεθόδους παραγωγής τους είναι η χύτευση [24].

Για τις δύο παραπάνω κατηγορίες (**Εικόνα 2.11**), η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας κυμαίνεται μεταξύ 75 και 155Wp/m² [27].



Εικόνα 2.11: Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου [28]

➤ **2^η γενιά: Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού φιλμ**

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα 2^{ης} γενιάς είναι πολύ πιο οικονομικά από τις κυψέλες της πρώτης γενιάς, καθώς το κόστος κατασκευής των ημιαγωγών τους, είναι σημαντικά χαμηλότερο και η διαδικασία παρασκευής τους είναι πιο απλή. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αυτής της γενιάς κατασκευάζονται από πολύ λεπτά στρώματα ημιαγωγών υλικών και βασίζονται στην τεχνολογία των λεπτών υμενίων.

Χρησιμοποιούνται λιγότερα υλικά ημιαγωγών σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις, οπότε η απόδοσή τους είναι αρκετά χαμηλότερη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα φωτοβολταϊκά που έχουν σαν βάση το πυρίτιο [27].

Οι βασικότεροι τύποι των κυττάρων που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη γενιά είναι το άμορφο πυρίτιο (a-Si), το Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe) και ο Δισελινιοϊνδιούχος χαλκός (CIS) και καταλαμβάνουν σήμερα περίπου το 20% της συνολικής αγοράς φωτοβολταϊκών [27].

- **Τεχνολογία άμορφου πυριτίου**

Η κατασκευή του άμορφου πυριτίου, στηρίζεται στη συγκέντρωση πυριτίου σε υποστρώματα γυαλιού ή πλαστικού, από ένα αντιδρών αέριο, υπό την παρουσία προσμίξεων [24].

Παρουσιάζει χαμηλό κόστος κατασκευής, καθώς η διεργασία παρασκευής του, γίνεται υπό χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ συναντάται σε χρώμα κόκκινο-καφέ ή μαύρο. Τέλος, η απόδοση των κυττάρων του άμορφου πυριτίου κυμαίνεται από 4% έως και 10%, ενώ η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας λαμβάνει τιμές περίπου από 40-65Wp/m² [27].



Εικόνα 2.12: Φωτοβολταϊκό άμορφου πυριτίου [29]

- **Τεχνολογία Τελλουριούχου Καδμίου**

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα από Τελλουριούχο Κάδμιο έχουν το χαμηλότερο κόστος κατασκευής από όλες τις υπόλοιπες τεχνολογίες λεπτών υμενίων, ενώ ο βαθμός απόδοσής τους λαμβάνει τιμές από 9.4% έως και 13.8% [27]. Χρησιμοποιείται σε διάφορα μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα ανά τον κόσμο.

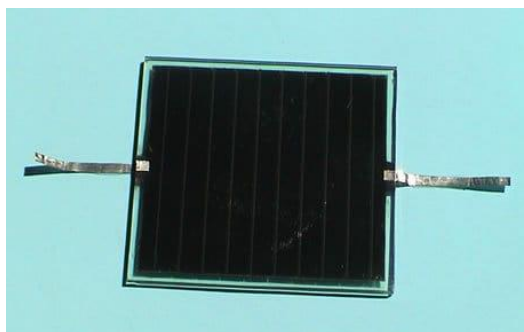
Ως αρνητικό στοιχείο, σημειώνεται η τοξικότητα του καδμίου, η οποία αποτελεί απειλή προς το περιβάλλον, τόσο κατά την παραγωγή όσο και κατά την απόρριψη των φωτοβολταϊκών [30].



Εικόνα 2.13: Φωτοβολταϊκά Τελλουριούχου καδμίου [29]

- Τεχνολογία Δισελινόϊνδιούχου χαλκού

Η τεχνολογία από Δισελινόϊνδιούχο χαλκό, είναι η πιο κατάλληλη για τα φωτοβολταϊκά λεπτής μεμβράνης. Ο βαθμός απόδοσής των συγκεκριμένων κυττάρων κυμαίνεται από 11% έως και 18.7% [27]. Έχει χαμηλό κόστος, όμως οι διαθέσιμες ποσότητες του συγκεκριμένου υλικού είναι περιορισμένες.



Εικόνα 2.14: Φωτοβολταϊκό Δισελινόϊνδιούχου χαλκού [31]

➤ 3^η γενιά: Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων τεχνολογιών

Η 3^η γενιά των φωτοβολταϊκών κυψελών έχει σαν στόχο την παραγωγή συσκευών υψηλής απόδοσης, έχοντας ως βάση την τεχνολογία λεπτών υμενίων που ακολουθείται στη 2^η γενιά [27]. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται νέα υλικά πέρα από το πυρίτιο, όπως τα οργανικά υλικά, οι νανοσωλήνες και τα αγώγιμα πλαστικά [27].

Επιπλέον, μέσα από διάφορες ερευνητικές μελέτες πανεπιστημίων αναζητάται διαρκώς η βέλτιστη λύση για την κατασκευή πιο οικονομικών και αποδοτικών φωτοβολταϊκών, ώστε να καλύπτονται οι όλο και αυξανόμενες ανάγκες της κοινωνίας.

3. Bifacial Φωτοβολταϊκά

3.1 Ιστορική Αναδρομή

Η τεχνολογία των Bifacial φωτοβολταϊκών ή φωτοβολταϊκών διπλής όψης, προτάθηκε σαν ιδέα, για πρώτη φορά στις 4 Οκτωβρίου του 1960 από τον Hiroshi Mori. Ακολουθούσε τη δομή p-n-p με τα ηλεκτρόδια επαφής να είναι προσαρτημένα στα δύο απέναντι άκρα [32].

Η παρουσίαση του πρώτου bifacial μοντέλου πραγματοποιήθηκε το 1977, όπου και αναπτύχθηκε για διαστημικές εφαρμογές, ώστε να αξιοποιηθούν και οι δύο διαφανείς πλευρές του, για την απορρόφηση του φωτός [33]. Έκτοτε ακολούθησαν διάφορες εργαστηριακές έρευνες όπως αυτή του 1994, όπου δύο Βραζιλιάνοι διδακτορικοί φοιτητές του Ινστιτούτου Ηλιακής Ενέργειας, ο Adriano Moehlecke και ο Izete Zanescο, μαζί με τον καθηγητή Antonio Luque, παρήγαγαν ένα ηλιακό στοιχείο διπλής όψης [34]. Απέδιδε 18.1% στη μπροστινή όψη και 19.1% στην πίσω, με τα φωτοβολταϊκά μονής όψης εκείνης της εποχής να έχουν αποτελεσματικότητα μέχρι 22% περίπου [34].

Ωστόσο, η ιδέα των φωτοβολταϊκών διπλής όψεως παρέμεινε στάσιμη για αρκετά έτη, καθώς δόθηκε περισσότερη έμφαση στην αύξηση του βαθμού απόδοσης της μπροστινής πλευράς του πάνελ [35].

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, ήρθαν στην επιφάνεια όλο και εντονότερα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ως αποτέλεσμα αυξήθηκε η είσοδος των συμβατικών φωτοβολταϊκών στην αγορά.

Παρουσιάστηκε λοιπόν, η ανάγκη για συνεχή βελτίωση των τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών, ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή απόδοση με το ελάχιστο δυνατό κόστος, για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών.

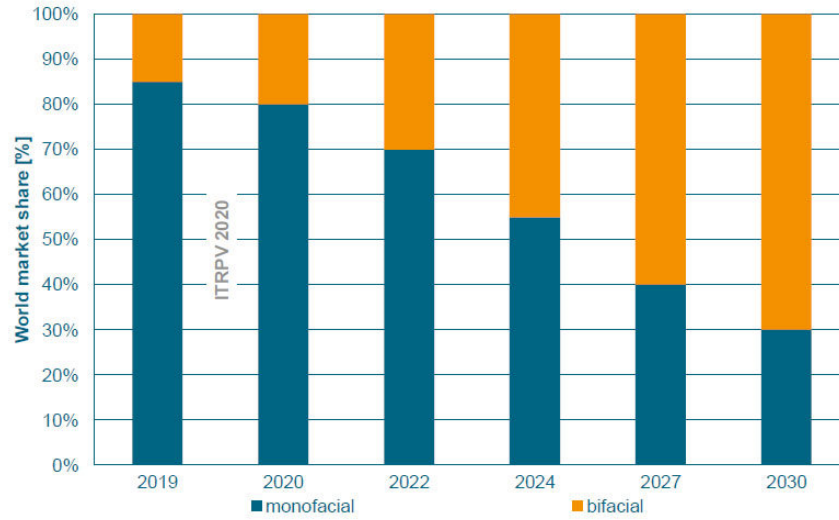
Ακολούθησε η κατασκευή διάφορων καινούριων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών.

Από τη δεκαετία του 2010 και μετά, ξεκίνησε η μαζική παραγωγή μονάδων bifacial φωτοβολταϊκών [36]. Οι τιμές των μονάδων τους ήταν πολύ κοντά στις αντίστοιχες των συμβατικών, καθώς χρησιμοποιούσαν κάποιες νέες δομές με βάση το κρυσταλλικό πυρίτιο [37].

Με την πάροδο των ετών, τα bifacial διεισδύουν σταδιακά όλο και περισσότερο στην αγορά. Το 2020 κατείχαν το 17% της αγοράς φωτοβολταϊκών, ενώ το 2021 το 28% [36].

Τέλος, εκτιμάται ότι το μερίδιο των bifacial θα ανέλθει μέχρι το 40% της αγοράς έως το 2028 [38].

Ακολουθεί στην **Εικόνα 3.1** η εκτιμώμενη διείσδυση των Bifacial φωτοβολταϊκών στην αγορά.



Εικόνα 3.1: Πρόβλεψη διεξόδου Bifacial Φωτοβολταϊκών έως το 2030 [39]

3.2 Τρόπος Λειτουργίας

Ο τρόπος λειτουργίας των Bifacial φωτοβολταϊκών είναι παρόμοιος με αυτόν που ακολουθούν τα φωτοβολταϊκά μονής όψης, με τη διαφορά ότι στην πρώτη περίπτωση παράγεται ενέργεια και από την πίσω πλευρά πέρα από την μπροστινή.

Οπότε, ισχύει και εδώ το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, όπως περιγράφηκε στο **υποκεφάλαιο 2.3.1.1**. Σύμφωνα με το οποίο, σε συνδυασμό με την ένωση p-n των ημιαγωγών, επιτυγχάνεται η μετατροπή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

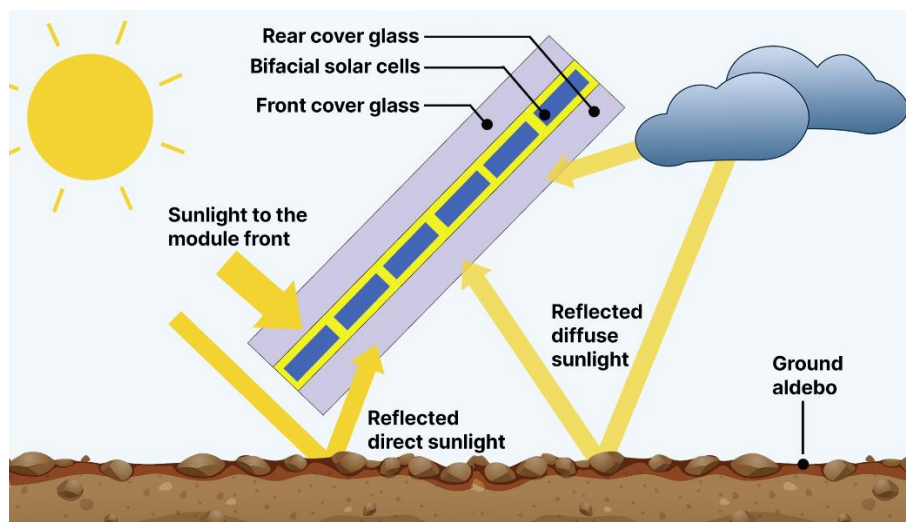
Ωστόσο, στην περίπτωση των Bifacial φωτοβολταϊκών, το φως εισέρχεται και από τις δύο πλευρές του πλαισίου και ως αποτέλεσμα αυξάνεται η συνολική παραγόμενη ενέργεια. Αξιοποιείται λοιπόν, η ανακλαστικότητα του εδάφους και ανάλογα με το albedo που επικρατεί, δηλαδή το λόγο της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία (θα γίνει αναφορά στο **Κεφάλαιο 3.4**) και τις διάφορες συνθήκες τοποθέτησης των πλαισίων, δημιουργείται το επιπλέον κέρδος ενέργειας.

Ακόμη λόγω της απορροφητικότητας της οπίσθιας διαφανούς όψης του πλαισίου, εκτός από την άμεση ακτινοβολία πραγματοποιείται η εκμετάλλευση τόσο της διάχυτης όσο και της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Οπότε, ο στόχος των bifacial φωτοβολταϊκών στοιχείων, εκτός από τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας από την μπροστινή τους πλευρά, είναι η συλλογή του φωτός από το albedo, καθώς και του ανακλώμενου φωτός μέσω της οπίσθιας όψης τους [40].

Για το λόγο αυτό, πρέπει οι συνθήκες σχεδίασης να εξασφαλίζουν αρκετά μεγάλη ανακλαστικότητα, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από την πίσω πλευρά του πλαισίου.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ένας πολύ σημαντικός συντελεστής για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως, ο οποίος εκφράζει το λόγο της απόδοσης της πίσω όψης προς την απόδοση της μπροστινής και συμβολίζεται ως bifaciality factor, ϕ .



Εικόνα 3.2: Λειτουργία φωτοβολταϊκού διπλής όψης [41]

3.3 Είδη Τεχνολογιών Bifacial φωτοβολταϊκών

Με την πάροδο των ετών και την αύξηση των απαιτήσεων για καλύτερη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως προαναφέρθηκε, δημιουργήθηκαν τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως.

Η βασική δομή των bifacial φωτοβολταϊκών απαρτίζεται από το πολύ λεπτό στρώμα των ημιαγωγών (semiconductor wafer), τον πομπό (emitter), το πεδίο πίσω επιφανείας (back surface field), τις αντανακλαστικές επικαλύψεις παθητικοποίησης (anti-reflective surface passivation coatings), καθώς και από τα μεταλλικά πλέγματα που το περιβάλλουν [40].

Το πυρίτιο ήταν το κύριο στοιχείο από το οποίο αποτελούνταν τα mono-facial φωτοβολταϊκά.

Η τεχνολογία των bifacial, στηρίζεται επίσης στο πυρίτιο και ακολουθεί πιο εξελιγμένες μορφές κυψελών. Ακολουθεί η παρουσίαση των πιο βασικών τεχνολογιών των bifacial φωτοβολταϊκών.

3.3.1.1 PERC+

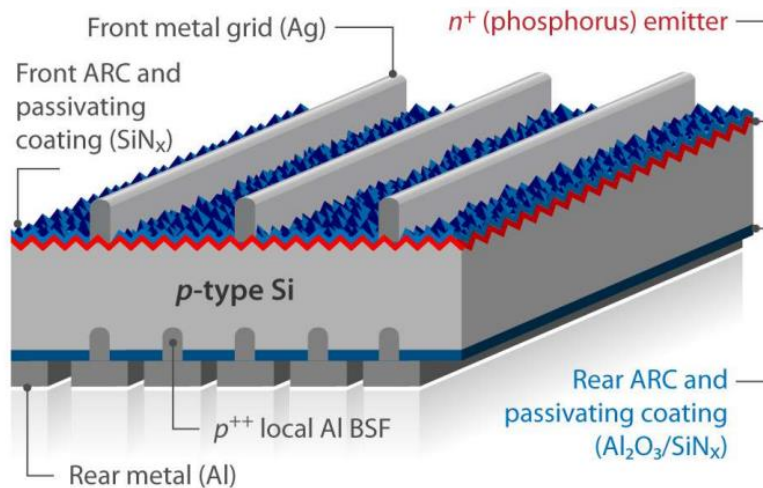
Η τεχνολογία PERC (passivated emitter and rear cell) εμφανίστηκε για πρώτη φορά στα Mono-facial φωτοβολταϊκά, ωστόσο η αποδοτικότητα της μπροστινής όψης έφτασε το ανώτερο της όριο, στα 22.5% [42]. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε η τεχνολογία PERC+ των bifacial φωτοβολταϊκών, ώστε να αυξηθεί η εξαγόμενη ισχύς με τη βοήθεια της πίσω όψης. Ο bifaciality factor της συγκεκριμένης τεχνολογίας αγγίζει το 80% [42].

Αναφορικά με τη δομή της τεχνολογίας κυττάρων PERC+, η μπροστινή τους πλευρά (n+ emitter region) παράγεται με διάχυση POCl_3 σε κλίβανο σωλήνων και η παθητικοποίησή της, πραγματοποιείται με διηλεκτρικό στρώμα SiN_x , ώστε να μειώνονται τα φαινόμενα ανάκλασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [42]. Το παραπάνω διηλεκτρικό στρώμα προστίθεται και στις δύο πλευρές του πλαισίου ώστε να αυξηθεί η συνολική απορροφητικότητα καθώς και ο βαθμός απόδοσης.

Η τεχνολογία αυτή έχει σαν βάση το κρυσταλλικό πυρίτιο τύπου-p.

Έως και το έτος 2021, τα bifacial p-type PERC+, απέκτησαν τιμές βαθμού απόδοσης μέχρι και 24.1%, ενώ εξελίσσονται διαρκώς [42].

Σημειώνεται ότι για το έτος 2017, η συγκεκριμένη τεχνολογία εκπροσωπούσε το 65% της αγοράς των φωτοβολταϊκών διπλής όψεως [40], ενώ το 2020 η ισχύς τους ξεπέρασε τα 500Wp [35].



Εικόνα 3.3: Bifacial p-type PERC+ [42]

3.3.1.2 n-PERT

Οι ηλιακές κυψέλες τύπου-p παρουσιάζουν διάφορα μειονεκτήματα, όπως η χαμηλή διάρκεια ζωής του πυριτίου τους [42].

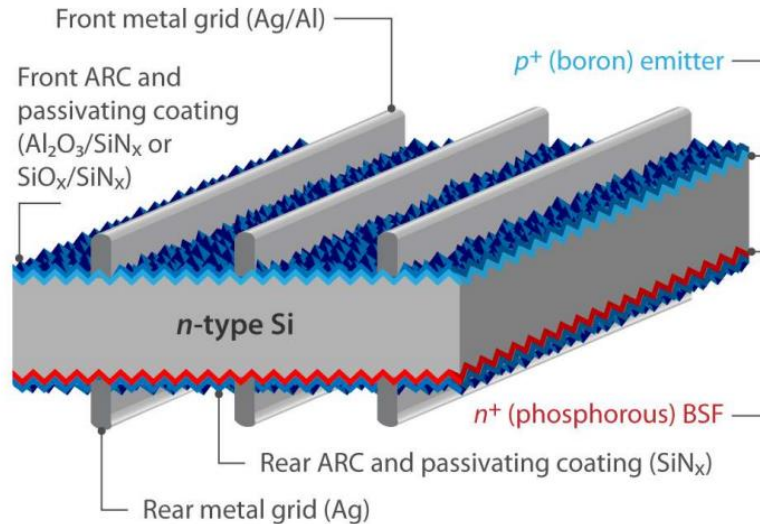
Έτσι, δημιουργήθηκαν και άλλες τεχνολογίες, όπως η n-PERT (passivated emitter rear totally diffused), η οποία παρουσιάζει bifaciality factor κοντά στο 90%, ενώ η απόδοσή τους είναι κοντά στο 22% [40].

Όπως αναφέρεται και στο όνομά τους, τα κύτταρα αυτού του είδους αποτελούνται από κρυσταλλικό πυρίτιο τύπου-n.

Στην μπροστινή τους πλευρά, υπάρχει λεπτό στρώμα εκπομπού τύπου-p με εμπόισμό Βορίου [35], ενώ επίσης προστίθενται και διηλεκτρικά στρώματα όπως $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiN}_x$ ή $\text{SiO}_2 / \text{SiN}_x$ [42].

Στην οπίσθια επιφάνεια υπάρχει η προσθήκη n+ φωσφόρου και είναι παθητικοποιημένη με διηλεκτρικό στρώμα SiN_x πάχους κοντά στα 80nm [42].

Πραγματοποιούνται συνεχώς καινούριες πανεπιστημιακές έρευνες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας, στις οποίες εξετάζεται η αλλαγή των υλικών επιφανειακά, ώστε να αυξηθεί η απορροφητικότητα του πλαισίου.



Εικόνα 3.4: Bifacial n-PERT [42]

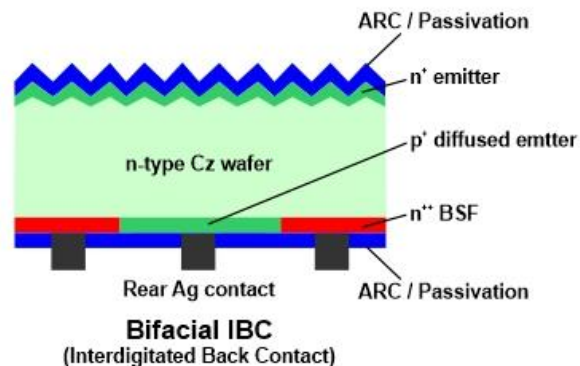
3.3.1.3 IBC

Η τεχνολογία IBC (Interdigitated Back Contact Cells), είναι από τις πιο πρόσφατες στο χώρο των φωτοβολταϊκών διπλής όψης.

Τοποθετεί μεταλλικά πλέγματα μόνο στην οπίσθια όψη των πλαισίων, ενώ έχει και αυτή σαν βάση το κρυσταλλικό πυρίτιο.

Με την τοποθέτηση όλων των μεταλλικών επαφών στην πίσω όψη, αυξάνεται η αποδοτικότητα, καθώς μειώνονται οι απώλειες λόγω σκίασης [43]. Με βάση αυτή τη δομή, τα ζεύγη των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται από το προσπίπτον φως στη μπροστινή επιφάνεια, συλλέγονται τελικά από την οπίσθια επιφάνεια της κυψέλης, μέσω της χρησιμοποίησης πολύ λεπτού ηλιακού στοιχείου [43].

Παρουσιάζει αυξημένη αποδοτικότητα με τις τιμές της να ξεπερνούν το 26% [40], ενώ ο bifaciality factor της είναι κοντά στο 83% [36].



Εικόνα 3.5: nIBC Bifacial Cell [32]

3.4 Παράγοντες σχεδίασης

Ακολουθεί η παρουσίαση των σημαντικότερων παραγόντων σχεδίασης που αφορούν τα συστήματα φωτοβολταϊκών διπλής όψεως.

3.4.1.1 Albedo

Το albedo είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας από την οπίσθια όψη των bifacial φωτοβολταϊκών στοιχείων [44]. Ορίζεται, ως ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε μια επιφάνεια [35] και εκφράζεται σαν ποσοστό. Όσο υψηλότερη η ανακλαστικότητα του εδάφους τόσο υψηλότερο και το albedo.

Μεταβάλλεται διαρκώς μέσα στο έτος, καθώς οι τιμές του εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, τη θέση του ηλίου, το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του χρόνου.

Τα παραπάνω επηρεάζουν και τις επιφανειακές συνθήκες. Είναι πολύ σημαντικό να ανακλάται το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό που προσπίπτει στο έδαφος, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη απορρόφηση από την οπίσθια όψη του πλαισίου.

Ξηρές επιφάνειες ανακλούν περισσότερο την ηλιακή ακτινοβολία από τις υγρές, ενώ η ξηρή βλάστηση παρουσιάζει υψηλότερο albedo από την πράσινη. Επίσης, περιοχές με υψηλή χιονόπτωση λαμβάνουν αυξημένες τιμές του albedo.

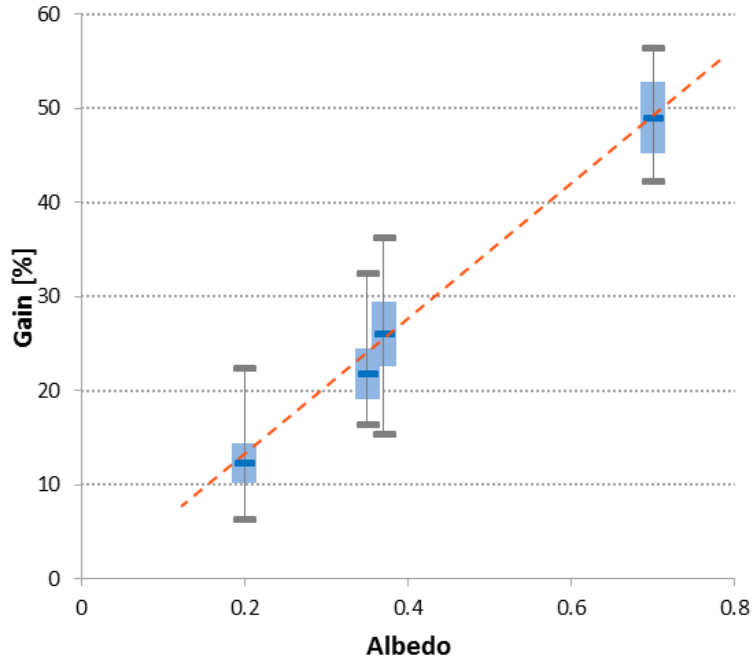
Η μέτρηση του albedo πραγματοποιείται με το αλμπεντόμετρο.

Ακολουθούν, στην **Εικόνα 3.6** οι τυπικές τιμές του albedo για τις διάφορες επιφάνειες του εδάφους.

Surface	Albedo
Grass	0.15 to 0.26
Snow	0.55 to 0.98
Black soil	0.08 to 0.13
Clay soil	0.16 to 0.23
Sand	0.21 to 0.60
Asphalt pavement, new	0.09
Asphalt pavement, weathered	0.18

Εικόνα 3.6: Τιμές του albedo για διαφορετικές επιφάνειες [42]

Επίσης, στην **Εικόνα 3.7**, παρουσιάζεται το διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσεως των διαφόρων τιμών του albedo, όπου ως Bifacial Gain ορίζεται την επιπρόσθετη ενέργεια που παράγεται από ένα bifacial φωτοβολταϊκό σύστημα σε σχέση με ένα monofacial, υπό τις ίδιες συνθήκες σχεδίασης [42].



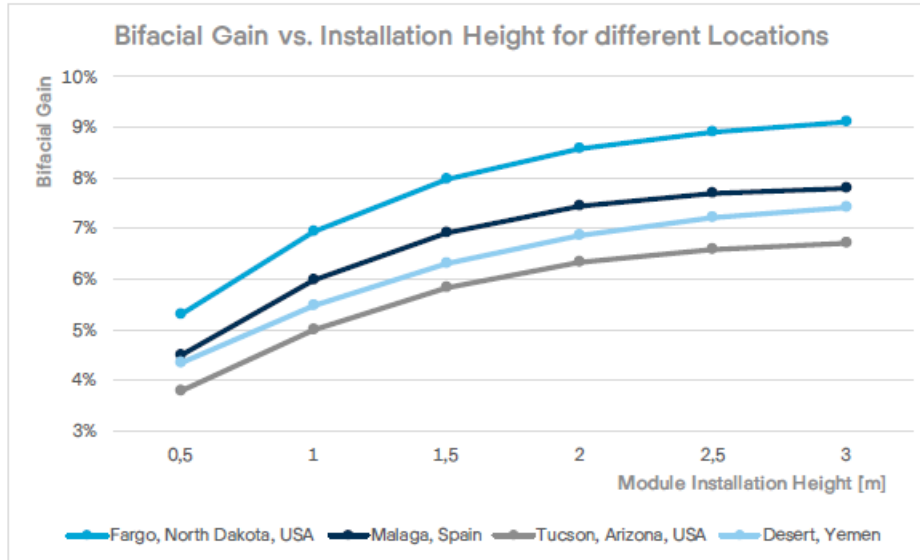
Εικόνα 3.7: Μέτρηση bifacial gain ενός bifacial φωτοβολταϊκού σε διαφορετικές επιφάνειες [45]

3.4.1.2 Ανύψωση από το έδαφος

Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το Bifacial Gain των πλαισίων είναι η ανύψωσή τους πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία αντιστοιχεί στην απόσταση του χαμηλότερου τους σημείου από το έδαφος.

Για να επιτυγχάνεται ικανοποιητικό κέρδος, λόγω της οπίσθιας όψης, είναι πολύ σημαντικό η παραπάνω απόσταση να είναι επαρκής, ώστε να ανακλάται η μέγιστη δυνατή, με βάση τις υπάρχουσες συνθήκες, ηλιακή ακτινοβολία σε όλη την επιφάνεια των πλαισίων.

Παρόλο που το bifacial gain αυξάνεται με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.8**, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στο πόσο υψηλή θα είναι η ανύψωση των πλαισίων, καθώς ανάλογα με τις συνθήκες της εκάστοτε εγκατάστασης μετά από συγκεκριμένη τιμή του ύψους, το bifacial gain φθίνει.



Εικόνα 3.8: Μεταβολή Bifacial gain με βάση το ύψος του φωτοβολταϊκού για διαφορετικές τοποθεσίες [46]

Επιπλέον, το έδαφος, στο οποίο είναι στραμμένη η πίσω πλευρά των φωτοβολταϊκών, παρουσιάζει διάφορες ιδιομορφίες και ως αποτέλεσμα δημιουργούνται διάφορα φαινόμενα σκίασης και ανομοιογένειας που οδηγούν σε απώλειες του συστήματος [42].

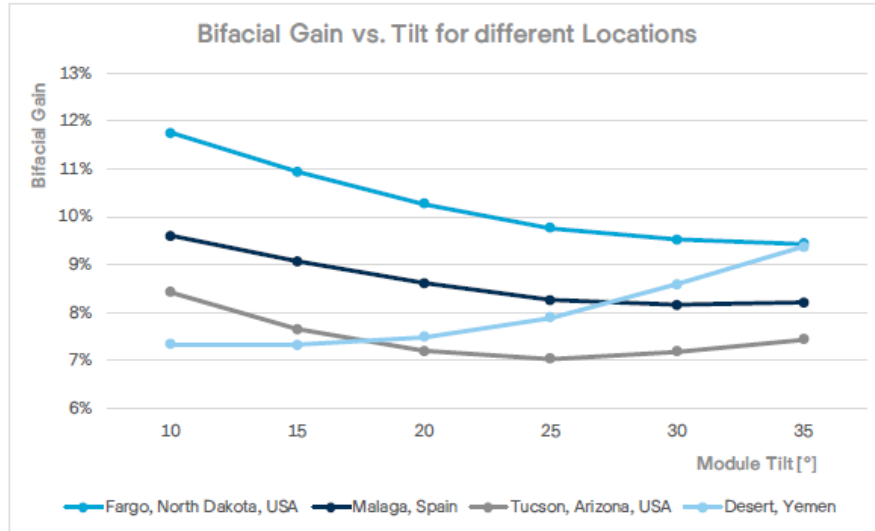
Έτσι, το φως δεν προσπίπτει ομοιόμορφα στην οπίσθια όψη των πλαισίων και ειδικότερα στην περίπτωση χαμηλού ύψους τοποθέτησης [44]. Είναι καίριας σημασίας λοιπόν, η ανύψωση των φωτοβολταϊκών, ώστε να μειωθεί σε ένα βαθμό αυτή η ανομοιογένεια και να απορροφάται στο ίδιο ποσοστό η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από όλα τα κελιά [44].

3.4.1.3 Γεωγραφικό Πλάτος / Κλίση Πλαισίων

Γενικότερα, με βάση διάφορες μελέτες, η αύξηση της κλίσης της γωνίας των πλαισίων μέχρι ενός ορίου, αυξάνει και το κέρδος ενέργειας λόγω της οπίσθιας όψης, καθώς προσπίπτει όλο και περισσότερη ανακλώμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών.

Ιδιαίτερη αύξηση στη γωνία τοποθέτησης των πλαισίων παρατηρείται σε περιοχές με υψηλό γεωγραφικό πλάτος, στις οποίες τα πάνελ τοποθετούνται στραμμένα προς το Νότο και φτάνουν σε τιμές γωνιών έως και 45 μοιρών [47].

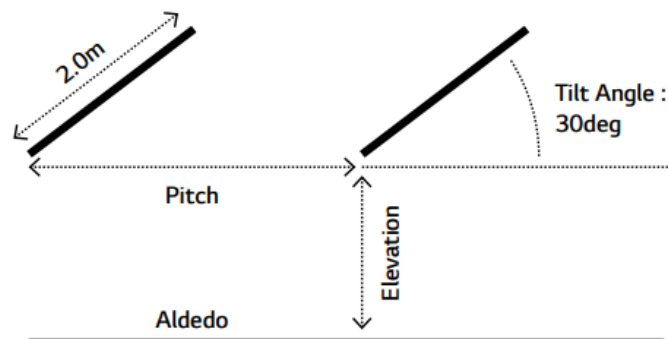
Οι αυξημένες τιμές των γωνιών τοποθέτησης σε αυτές τις περιοχές οφείλονται στην ανάγκη της λήψης όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ηλιακής ακτινοβολίας, επιτυγχάνοντας έτσι την κάθετη προέκταση στην επιφάνεια του εδάφους σε σχέση με τον ήλιο [35].



Εικόνα 3.9: Μεταβολή Bifacial gain με βάση την κλίση του φωτοβολταϊκού για διαφορετικές τοποθεσίες [46]

3.4.1.4 Αξονική Απόσταση (Pitch)

Η αξονική απόσταση (Pitch), είναι ο τελευταίος παράγοντας σχεδίασης που θα παρουσιαστεί. Ορίζεται, ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών συστοιχιών (arrays), όπως φαίνεται και σχηματικά στην **Εικόνα 3.10**.



Εικόνα 3.10: Ορισμός αξονικής απόστασης (pitch) [44]

Όσο αυξάνεται η αξονική απόσταση ανάμεσα στις συστοιχίες, μειώνονται τα φαινόμενα σκίασης και συνεπώς αυξάνεται η συνολική παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθώς θα ανακλάται όλο και μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας στην οπίσθια πλευρά των πλαισίων [35].

Όμως, πάντα η τοποθέτηση των πλαισίων θα πρέπει να γίνεται με γνώμονα τον διαθέσιμο χώρο.

Για παράδειγμα, μία πιθανή αύξηση της γωνίας τοποθέτησης των πλαισίων, θα οδηγούσε σε αύξηση της αξονικής τους απόστασης. Αυτό όμως θα είχε σαν πιθανό αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των φωτοβολταϊκών στο χώρο και συνεπώς τη μείωση της προβλεπόμενης παραγωγής.

Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός ενός φωτοβολταϊκού πάρκου έχει πολλές συνιστώσες και χρειάζεται η εξέταση όλων των επιλογών, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή εγκατάσταση υπό τις υπάρχουσες συνθήκες. Έτσι, θα πρέπει να υπολογίζεται κατάλληλα η απόσταση μεταξύ των φωτοβολταϊκών ώστε να αποφεύγονται τα φαινόμενα σκίασης, αλλά και να τοποθετούνται όσο το δυνατόν περισσότερα πλαίσια ανάλογα πάντα με τις ανάγκες για παραγωγή ενέργειας.

Επίσης, το pitch σχετίζεται άμεσα με το Ground Coverage Ratio (GCR), το οποίο εκφράζει το λόγο κάλυψης του εδάφους (**Σχέση 3.1**) [44]:

$$\text{GCR} = \frac{\text{module area}}{\text{ground area}} \quad (3.1)$$

Σημειώνεται, ότι αυξάνοντας το pitch μειώνεται το GCR, καθώς αυξάνεται το ground area, με βάση την παραπάνω σχέση.

3.5 Πλεονεκτήματα των bifacial έναντι των monofacial φωτοβολταϊκών

Τα bifacial φωτοβολταϊκά, παρουσιάζουν την ίδια απόδοση στην μπροστινή πλευρά με τα monofacial, έχοντας το επιπλέον κέρδος ενέργειας, λόγω της απορρόφησης της ακτινοβολίας από την οπίσθια όψη τους [40], το οποίο τους προσδίδει κέρδος κοντά στο 20% [42].

Αυτή είναι και η κύρια διαφορά ανάμεσα στα δύο είδη φωτοβολταϊκών.

Η δυνατότητα αυτή των bifacial, οδηγεί στη μείωση του LCOE (ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας), σε σχέση με τα monofacial φωτοβολταϊκά [42], καθώς και στην εξοικονόμηση χώρου, για την παραγωγή ίδιας ενέργειας. Επίσης, λόγω της δυνατότητας απορρόφησης της οπίσθιας όψης, αξιοποιείται και η διάχυτη ακτινοβολία σε περιπτώσεις κακοκαιρίας, γεγονός που αυξάνει την παραγωγή υπό αυτές τις συνθήκες [35].

Επιπλέον, τα bifacial, λόγω της κατασκευής τους, έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασης σε τοποθεσίες όπου δεν είναι εφικτή η εγκατάσταση των monofacial φωτοβολταϊκών [42].

Για παράδειγμα, μόνο τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως μπορούν να εγκατασταθούν κατακόρυφα, μειώνοντας έτσι τις απώλειες λόγω ρύπανσης (soiling losses) και συνεπώς την απαιτούμενη ποσότητα του νερού καθαρισμού [42].

Έτσι θεωρούνται κατάλληλα για τοποθέτηση στις ερήμους, όπου τα soiling losses είναι αρκετά υψηλά, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη παραγωγή ενέργειας υπό αντίξοες συνθήκες [42].

Επίσης, λόγω της διαφανούς (γυάλινης) οπίσθιας επιφάνειάς τους, τα bifacial παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά τη λειτουργία τους, έναντι των monofacial, τα οποία απορροφούν μεγαλύτερα ποσοστά υπέρυθρης ακτινοβολίας, λόγω της αλουμινένιας κατασκευής της αντίστοιχης πλευράς τους [40].

Ακόμη, η γυάλινη οπίσθια επιφάνεια των φωτοβολταϊκών διπλής όψης, τους προσδίδει υψηλότερη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις [35], καθώς και αντιδιαβρωτική προστασία [48].

Προβλέπεται λοιπόν, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, θα παράγουν περισσότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης διάρκειας ζωής τους, μειώνοντας έτσι και τα λειτουργικά κόστη [40].

4. Παραμετρική μελέτη φωτοβολταϊκού πάρκου

4.1 Λογισμικό Προσομοίωσης - PVsyst

Το PVsyst είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό υπολογιστή, το οποίο ειδικεύεται στη μελέτη, τη διαστασιολόγηση και την ανάλυση δεδομένων φωτοβολταϊκών πάρκων. Υπολογίζει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για πάρκο συγκεκριμένης τοποθεσίας, με βάση τις συνθήκες και την απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία.

Έχει σχεδιαστεί με βάση τις ανάγκες αρχιτεκτόνων, μηχανικών και ερευνητών, ενώ παράλληλα είναι χρήσιμο και για επαγγελματική κατάρτιση [49].

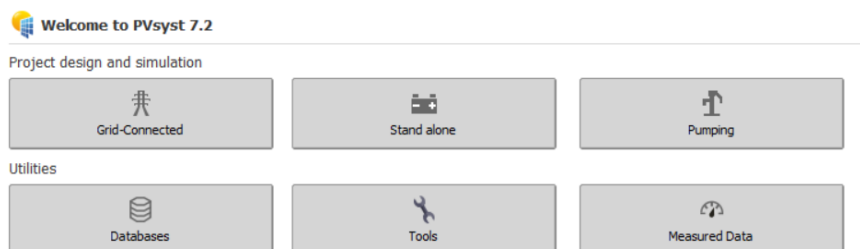
Προσφέρει δύο είδη μοντελοποίησης:

- Preliminary design: το οποίο αποτελεί εργαλείο ταχείας εκτίμησης
- Project design: συνολική μελέτη με βάση ποικίλες παραμέτρους και διαφορετικές συνθήκες για όσο το δυνατόν πιο ακριβή και λεπτομερή συμπεράσματα

Τα συστήματα που μπορούν να μοντελοποιηθούν είναι τα εξής:

- Grid connected Systems: το πιο διαδεδομένο εργαλείο προσομοίωσης, στο οποίο μοντελοποιούνται η μετατροπή και οι απώλειες της ενέργειας και εξάγονται αποτελέσματα σχετικά με την παραγωγή ενέργειας, το βαθμό απόδοσης και την οικονομική μελέτη του συστήματος
- Stand-alone Systems: στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται μπαταρίες ή γεννήτριες για την αντικατάσταση του δικτύου και πραγματοποιείται η σχεδίαση αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων
- Pumping Systems: πραγματοποιείται η εκτίμηση της ισχύος των αντλιών και γίνεται η κατάλληλη διαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών με βάση τις ανάγκες ύδατος
- DC grid

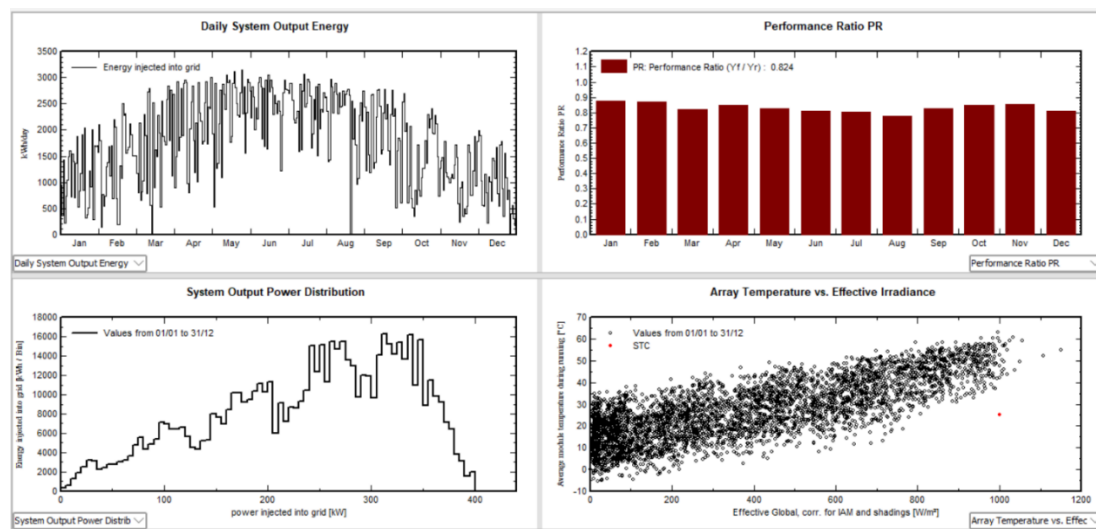
Στην **Εικόνα 4.1** παρουσιάζονται τα συστήματα μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού:



Εικόνα 4.1: Συστήματα μοντελοποίησης [49]

Το PVsyst έχει σαν κύριες δυνατότητες:

- το System design: το οποίο παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα ώστε να ξεκινήσει ο σχεδιασμός του συστήματος
- το System sizing: το οποίο αφορά τη διαστασιολόγηση των συστημάτων και μας παρέχει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος και τους περιορισμούς του συστήματος
- τις προσομοιώσεις, τις αναφορές και την οικονομική αξιολόγηση: όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.2**, γίνεται επισκόπηση των διαφόρων επιπέδων ενέργειας του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, ώστε να παρουσιαστεί αναλυτικά η λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η παραγόμενη ενέργεια, ο λόγος της παραγόμενης προς τη θεωρητικά παραγόμενη ενέργεια (Performance Ratio), η ισχύς που διοχετεύεται στο δίκτυο, καθώς και η θερμοκρασία των πλαισίων συναρτήσει της ακτινοβολίας.



Εικόνα 4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων από την Προσομοίωση [49]

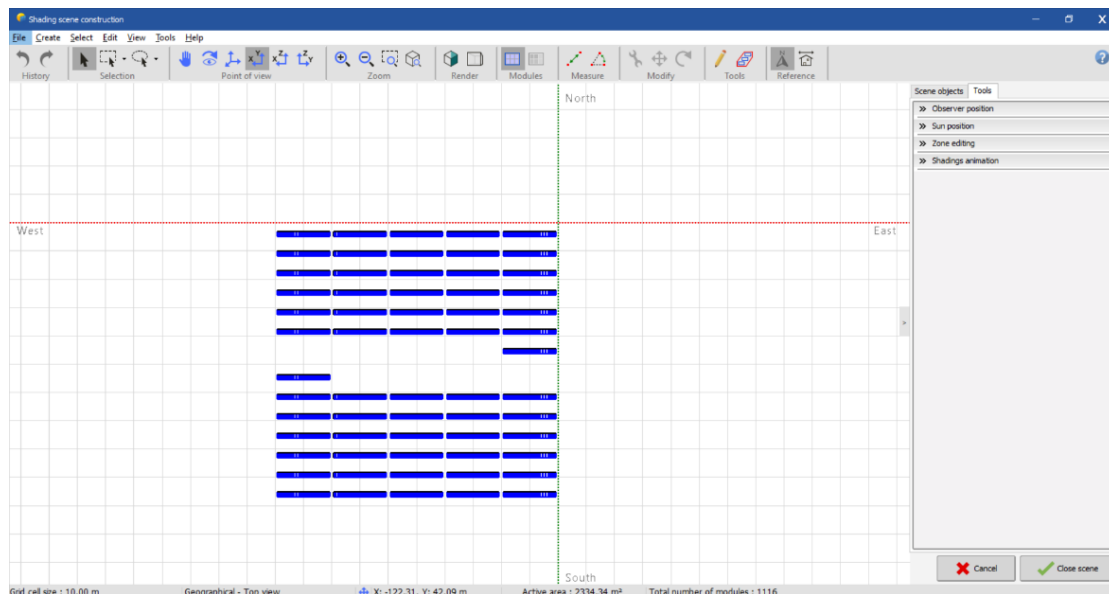
Πέρα από τα παραπάνω, το PVsyst διαθέτει διάφορες βάσεις δεδομένων:

- τις Meteo Databases, που σχετίζονται με όλα τα μετεωρολογικά και γεωγραφικά δεδομένα των διάφορων τοποθεσιών, τα οποία εισάγονται από επιλεγμένες πηγές όπως το Meteororm 8.0
- και τις Component Databases, οι οποίες διαχειρίζονται όλα τα δεδομένα των κατασκευαστών, αλλά και των διάφορων εξαρτημάτων (φωτοβολταϊκών, μετατροπών, αντλιών κλπ.) [49]

Τέλος, υπάρχουν τα βοηθητικά προγράμματα:

- Tools: εμπεριέχονται οι διάφοροι πίνακες και τα γραφήματα που αφορούν τα δεδομένα του καιρού, της συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών, της ηλιακής ακτινοβολίας, των σκιάσεων κλπ.
- Measured Data: αναφέρεται στην ανάλυση των διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος και στον εντοπισμό πιθανών σφαλμάτων, παρέχοντας τους απαραίτητους πίνακες και τα γραφήματα που σχετίζονται με την απόδοση του εγκαταστημένου πάρκου [49]

Σημειώνεται ότι το λογισμικό, δίνει τη δυνατότητα να σχεδιαστεί το φωτοβολταϊκό πάρκο σε 3D design, που θα μελετηθεί, ώστε να υπολογιστούν οι απώλειες λόγω σκίασης από κοντινά αντικείμενα, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.3** παρακάτω.



Εικόνα 4.3: 3D Απεικόνιση φωτοβολταϊκού πάρκου [49]

4.2 Περιγραφή μελέτης

Ξεκινώντας τη μοντελοποίηση μέσω του λογισμικού PVsyst7.2, θεωρείται φωτοβολταϊκό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 450kWp (10 στρεμμάτων) στην Αιανή της Κοζάνης και στη Βεστερός της Σουηδίας. Οι επιλογές των τοποθεσιών, έγιναν λόγω των διαφορετικών κλιμάτων που επικρατούν, ενώ το Φ/Β πάρκο και το Φ/Β πλαίσιο θεωρούνται κοινά και για τις δύο τοποθεσίες.

Η παραμετρική μελέτη, θα αφορά κυρίως τη σύγκριση ανάμεσα στα Φ/Β μονής και στα Φ/Β διπλής όψης (bifacial) ίδιας ισχύος. Οπότε, μέσα από το λογισμικό του PVsyst, θα υπολογιστεί η ετήσια παραγόμενη ενέργεια, το bifacial gain και η ειδική ενέργεια (αναλογία της συνολικής ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και της εγκατεστημένης ηλιακής ισχύος), για κάθε μήνα και ετήσια, για μεταβλητό albedo, για διαφορετικές συνθήκες σχεδιασμού, ώστε να φανεί η διαφορά στο κέρδος της πίσω πλευράς σε σχέση με τα Φ/Β μονής όψης [44]. Η μελέτη αφορά πάρκο σταθερών βάσεων στήριξης (Fixed Tilted Plane) αλλά και πάρκο με Tracking (Single Axis Tracking) σε 1P σχεδίαση (τοποθέτηση Φ/Β πλαισίου με τη μικρή πλευρά του παράλληλη στο έδαφος) και οι παράμετροι που θα μεταβάλλονται είναι η κλίση της γωνίας και το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους [35].

4.3 Επιλογή Φωτοβολταϊκού πλαισίου και inverter

Για τις δύο αυτές τοποθεσίες, μέσα από τις διαθέσιμες επιλογές του προγράμματος και με σκοπό την κάλυψη των αναγκών του πάρκου εγκατεστημένης ισχύος 450kWp, επιλέγεται το Bifacial Φ/Β πλαίσιο της εταιρίας Trina, 'Trina TSM-400DEG15HC.20(II)' ισχύος 400Wp, τεχνολογίας Mono-Si Half Cell [50].

Σημειώνεται ότι για τα Φ/Β μονής όψης, θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο Φ/Β πλαίσιο, όπου μέσα από το πρόγραμμα επιλέγεται να μην χρησιμοποιείται η πίσω πλευρά για απορρόφηση ακτινοβολίας [35].

Στη συνέχεια, γίνεται η επιλογή κατάλληλου inverter της εταιρίας Bosch, όπου από τους διαθέσιμους επιλέγεται ο 'BoschBPT-C200', ισχύος 200kW [51]. Για την κάλυψη των αναγκών θα τοποθετηθούν δύο ίδιοι inverter.

Τέλος, συνδυάζοντας τις παραπάνω επιλογές και τις απαιτήσεις της εγκατάστασης, για να γίνει εκμετάλλευση του μέγιστου δυνατού αριθμού Φ/Β πλαισίων, επιλέγεται το πάρκο να αποτελείται από 62 σειρές Φ/Β και από 18 Φ/Β ανά σειρά, άρα συνολικά από 1116 Φ/Β πλαίσια. Ακολουθεί, στην **Εικόνα 4.4**, η ενδεικτική παρουσίαση των παραπάνω χαρακτηριστικών μέσα από το περιβάλλον του PVsyst.

The screenshot displays the PVsyst software interface for configuring a photovoltaic system. The main configuration area is titled 'Sub-array' and includes the following sections:

- Sub-array name and Orientation:** Name: PV Array, Tilt: 25°, Azimuth: 0°.
- Pre-sizing Help:** Enter planned power: 450.0 kWp, or available area/modules: 2310 m².
- Select the PV module:** Trina Solar, 400 Wp 34V, Si-mono, TSM-DEG15HC-20-(II)-400-Bif. Sizing voltages: Vmp (60°C) 35.7 V, Voc (-10°C) 54.7 V.
- Select the inverter:** Bosch Power Tec GmbH, 200 kW, 530-800 V, TL, 50 Hz, BPT-C-200. Nb. of inverters: 2. Operating voltage: 530-800 V, Global Inverter's power: 400 kWac, Input maximum voltage: 1000 V.
- Design the array:** Number of modules and strings: Mod. in series: 18, Nb. strings: 62. Operating conditions: Vmp (60°C) 643 V, Vmp (20°C) 748 V, Voc (-10°C) 985 V. Plane irradiance: 1000 W/m². Max. operating power (at 1000 W/m² and 50°C): 407 kW. Array nom. Power (STC): 446 kWp.

The 'List of subarrays' table shows the following data:

Name	#Mod	#Inv.	#String	#MPPT
PV Array				
Trina Solar - TSM-DEG15HC-20...	18		62	
Bosch Power Tec GmbH - BPT-...	2		1	

The 'Global system summary' table shows the following data:

Nb. of modules	1116
Module area	2292 m²
Nb. of inverters	2
Nominal PV Power	446 kWp
Maximum PV Power	433 kWDC
Nominal AC Power	400 kWAC
Prom ratio	1.116

Εικόνα 4.4: Παρουσίαση χαρακτηριστικών ηλεκτρικού εξοπλισμού Φ/Β πάρκου [49]

4.4 Αιανή Κοζάνης

Η περιοχή της Αιανής Κοζάνης, βρίσκεται σε υψόμετρο 443 μέτρων και χαρακτηρίζεται από έντονο ηλιακό δυναμικό και χιονοπτώσεις κατά τους χειμερινούς μήνες [52].

Αρχικά, από το PVsyst εξάγονται τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα, καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες της εγκατάστασης από το Meteoprom 8.0, όπου και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 και στην Εικόνα 4.5.

Πίνακας 4.1: Γεωγραφικά Δεδομένα, Αιανή Κοζάνης [49]

Γεωγραφικό Πλάτος	40.1638°
Γεωγραφικό Μήκος	21.8195°

	Global horizontal irradiation kWh/m ² /mth	Horizontal diffuse irradiation kWh/m ² /mth	Temperature °C	Wind Velocity m/s	Linke turbidity [-]	Relative humidity %
January	59.5	28.6	3.3	1.90	2.771	72.1
February	74.6	34.9	5.1	2.10	3.081	69.1
March	121.0	57.0	9.1	1.99	3.638	60.1
April	154.7	68.8	13.1	1.60	4.389	62.5
May	198.6	77.3	18.0	1.51	4.152	60.9
June	211.9	75.2	22.4	1.69	3.816	54.0
July	212.8	79.2	25.9	1.89	3.851	46.2
August	191.2	67.9	25.6	1.59	3.860	47.6
September	137.5	56.3	19.9	1.59	3.716	56.6
October	94.9	43.5	14.7	1.39	3.363	66.5
November	60.4	32.9	9.1	1.50	3.068	74.5
December	51.3	25.5	4.6	1.99	2.831	72.7
Year	1568.4	647.1	14.2	1.7	3.545	61.9

Εικόνα 4.5: Πίνακας Μηνιαίων Μετεωρολογικών Δεδομένων για την Αιανή της Κοζάνης [49]

4.4.1.1 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού πάρκου για σύστημα με σταθερές βάσεις στήριξης

Όπως προαναφέρθηκε, θα σχεδιαστούν δύο φωτοβολταϊκά πάρκα, ένα για σταθερές βάσεις στήριξης και ένα με εγκατάσταση περιστρεφόμενων φωτοβολταϊκών.

Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση (Fixed Tilted Plane), η προσομοίωση θα γίνει για μεταβλητό μηνιαίο Albedo, για μεταβολή του ύψους από την επιφάνεια του εδάφους και της κλίσης της γωνίας τοποθέτησης.

Πιο συγκεκριμένα, η γωνία τοποθέτησης θα λάβει τις τιμές των 25, 35 και 45 μοιρών για σταθερό ύψος στα 0.5 μέτρα πάνω από το έδαφος.

Η ανύψωση από το έδαφος θα γίνει, για 0.5, 1 και 1.5m για γωνία τοποθέτησης 25 μοιρών [53]. Σημειώνεται ότι η γωνία του αζιμούθιου θα είναι μηδενική, οπότε ο προσανατολισμός των πλαισίων θα είναι προς το Νότο, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας [54].

Ακολουθεί ο Πίνακας 4.2 με τις μηνιαίες τιμές του Albedo:

Πίνακας 4.2: Μηνιαίες Τιμές Albedo [35]

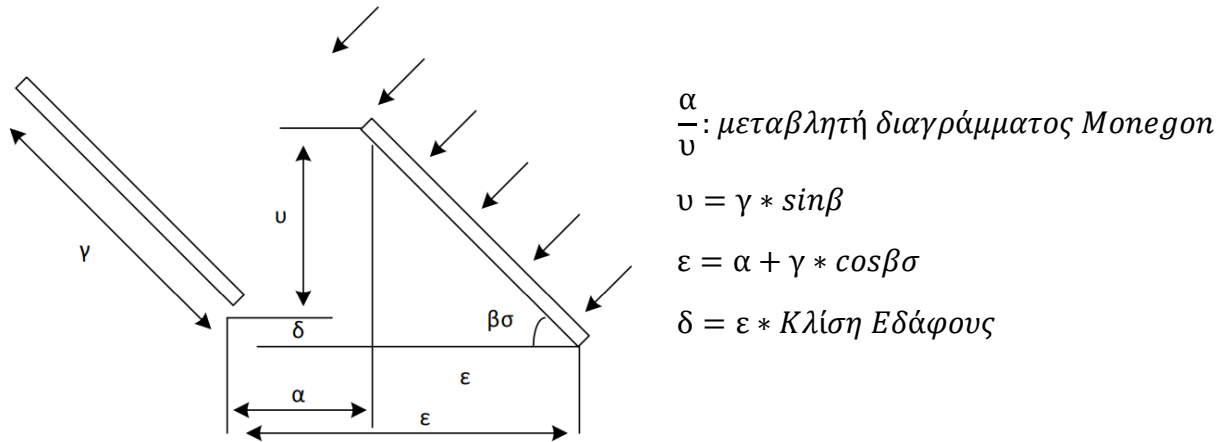
Ιαν.	Φεβ.	Μαρτ.	Απρ.	Μάιος	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Οκτ.	Νοεμ.	Δεκ.
0.9	0.7	0.25	0.2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25	0.25	0.7

Το Φ/Β πάρκο θα έχει εγκατεστημένη ισχύ 450kWp, διαθέσιμο χώρο 10000m² και σύνολο 1116 Φ/Β πλαίσια. Οπότε, απομένει να προσδιοριστεί η αξονική τους απόσταση. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται η σχέση που διέπει το διάγραμμα Moneron (**Σχέση 4.1**), ώστε να αποφευχθούν τα φαινόμενα σκίασης. Οι ορισμοί των συμβόλων φαίνονται στην **Εικόνα 4.6**.

$$\frac{\alpha}{\nu} = 4.2 * 10^{-3} * \varphi^2 - 0.1661 * \varphi + 2.8652 \quad (4.1)$$

Όπου:

- φ το γεωγραφικό πλάτος
- α η απόσταση μεταξύ των πλαισίων
- ν το ύψος της προβολής των πλαισίων στο οριζόντιο επίπεδο



Εικόνα 4.6: Απεικόνιση των μεγεθών του Φ/Β πλαισίου [61]

Θεωρώντας, ότι δεν υπάρχουν σκιάσεις από εξωτερικούς παράγοντες (δέντρα, βουνά, κλπ.) και αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση $\varphi = 40.1638^\circ$, για την γωνία των 45° , στην οποία και παρατηρείται η μεγαλύτερη δυνατή σκίαση, υπολογίζουμε:

$$\frac{\alpha}{u} = 4.2 * 10^{-3} * (40.1638)^2 - 0.1661 * 40.1638 + 2.8652 \Rightarrow$$

$$\frac{\alpha}{u} = 2.969142 \quad (1)$$

Από τον κατασκευαστή, η υποτεινούσα του τριγώνου που σχηματίζει το Φ/Β με το έδαφος, η οποία είναι και η μεγάλη του πλευρά, ισούται με **2.031m** οπότε υπολογίζεται:

$$\sin 45^\circ = \frac{u}{2.031} \Rightarrow u = 0.707106 * 2.031 \Rightarrow$$

$$u = 1.43613 \text{ m} \quad (2)$$

Οπότε από τις (1),(2) \Rightarrow

$$\alpha = u * 2.969142 \Rightarrow$$

$$\alpha = 1.43613 * 2.969142 \Rightarrow$$

$$\alpha = 1.43613 * 2.969142 \Rightarrow$$

$$\alpha = 4.264 \text{ m}$$

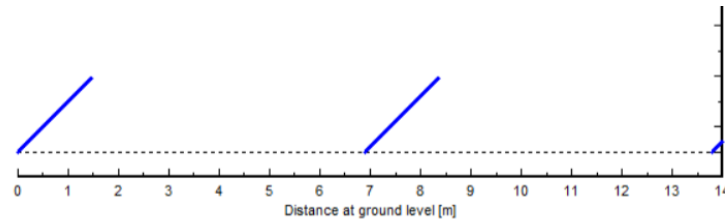
Λόγω της διαθέσιμης έκτασης, αλλά και για να αποφευχθούν πιθανές περιπτώσεις σφαλμάτων επιλέγεται συντελεστής ασφαλείας $\alpha = 5.4\text{m}$. Οπότε, με βάση τα παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση των κάτω άκρων δύο διαδοχικών στοιχειοσειρών (pitch) από τη **Σχέση 4.2** [35]:

$$\text{Αξονική Απόσταση} = \text{Pitch} = \alpha + 2.031 * \sin 45^\circ = \frac{v}{2.031} \Leftrightarrow \quad (4.2)$$

$$\text{Pitch} = 5.4 + 1.4361 \Leftrightarrow$$

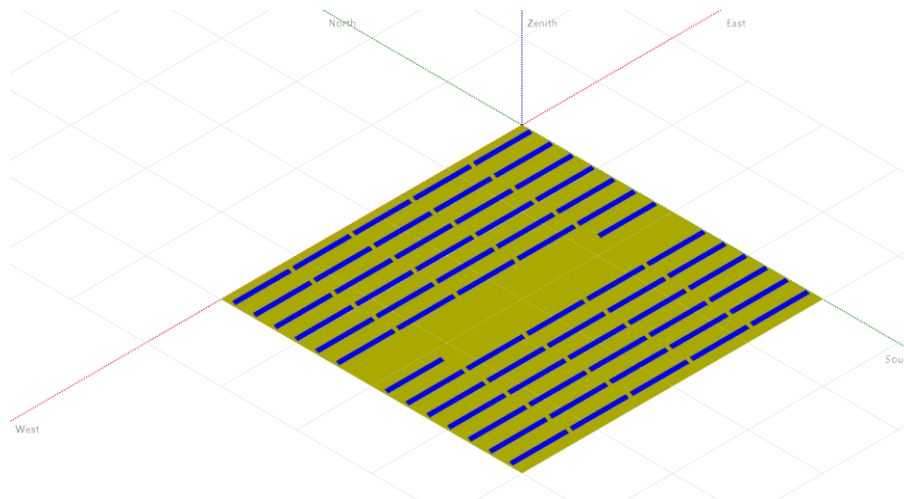
$$\text{Pitch} = 6.83 \text{ m}$$

Όπου, για λόγους ευκολίας στη σχεδίαση μέσα από το λογισμικό του PVsyst, επιλέγεται τελικά Pitch = 6.9m, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.7**:



Εικόνα 4.7: Αξονική Απόσταση Φ/Β πλαισίων [49]

Αφού υπολογίστηκε η απόσταση μεταξύ των στοιχειοσειρών των Φ/Β, μπορεί να σχεδιαστεί το Φ/Β πάρκο, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.8**, μέσα από το περιβάλλον του PVsyst:

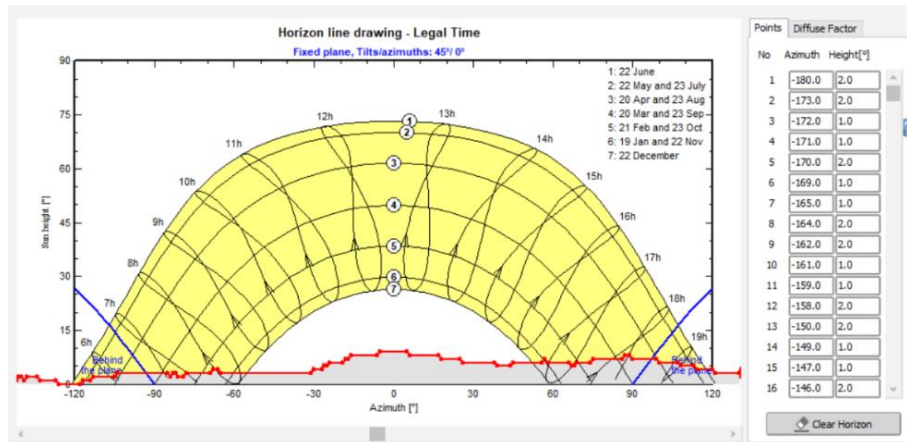


Εικόνα 4.8: Προσομοίωση Φ/Β πάρκου Σταθερών Βάσεων Στήριξης [49]

Με βάση τον παραπάνω σχεδιασμό, υπολογίζεται μέσα από το λογισμικό και το GCR (Σχέση 4.3) [44]:

$$\text{GCR} = \frac{\text{module area}}{\text{ground area}} = 29.4\% \quad (4.3)$$

Εκτός από τον σχεδιασμό του πάρκου, χρειάζεται να σχεδιαστεί και η γραμμή του ορίζοντα για την περιοχή της Αιανής, η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 4.9** και ορίζει τις σκιάσεις λόγω μακρινών αντικειμένων (**Far Shadings**).



Εικόνα 4.9: Γραμμή Ορίζοντα Αιανής [49]

Η γραμμή ορίζοντα, είναι μία διακεκομμένη γραμμή, η οποία υπερτίθεται στο διάγραμμα της διαδρομής του ήλιου λαμβάνοντας οποιοδήποτε αριθμό σημείων ύψους/αζιμουθίου [49].

Αφού προσδιορίστηκαν οι απώλειες λόγω σκίασης από μακρινά αντικείμενα, προσδιορίζονται και οι σκιάσεις που παράγονται από κοντινά αντικείμενα (**Near Shadings**), οι οποίες ορίζονται μέσα από τον 3D σχεδιασμό του Φ/Β πάρκου.

Τέλος, προσδιορίζονται οι διάφορες απώλειες (θερμικές, ωμικές, ηλεκτρικές κλπ.), μέσα από το πρόγραμμα, ώστε να ολοκληρωθεί η προσομοίωση της εγκατάστασης και να εξαχθούν τα απαραίτητα αποτελέσματα.

4.4.1.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης

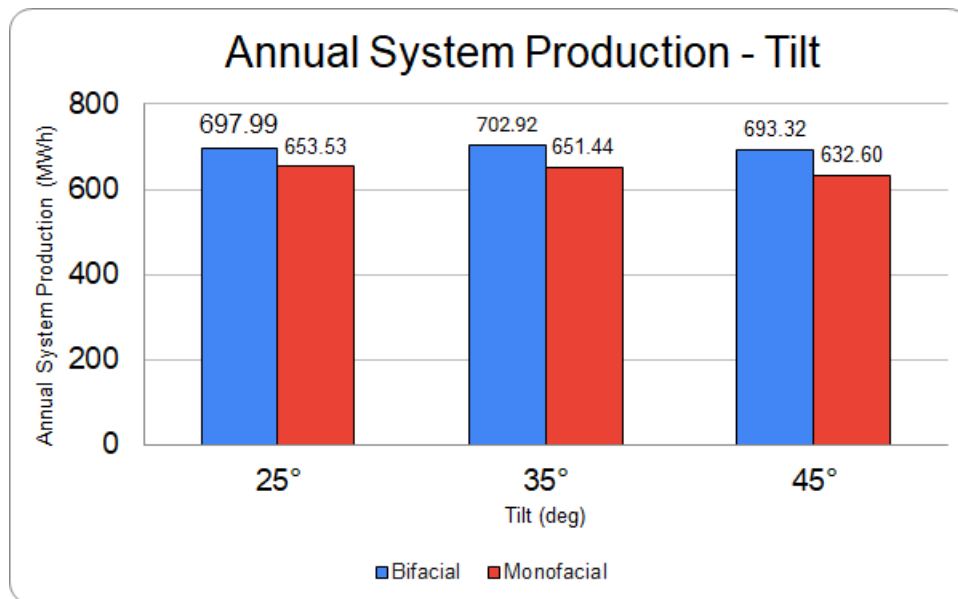
Όπως προαναφέρθηκε, τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν, είναι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια, το bifacial gain και η ειδική ενέργεια, για μεταβλητό albedo ανά μήνα και οι παράμετροι που θα μεταβάλλονται είναι η κλίση της γωνίας και το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους για μηδενικό αζιμουθίο.

Όσον αφορά τη γωνία τοποθέτησης, θα ληφθούν οι τιμές των 25 , 35 και 45 μοιρών για σταθερό ύψος στα 0.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, ώστε να υπολογιστεί για ποια γωνία εμφανίζεται η καλύτερη δυνατή παραγωγή ενέργειας. Στην συνέχεια, γίνεται σύγκριση της αντίστοιχης παραγωγής των bifacial με τα monofacial Φ/Β πλαίσια, ώστε να παρουσιαστεί το κέρδος ενέργειας λόγω της οπίσθιας όψης, ανάλογα με τις συνθήκες τοποθέτησης. Θα εξαχθούν

συνολικά 15 διαγράμματα με βάση τα αποτελέσματα από το Φ/Β πάρκο των bifacial και από το Φ/Β πάρκο των monofacial. Από τα παραπάνω, τα 14 θα παρουσιαστούν στο **Κεφάλαιο 5**.

Πιο συγκεκριμένα, μέσα από τα δεδομένα που λαμβάνονται από το PVsyst, θα δημιουργηθούν τρία διαγράμματα για κάθε γωνία τοποθέτησης, στα οποία παρουσιάζεται η παραγόμενη (System Production) και η ειδική ενέργεια (Specific Production) του συστήματος για κάθε μήνα, για τα δύο είδη των Φ/Β πλαισίων, αλλά και το μηνιαίο Bifacial Gain. Τέλος, δύο διαγράμματα για τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος-Φεβρουάριος) και άλλα δύο για τους υπόλοιπους μήνες (Μάρτιος-Νοέμβριος), για έναν μέσο όρο του albedo τιμών 0.76 και 0.24 αντίστοιχα. Έτσι, φαίνεται η παραγωγή του συστήματος και η ειδική ενέργεια συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης, για τα δύο είδη φωτοβολταϊκών, ενώ εισάγεται και το διάγραμμα του Bifacial Gain, συναρτήσει των μοιρών για τους παραπάνω μήνες.

Το εναπομείναν ενδεικτικό διάγραμμα, στο οποίο προβάλλεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει των μοιρών για τις δύο εγκαταστάσεις Φ/Β πάρκων, για την περιοχή της Αιανής, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.10**.



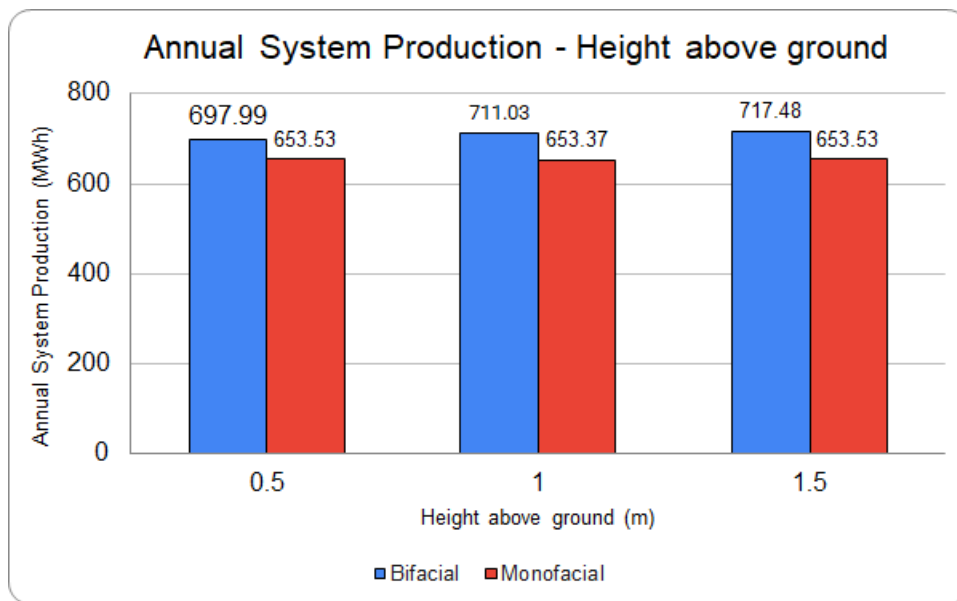
Εικόνα 4.10: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης για την Αιανή (Fixed Tilted Plane) [49]

4.4.1.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσει του ύψους από την επιφάνεια του εδάφους

Η ανύψωση των πλαισίων θα γίνει για 0.5, 1 και 1.5m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, για σταθερή γωνία τοποθέτησης στις 25 μοίρες. Με αυτό τον τρόπο θα αναδειχθούν και πάλι οι βελτιωμένες τιμές των Bifacial έναντι των Monofacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, αναφορικά με την παραγωγή του συστήματος και την ειδική ενέργεια, ενώ παράλληλα θα παρουσιαστεί και το διάγραμμα του Bifacial gain. Θα εξαχθούν συνολικά 15 διαγράμματα με βάση τα αποτελέσματα από το λογισμικό. Από τα παραπάνω, τα 14 θα παρουσιαστούν στο **Κεφάλαιο 5**.

Πιο συγκεκριμένα, θα δημιουργηθούν τρία διαγράμματα για κάθε ύψος από το έδαφος, όπου φαίνεται η παραγόμενη και η ειδική ενέργεια του συστήματος για κάθε μήνα, για τα δύο είδη των Φ/Β πλαισίων, καθώς και το μηνιαίο Bifacial Gain. Επιπλέον, θα παρουσιαστεί σε διάγραμμα η ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους από το έδαφος. Επίσης, θα εξαχθούν δύο διαγράμματα για τους χειμερινούς και άλλα δύο για τους υπόλοιπους μήνες, για μέσο όρο του albedo αντίστοιχα 0.76 και 0.24, στα οποία φαίνεται η παραγωγή του συστήματος και η ειδική ενέργεια συναρτήσει του ύψους από το έδαφος για τα δύο είδη φωτοβολταϊκών, ενώ θα εισαχθεί και το διάγραμμα του Bifacial Gain ανάλογα με το ύψος τοποθέτησης για τους παραπάνω μήνες αντίστοιχα.

Το τελευταίο διάγραμμα, στο οποίο φαίνεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων, για τις δύο εγκαταστάσεις Φ/Β πάρκων, για την περιοχή της Αιανής, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.11**.



Εικόνα 4.11: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης για την Αιανή (Fixed Tilted Plane) [49]

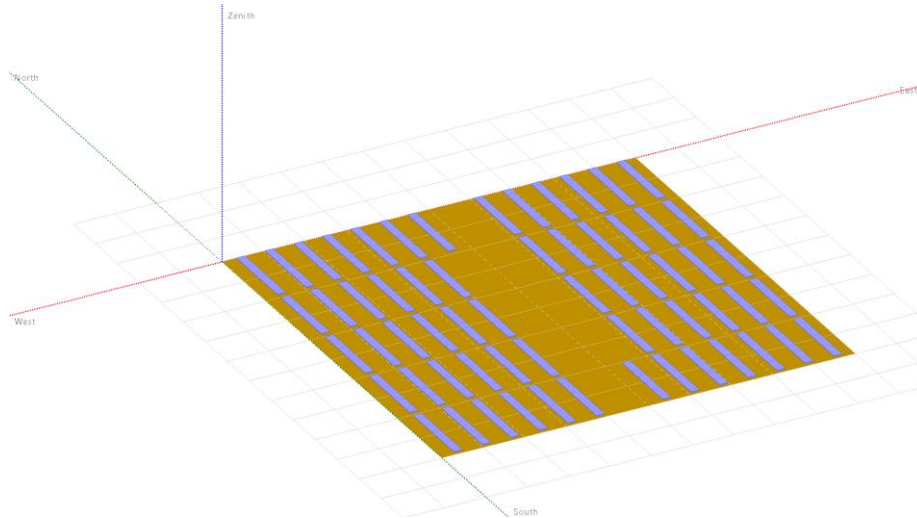
4.4.1.4 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού πάρκου για σύστημα Ιχνηλατών Ενιαίου Άξονα

Για την Αιανή της Κοζάνης, όπως προαναφέρθηκε, εκτός από το πάρκο σταθερής κλίσης, θα μοντελοποιηθεί και πάρκο με ιχνηλάτες ενιαίου άξονα (Tracking System) για 1P σχεδίαση, πάλι για το Φ/Β πλαίσιο της εταιρίας Trina, 'Trina TSM-400DEG15HC.20(II)'.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα έχουν προσανατολισμό Βορρά – Νότου και τοποθετούνται παράλληλα ως προς το οριζόντιο επίπεδο (Tracking, Horizontal axis N-S). Το αζιμούθιο και εδώ θεωρείται μηδενικό, ενώ τα πλαίσια θα στρέφονται για εύρος γωνιών από τις -60° μέχρι τις $+60^\circ$ με τον άξονα στη μέση τους.

Όπως και στο πάρκο σταθερής κλίσης, ο διαθέσιμος χώρος είναι 10000m^2 . Επιλέγονται με βάση τις απαιτήσεις ξανά 62 σειρές των 18 πλαισίων η καθεμία, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 450kWp . Προσδιορίζονται, όπως και προηγουμένως, μέσω του PVsyst οι συνολικές απώλειες, η

γραμμή ορίζοντα και τέλος οι κοντινές απώλειες λόγω σκίασης, σχεδιάζοντας το αντίστοιχο πάρκο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.12** με **Pitch=6.9m** και **GCR=29.4%**.

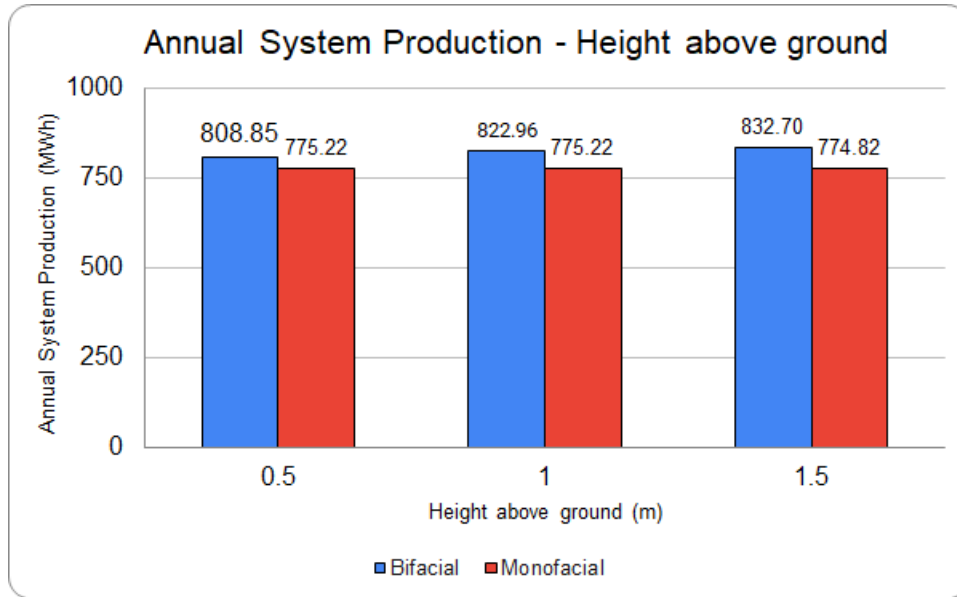


Εικόνα 4.12: Προσομοίωση Φ/Β πάρκου με Ιχνηλάτες Ενιαίου Άξονα [49]

Η μοντελοποίηση για το συγκεκριμένο πάρκο, γίνεται για τρεις διαφορετικές τιμές ανύψωσης. Αυτές είναι 0.5, 1 και 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, για μεταβλητό albedo μέσα στο χρόνο, επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία με το πάρκο σταθερής σχεδίασης. Ως ύψος πάνω από το έδαφος θεωρείται η ελάχιστη απόσταση του Φ/Β πλαισίου με το έδαφος, όταν η κλίση του ιχνηλάτη αντιστοιχεί στη μέγιστη απόλυτη τιμή της ($\pm 60^\circ$) [35]. Οπότε, και σε αυτή την περίπτωση θα εξαχθούν συνολικά 15 διαγράμματα, εκ των οποίων τα 14 θα παρουσιαστούν στο **Κεφάλαιο 5**.

Ειδικότερα, θα εξαχθούν τρία διαγράμματα για κάθε ύψος από το έδαφος, στα οποία παρουσιάζεται η παραγόμενη και η ειδική ενέργεια του συστήματος για κάθε μήνα, καθώς και το μηνιαίο Bifacial Gain και ένα συνολικό διάγραμμα για την ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους από το έδαφος. Ακόμη, θα ακολουθήσουν άλλα δύο διαγράμματα για τους χειμερινούς και άλλα δύο για τους υπόλοιπους μήνες, για μέσο όρο του albedo αντίστοιχα 0.76 και 0.24, στα οποία φαίνεται η παραγωγή του συστήματος και η ειδική ενέργεια συναρτήσει του ύψους από το έδαφος για τα δύο είδη φωτοβολταϊκών. Τέλος, γίνεται εξαγωγή ενός διαγράμματος για το Bifacial Gain με βάση το ύψος τοποθέτησης για τους παραπάνω μήνες.

Το τελευταίο διάγραμμα, στο οποίο φαίνεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων, για τις δύο εγκαταστάσεις Φ/Β πάρκων, για την περιοχή της Αιανής, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.13**.



Εικόνα 4.13: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης για την Αιανή (Single Axis Tracking) [49]

4.5 Βεστερός Σουηδίας

Η Βεστερός της Σουηδίας, επιλέχθηκε, καθώς παρουσιάζει διαφορετικό κλίμα από την Αιανή, με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έντονες χιονοπτώσεις τους χειμερινούς μήνες και υψόμετρο στα 13 μέτρα.

Όπως και για την Αιανή, μέσα από το PVSyst, εξάγονται τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα και οι γεωγραφικές συντεταγμένες της εγκατάστασης μέσα από το Meteororm 8.0, τα οποία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.3** και στην **Εικόνα 4.14**.

Πίνακας 4.3: Γεωγραφικά Δεδομένα, Βεστερός Σουηδίας [49]

Γεωγραφικό Πλάτος	59.6162°
Γεωγραφικό Μήκος	16.5528°

	Global horizontal irradiation kWh/m ² /mth	Horizontal diffuse irradiation kWh/m ² /mth	Temperature °C	Wind Velocity m/s	Linke turbidity [-]	Relative humidity %
January	8.1	6.6	-2.5	3.69	2.716	84.8
February	24.7	16.9	-2.4	3.49	2.845	82.1
March	75.1	32.8	0.7	3.60	2.940	73.6
April	120.2	51.6	6.0	3.60	3.269	65.9
May	161.5	78.9	11.7	3.59	3.161	65.0
June	172.6	78.4	15.1	3.40	2.974	67.2
July	169.6	70.0	18.3	3.10	3.113	70.5
August	130.8	60.1	16.9	3.19	3.043	72.8
September	84.9	37.4	12.2	3.50	2.832	78.2
October	41.5	23.1	7.0	3.50	2.838	82.2
November	11.4	8.1	2.8	3.60	2.835	86.9
December	4.4	3.8	-0.2	3.69	2.761	83.8
Year	1004.8	467.7	7.1	3.5	2.944	76.1

Εικόνα 4.14: Πίνακας Μηνιαίων Μετεωρολογικών Δεδομένων για την Βεστερός της Σουηδίας [49]

Για καλύτερη προσέγγιση στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων, επιλέγεται και εδώ το ίδιο Φ/Β πάρκο, 62 σειρές των 18 πλαισίων η καθεμία, με εγκατεστημένη ισχύ 450kWp (10 στρεμμάτων), με τα ίδια χαρακτηριστικά εξοπλισμού και το ίδιο Φ/Β πλαίσιο.

Συνεπώς, με παρόμοια διαδικασία θα ακολουθήσει η σύγκριση ανάμεσα στα Φ/Β μονής και στα διπλής όψης ίδιας ισχύος, όπου μέσα από το λογισμικό του PVSyst, θα υπολογιστεί η ετήσια παραγόμενη ενέργεια, το bifacial gain και η ειδική ενέργεια, για τις ίδιες μεταβολές του albedo όπως και στην Αιανή (**Πίνακας 4.2**), ώστε να φανεί και στη Βεστερός, το κέρδος στην παραγωγή λόγω των Bifacial Φ/Β πλαισίων.

Η μελέτη θα αφορά και εδώ, πάρκο σταθερών βάσεων στήριξης (Fixed Tilted Plane) και πάρκο με Tracking (Single Axis Tracking) σε 1P σχεδίαση, στα οποία θα μεταβάλλεται η κλίση της γωνίας και το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους.

4.5.1.1 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού πάρκου για σύστημα με σταθερές βάσεις στήριξης

Στην περίπτωση των σταθερών βάσεων στήριξης, χρησιμοποιείται το πάρκο όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.8**, οπότε επιλέγεται κοινό **Pitch=6.9m** και **GCR=29.4%**, καθώς και ο ίδιος σχεδιασμός, με αυτόν που πραγματοποιήθηκε για το πάρκο της Αιανής. Με αυτό τον τρόπο, υπάρχουν ακριβώς οι ίδιες συνθήκες εγκατάστασης για τις δύο περιοχές.

Να σημειωθεί ότι για την παραπάνω χωροθέτηση, το Φ/Β πάρκο στην περιοχή της Βεστερός, θα παρουσιάζει φαινόμενα σκίασης, καθώς αλλάζει το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος.

Η προσομοίωση, όπως προαναφέρθηκε, θα γίνει για μεταβλητό μηνιαίο Albedo, για μεταβολή του ύψους από την επιφάνεια του εδάφους και της κλίσης της γωνίας τοποθέτησης, με προσανατολισμό των πλαισίων προς το Νότο [54].

Οπότε, στη μία περίπτωση η γωνία τοποθέτησης θα λάβει τις τιμές των 25, 35 και 45 μοιρών για σταθερό ύψος στα 0.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η ανύψωση από το έδαφος θα γίνει για 0.5, 1 και 1.5m για γωνία τοποθέτησης 45 μοιρών [47].

Προτού γίνει η προσομοίωση, γίνεται εισαγωγή των απωλειών του συστήματος και υπολογίζονται οι απώλειες λόγω σκίασης από κοντινά αντικείμενα που προκύπτουν με βάση τον 3D σχεδιασμό του Φ/Β πάρκου.

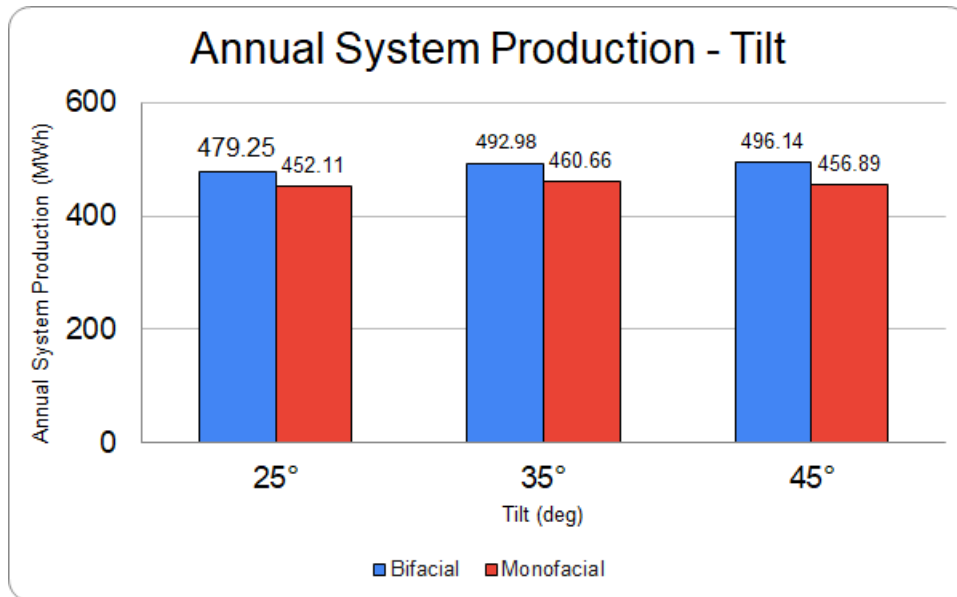
Σημειώνεται ότι το PVsyst δεν προσδιορίζει τη γραμμή ορίζοντα κάτω από 2°, για περιοχές όπως στην Βεστερός [49].

4.5.1.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσεως της γωνίας τοποθέτησης

Όσον αφορά τη μεταβολή της γωνίας τοποθέτησης, θα ληφθούν οι τιμές των 25, 35 και 45 μοιρών για σταθερό ύψος στα 0.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, ώστε να υπολογιστεί για ποια γωνία εμφανίζεται η καλύτερη δυνατή παραγωγή ενέργειας και να παρουσιαστεί η βελτιωμένη παραγωγή των bifacial έναντι των monofacial Φ/Β πλαισίων. Θα δημιουργηθούν συνολικά 15 διαγράμματα με βάση τα αποτελέσματα από τα Φ/Β πάρκα των bifacial και των monofacial. Από τα παραπάνω, τα 14 θα παρουσιαστούν στο **Κεφάλαιο 5**.

Με βάση τα δεδομένα από το PVsyst, εξάγονται τρία διαγράμματα για κάθε γωνία τοποθέτησης, στα οποία παρουσιάζεται η παραγόμενη και η ειδική ενέργεια του συστήματος για κάθε μήνα για τα δύο είδη των Φ/Β πλαισίων, καθώς και το διάγραμμα του μηνιαίου Bifacial Gain. Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει ένα συνολικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσεως των μοιρών για τις δύο εγκαταστάσεις Φ/Β πάρκων. Τέλος, θα παρουσιαστούν δύο διαγράμματα για τους χειμερινούς και άλλα δύο για τους υπόλοιπους μήνες, για μέσο όρο του albedo αντίστοιχα 0.76 και 0.24, στα οποία φαίνεται η παραγωγή του συστήματος και η ειδική ενέργεια συναρτήσεως της γωνίας τοποθέτησης, ενώ εισάγεται και το διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσεως της γωνίας για τους παραπάνω μήνες.

Το εναπομείναν ενδεικτικό διάγραμμα, στο οποίο απεικονίζεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει των μοιρών για τις δύο εγκαταστάσεις Φ/Β πάρκων, για την περιοχή της Βεστερός, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.15**.



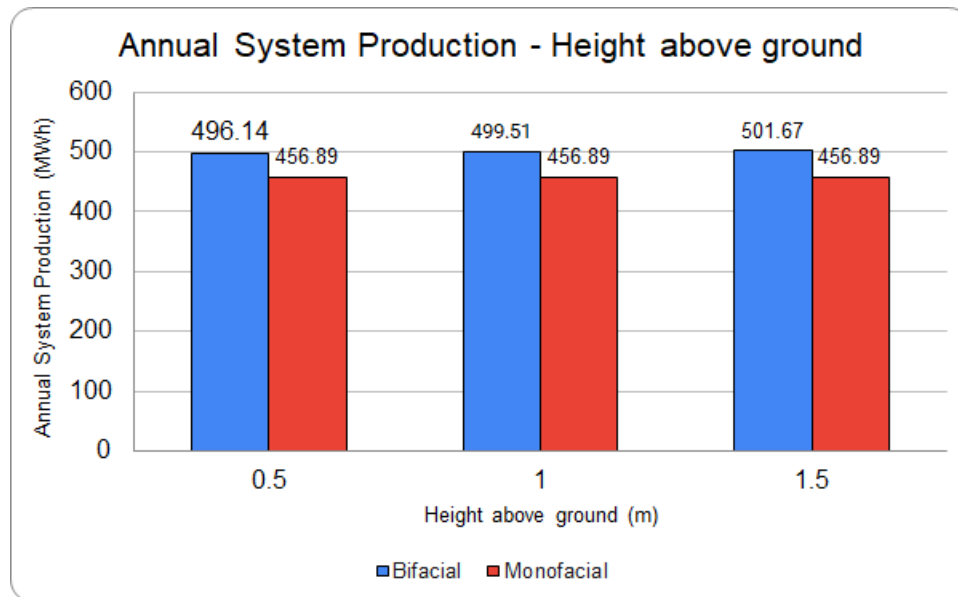
Εικόνα 4.15: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης για τη Βεστερός (Fixed Tilted Plane) [49]

4.5.1.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσει του ύψους από την επιφάνεια του εδάφους

Η ανύψωση των πλαισίων θα γίνει για 0.5, 1 και 1.5m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, για σταθερή γωνία τοποθέτησης στις 45 μοίρες, ώστε να αναδειχθούν και εδώ οι βελτιωμένες τιμές των Bifacial έναντι των Monofacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, στην παραγωγή του συστήματος και την ειδική ενέργεια, ενώ παρουσιάζεται και το διάγραμμα του Bifacial gain.

Ακολουθείται και εδώ λοιπόν η παραπάνω διαδικασία και παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα, με τη διαφορά ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι συναρτήσει της μεταβολής του ύψους και όχι της γωνίας.

Τα διαγράμματα θα παρουσιαστούν στο **Κεφάλαιο 5**, ενώ στην **Εικόνα 4.16**, ακολουθεί ενδεικτικά το διάγραμμα της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων, για τις δύο εγκαταστάσεις Φ/Β πάρκων, για την περιοχή της Βεστερός.



Εικόνα 4.16: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης για τη Βεσετέρως (Fixed Tilted Plane) [49]

4.5.1.4 Σχεδίαση φωτοβολταϊκού πάρκου για σύστημα Ιχνηλατών Ενιαίου Άξονα

Όπως και για την Αιανή, έτσι και για την Βεσετέρως, μοντελοποιείται πάρκο με ιχνηλάτες ενιαίου άξονα για 1P σχεδίαση, πάλι για το Φ/Β πλαίσιο της εταιρίας Trina, 'Trina TSM-400DEG15HC.20(II)'.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, θα έχουν προσανατολισμό Βορρά – Νότου και τοποθετούνται παράλληλα ως προς το οριζόντιο επίπεδο (Tracking, Horizontal axis N-S) για εύρος γωνιών από τις -60° μέχρι τις $+60^\circ$ με τον άξονα στη μέση τους.

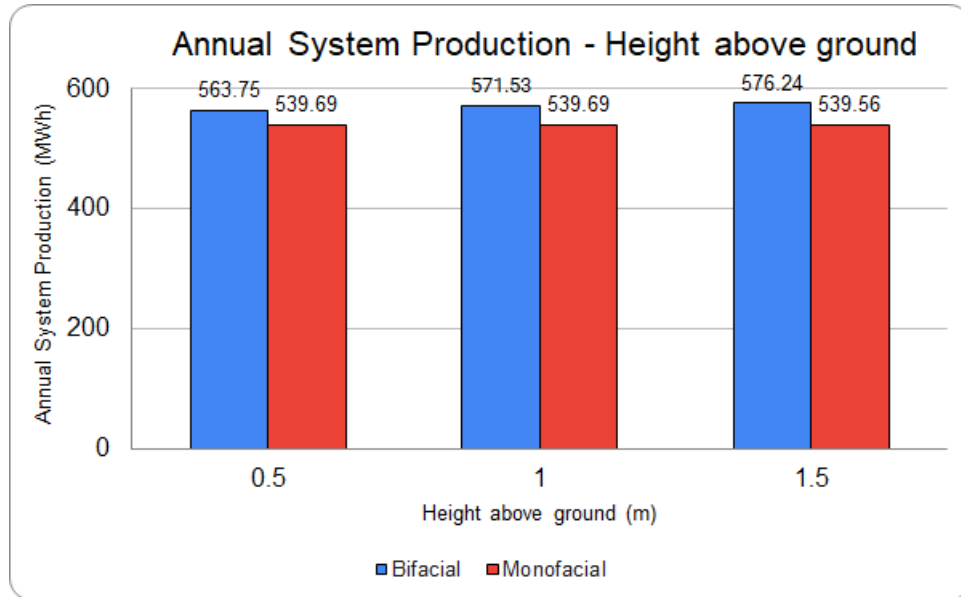
Όπως και στο πάρκο σταθερής κλίσης, ο διαθέσιμος χώρος είναι 10000m^2 και εγκαθίστανται 62 σειρές των 18 πλαισίων η καθεμία, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 450kWp .

Προσδιορίζεται, μέσα από το PVsyst οι συνολικές απώλειες και τις κοντινές απώλειες λόγω σκίασης, σχεδιάζοντας το αντίστοιχο πάρκο, με την **Εικόνα 4.12** με **Pitch=6.9m** και **GCR=29.4%**.

Η μοντελοποίηση για το συγκεκριμένο πάρκο θα γίνει για 0.5, 1 και 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, για μεταβλητό albedo μέσα στο χρόνο, επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία με το πάρκο σταθερής σχεδίασης.

Οπότε, και σε αυτή την περίπτωση θα εξαχθούν συνολικά 15 διαγράμματα, εκ των οποίων τα 14 θα παρουσιαστούν στο **Κεφάλαιο 5**, με παρόμοιο τρόπο όπως και για το πάρκο με Tracking Φ/Β της Αιανής.

Στην **Εικόνα 4.17**, φαίνεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων, για τις δύο εγκαταστάσεις Φ/Β πάρκων, για την περιοχή της Βεσετέρως.



Εικόνα 4.17: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης για τη Βεστερός (Single Axis Tracking) [49]

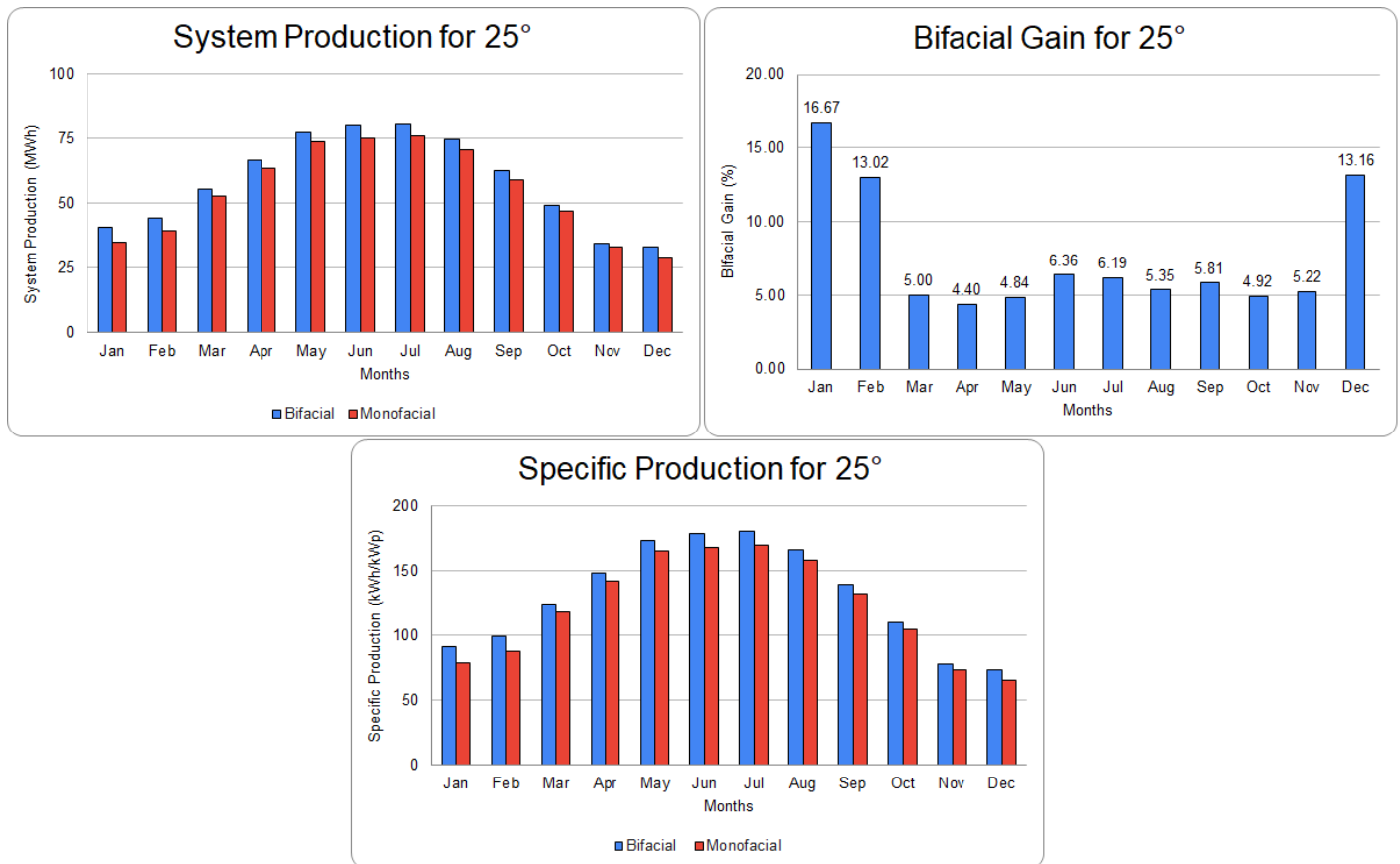
5. Αποτελέσματα Μελέτης

5.1 Αποτελέσματα μελέτης για την Αιανή Κοζάνης

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέσω της χρήσης του λογισμικού PVsyst. Αρχικά στο **Υποκεφάλαιο 5.1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Αιανής ενώ στο **Υποκεφάλαιο 5.2** τα αποτελέσματα της Βεστερός. Τα αποτελέσματα αυτά, παρουσιάζονται με διαγράμματα στα οποία γίνεται και ο αντίστοιχος σχολιασμός.

5.1.1.1 Αποτελέσματα για Fixed Tilted Plane

- Angle modification (αποτελέσματα με μεταβολή της γωνίας τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών για σταθερό ύψος στα 0.5m πάνω από το έδαφος)



Εικόνα 5.1: Διαγράμματα στις 25°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

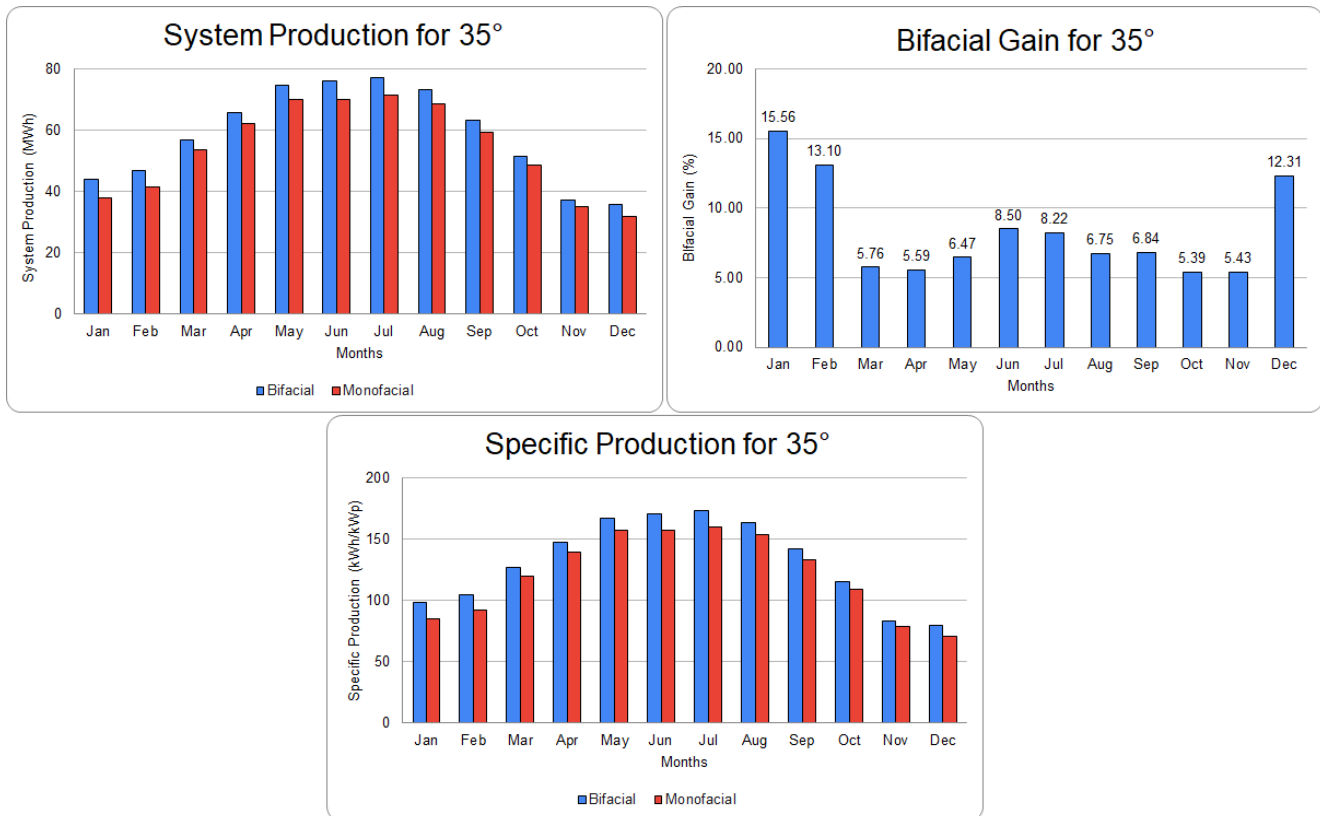
Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα της **Εικόνας 5.1**, παρατηρείται ότι για γωνία τοποθέτησης 25°, το φωτοβολταϊκό πάρκο των Bifacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, παρουσιάζει

βελτιωμένο System και Specific Production σε σχέση με το αντίστοιχο πάρκο των Monofacial φωτοβολταϊκών (γεγονός που επαληθεύεται και στα υπόλοιπα διαγράμματα που σχετίζονται με τη γωνία τοποθέτησης). Επίσης, το System και το Specific Production αυξάνουν κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως φαίνεται και σε όλα τα επόμενα διαγράμματα.

Ειδικότερα, το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 32.88 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 80.4MWh (τον Ιούλιο), ενώ των Monofacial από 29.05 μέχρι και 75.71 MWh, αντίστοιχα για τους ίδιους μήνες.

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από τις 73.65 (τον Δεκέμβριο) έως και τις 180.11kWh/kWp (τον Ιούλιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 65.09 μέχρι 169.61kWh/kWp, με αντιστοιχία για τους ίδιους μήνες.

Τέλος, το Bifacial Gain έχει εύρος τιμών από 4.4% (τον Απρίλιο) μέχρι 16.67% (τον Ιανουάριο). Σημειώνεται ότι είναι αισθητά βελτιωμένο κατά τους χειμερινούς μήνες, στους οποίους με βάση τον Πίνακα 4.2, παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του albedo.

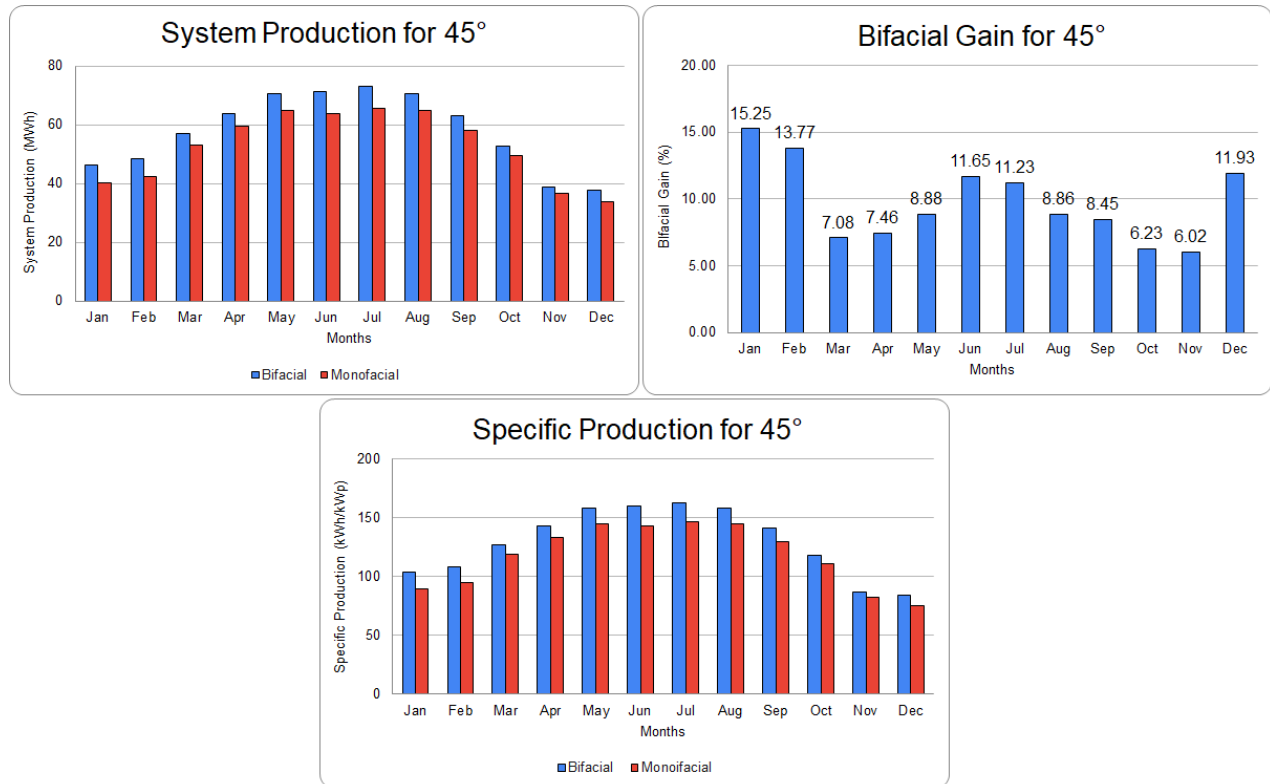


Εικόνα 5.2: Διαγράμματα στις 35°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Για γωνία τοποθέτησης 35°, με βάση τα διαγράμματα της **Εικόνας 5.2** το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 35.74 μέχρι 77.33MWh, ενώ για τα Monofacial από τις 31.82 μέχρι και τις 71.46MWh, με τις ελάχιστες τιμές να εμφανίζονται τον Δεκέμβριο και τις μέγιστες τον Ιούλιο.

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως έχει εύρος τιμών από 80.07 έως 173.23 kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 71.3 μέχρι 160.08 kWh/kWp, με τα μεγέθη να αντιστοιχούν στους παραπάνω μήνες.

Τέλος, το Bifacial Gain κυμαίνεται από 5.39% (τον Οκτώβριο) μέχρι 15.56% (τον Ιανουάριο).

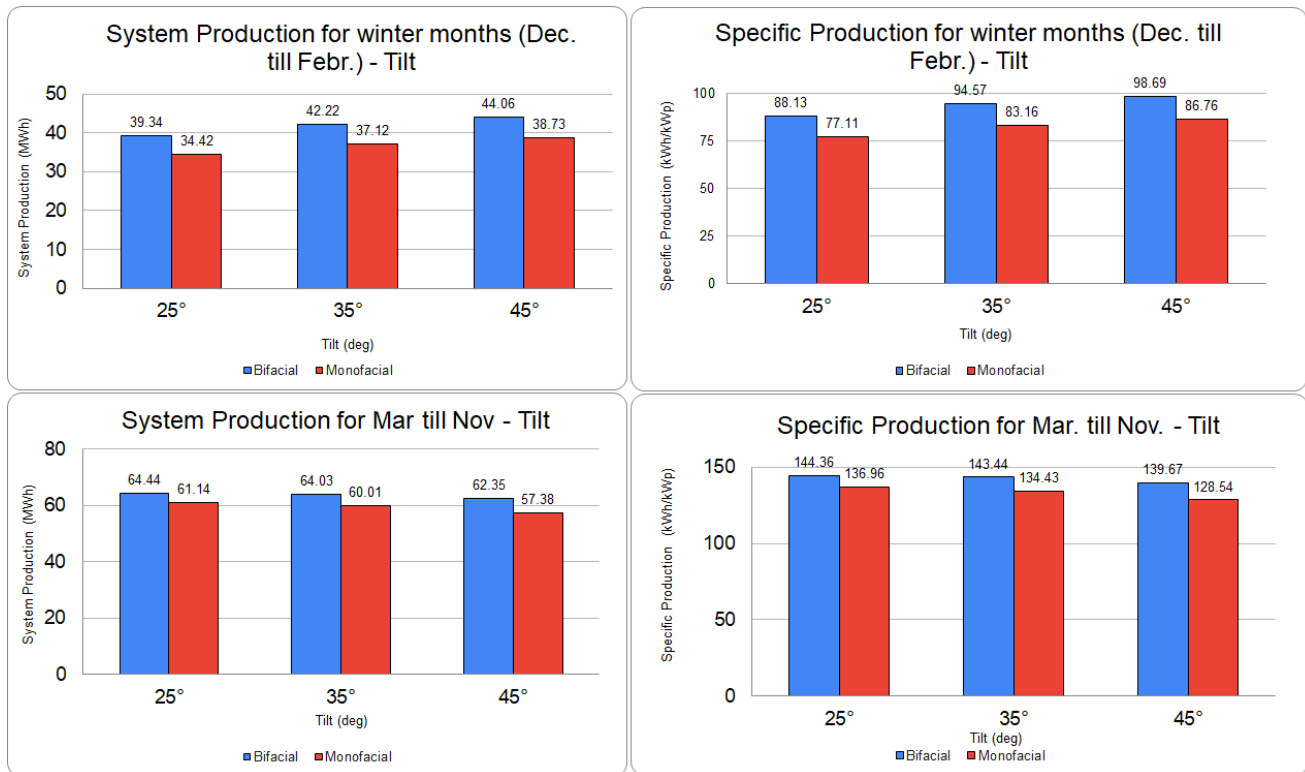


Εικόνα 5.3: Διαγράμματα στις 45°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Στην **Εικόνα 5.3**, για γωνία τοποθέτησης των πλαισίων στις 45°, το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 37.65 μέχρι 72.89 MWh, ενώ για τα Monofacial, από τις 33.64 μέχρι και τις 65.53 MWh, για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιούλιο αντίστοιχα.

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως έχει εύρος τιμών από 84.36 έως 163.29 kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 75.36 μέχρι 146.81 kWh/kWp, με αντιστοιχία για τους ίδιους μήνες όπως και παραπάνω.

Τέλος, το Bifacial Gain κυμαίνεται από 6.02% (τον Νοέμβριο) μέχρι και 15.25% (τον Ιανουάριο), ενώ παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές του, αντιστοιχούν στους χειμερινούς μήνες, αλλά και στους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο.



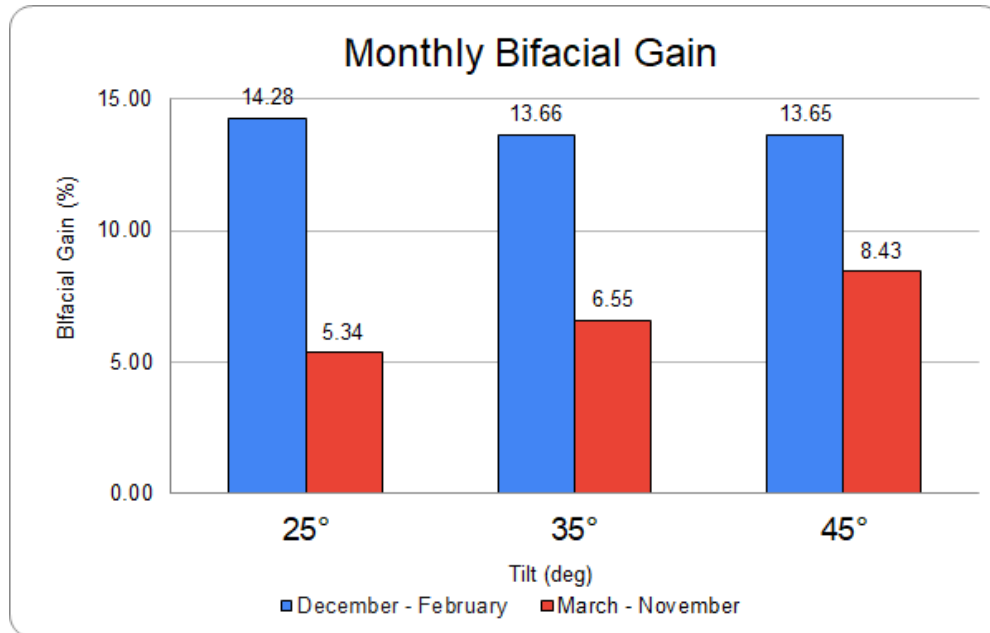
Εικόνα 5.4: Διαγράμματα συναρτήσεως των γωνιών τοποθέτησης: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49]

Αρχικά, στην **Εικόνα 5.4**, για την περίπτωση των χειμερινών μηνών (μέση τιμή του albedo ίση με 0.76), με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε ότι το System Production αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης της γωνίας τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο για τα Bifacial όσο και για τα Monofacial. Έτσι, για τη γωνία των 25°, το System Production των Bifacial είναι 39.34MWh και των Monofacial 34.42MWh, ενώ για τη γωνία των 45°, είναι αντίστοιχα 44.06MWh και 38.73MWh.

Με παρόμοιο τρόπο αυξάνεται και το Specific Production. Όπως παρατηρούμε, για τη γωνία των 25°, το Specific Production των Bifacial είναι 88.13kWh/kWp και των Monofacial 77.11 kWh/kWp, ενώ για τη γωνία των 45°, είναι αντίστοιχα 98.69kWh/kWp και 86.76kWh/kWp.

Από την άλλη, για την περίπτωση των μηνών από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο (μέση τιμή του albedo ίση με 0.24), παρατηρούμε ότι το System Production φθίνει με τη μείωση της κλίσης της γωνίας τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο για τα Bifacial όσο και για τα Monofacial. Έτσι, για τη γωνία των 25°, το System Production των Bifacial είναι 64.44MWh και των Monofacial 61.14MWh, ενώ για τη γωνία των 45°, είναι αντίστοιχα 62.35MWh και 57.38MWh.

Όμοια φθίνει και το Specific Production, όπου παρατηρείται, για τη γωνία των 25°, το Specific Production των Bifacial είναι 144.36kWh/kWp και των Monofacial 136.96kWh/kWp, ενώ για τη γωνία των 45°, είναι αντίστοιχα 139.67kWh/kWp και 128.54kWh/kWp.



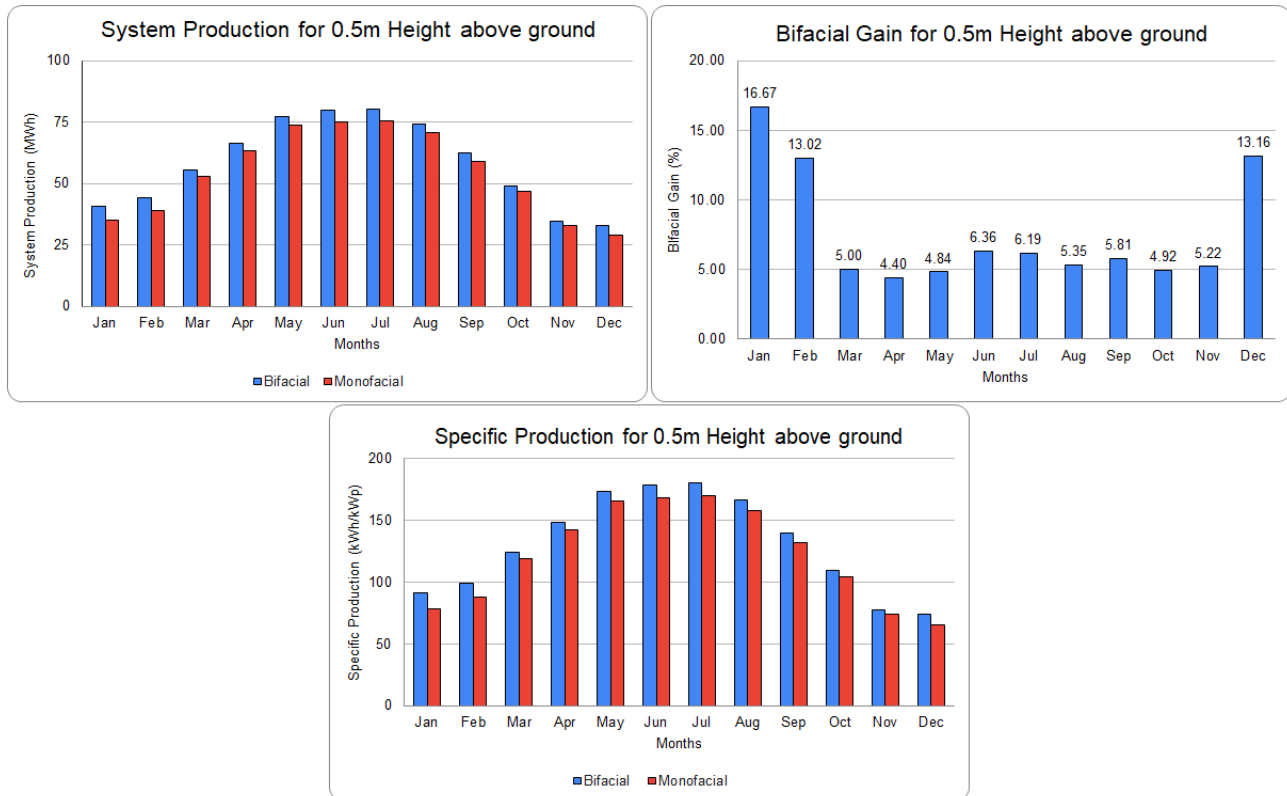
Εικόνα 5.5: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσει των γωνιών τοποθέτησης για τους διάφορους μήνες [49]

Όπως φαίνεται από την **Εικόνα 5.5**, το Bifacial Gain λαμβάνει τις υψηλότερες του τιμές κατά τους χειμερινούς μήνες, γεγονός που οφείλεται στις αυξημένες τιμές του albedo.

Παράλληλα, για τους ίδιους μήνες, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η γωνία τοποθέτησης των πλαισίων, μειώνεται το Bifacial Gain, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους μήνες κατά τους οποίους παρατηρείται αύξηση του Bifacial Gain με αύξηση της γωνίας τοποθέτησης των πλαισίων.

Ειδικότερα, στους χειμερινούς μήνες, το Bifacial Gain μειώνεται από 14.28% σε 13.65%, ενώ για τους υπόλοιπους μήνες, αυξάνεται από 5.34% σε 8.43%, με τις τιμές να αντιστοιχούν σε ύψη τοποθέτησης 0.5 και 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος.

- Height above ground modification (αποτελέσματα με μεταβολή της ανύψωσης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για σταθερή γωνία τοποθέτησης στις 25 μοίρες)



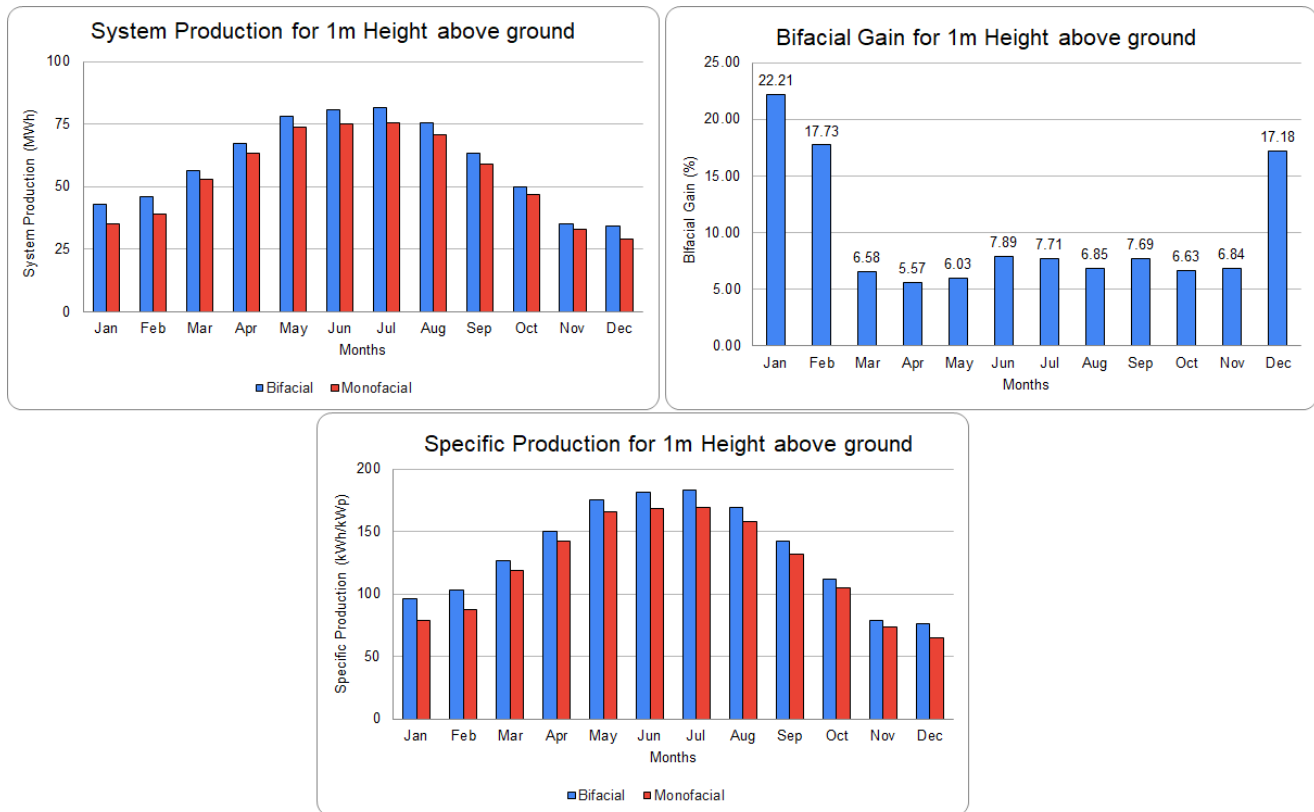
Εικόνα 5.6: Διαγράμματα για ανύψωση στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα της **Εικόνας 5.6**, για ανύψωση των φωτοβολταϊκών στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το φωτοβολταϊκό πάρκο των Bifacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, παρουσιάζει βελτιωμένο System και Specific Production σε σχέση με το αντίστοιχο πάρκο των Monofacial καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Η συγκεκριμένη παρατήρηση, επαληθεύεται και στις επόμενες περιπτώσεις μεταβολής της ανύψωσης των πλαισίων από το έδαφος.

Ειδικότερα, το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 32.88 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 80.4MWh (τον Ιούλιο), ενώ των Monofacial από 29.05 μέχρι και 75.71 MWh, αντίστοιχα για τους ίδιους μήνες.

Από την άλλη, το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από 73.65 (τον Δεκέμβριο) έως και 180.11kWh/kWp (τον Ιούλιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 65.09 μέχρι και 169.61kWh/kWp.

Τέλος, το Bifacial Gain έχει εύρος τιμών από 4.4% (τον Απρίλιο) μέχρι 16.67% (τον Ιανουάριο).

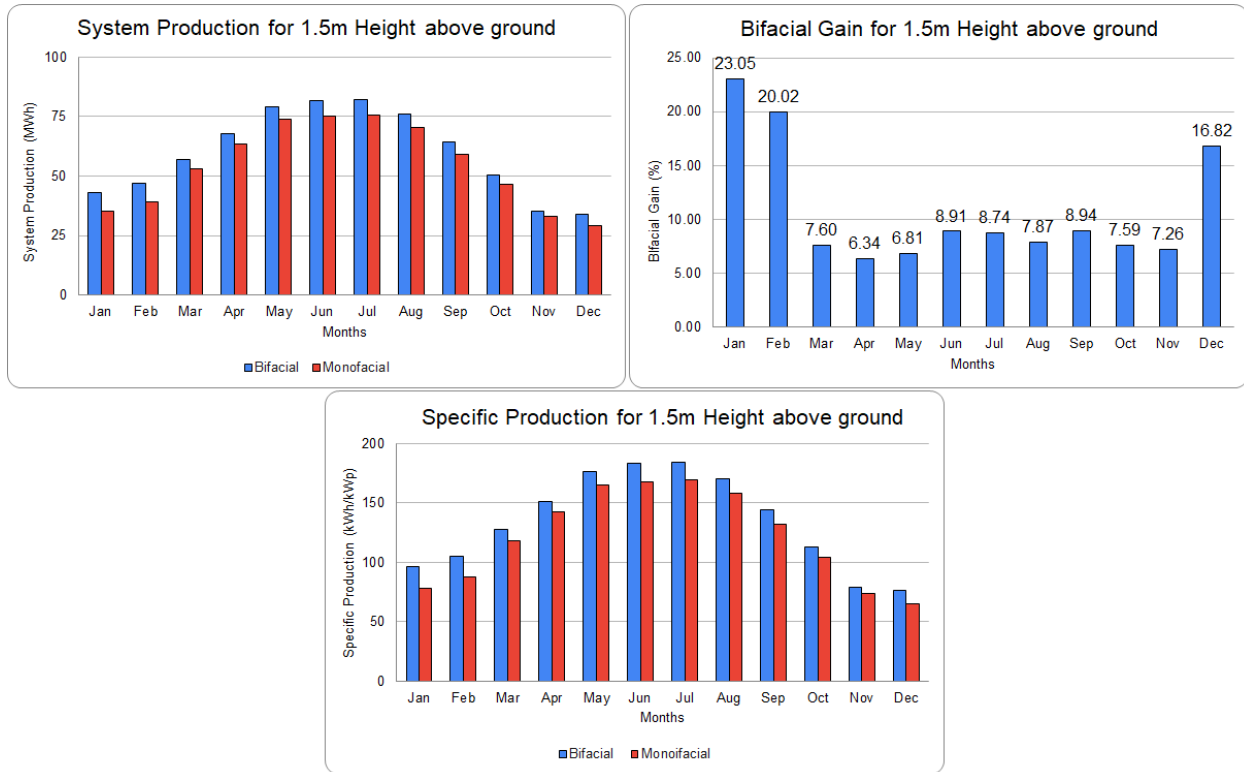


Εικόνα 5.7: Διαγράμματα για ανύψωση στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Για ανύψωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, από την **Εικόνα 5.7**, παρατηρούμε ότι το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 34.04 μέχρι 81.53MWh, ενώ για τα Monofacial, από τις 29.05MWh μέχρι και τις 75.7MWh, για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιούλιο αντίστοιχα.

Όσον αφορά το Specific Production, τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως έχουν εύρος τιμών από 76.26 έως 182.66 kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 65.08 μέχρι 169.57 kWh/kWp, με αντιστοιχία για τους ίδιους μήνες όπως και παραπάνω.

Τέλος, το Bifacial Gain κυμαίνεται από 5.57% (τον Απρίλιο) μέχρι και 22.21% (τον Ιανουάριο), ενώ παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές του, αντιστοιχούν στους χειμερινούς μήνες.

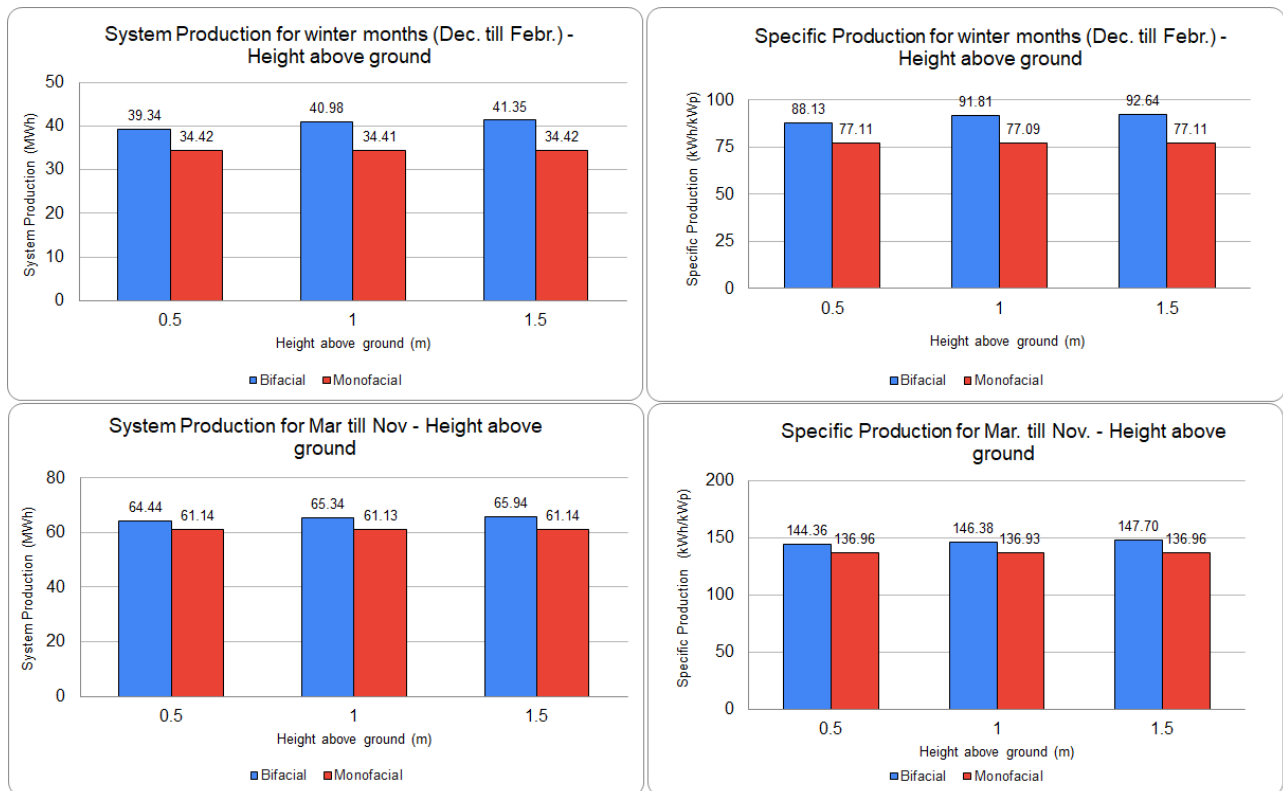


Εικόνα 5.8: Διαγράμματα για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Για ανύψωση των φωτοβολταϊκών στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, από την **Εικόνα 5.8**, το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 33.94 μέχρι 82.33MWh, ενώ για τα Monofacial από τις 29.05 μέχρι και τις 75.71MWh, με τις ελάχιστες τιμές να εμφανίζονται τον Δεκέμβριο και τις μέγιστες τον Ιούλιο.

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως έχει εύρος τιμών από 76.04 έως 184.43 kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 65.09 μέχρι 169.62kWh/kWp, με τα μεγέθη να αντιστοιχούν στους παραπάνω μήνες.

Τέλος, το Bifacial Gain κυμαίνεται από 6.34% (τον Απρίλιο) μέχρι 23.05% (τον Ιανουάριο).



Εικόνα 5.9: Διαγράμματα συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνων από την επιφάνεια του εδάφους: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49]

Όσον αφορά τους χειμερινούς μήνες (μέση τιμή του albedo ίση με 0.76), με βάση τα παραπάνω διαγράμματα της **Εικόνας 5.9**, παρατηρούμε ότι το System Production αυξάνεται με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, για τα Bifacial, ενώ διατηρείται σχεδόν σταθερό για τα Monofacial.

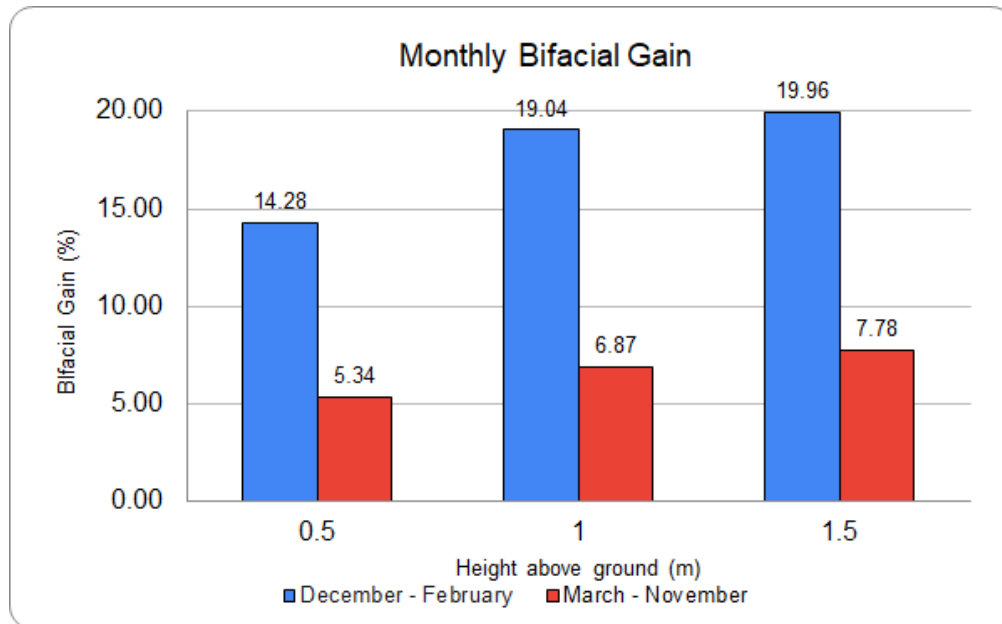
Έτσι, για τοποθέτηση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το System Production των Bifacial είναι 39.34MWh, ενώ για τα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, ισούται με 41.35MWh. Από την άλλη, το System Production των Monofacial πλαισίων διατηρείται σταθερό περίπου στις 34.42 MWh.

Παρόμοια, το Specific Production των Bifacial για τους ίδιους μήνες, αυξάνεται με αύξηση του ύψους τοποθέτησης, από 88.13 σε 92.64kWh/kWp, ενώ διατηρείται σταθερό περίπου στις 77.11kWh/kWp για την περίπτωση των Monofacial.

Για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο (μέση τιμή του albedo ίση με 0.24), όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, το System Production των Bifacial αυξάνει ελάχιστα με την αύξηση του

ύψους τοποθέτησης των πλαισίων, από 64.44 σε 65.94 MWh, ενώ σταθεροποιείται στις 61.14 MWh για το πάρκο των Monofacial φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Επίσης, για αύξηση του ύψους τοποθέτησης, το Specific Production των Monofacial διατηρείται σταθερό περίπου στις 136.96 kWh/kWp, ενώ ανεβαίνει κατά περίπου τρεις μονάδες για την περίπτωση των Bifacial, φτάνοντας από τις 144.36 στις 147.7kWh/kWp.



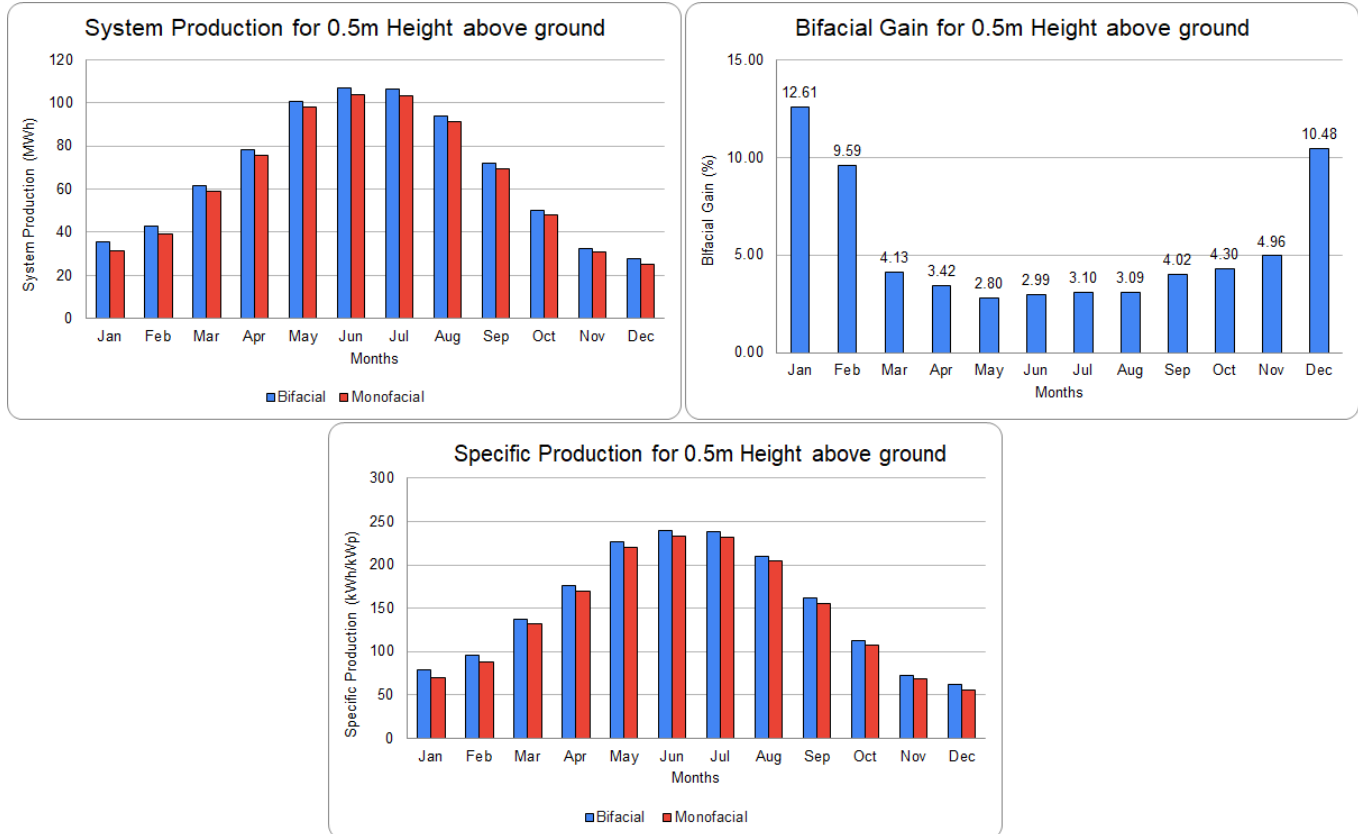
Εικόνα 5.10: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσει των υψών τοποθέτησης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για τους διάφορους μήνες [49]

Με βάση το διάγραμμα της **Εικόνας 5.10**, βλέπουμε ότι το Bifacial Gain είναι αρκετά πιο υψηλό στους χειμερινούς μήνες έναντι των υπολοίπων, λόγω των αυξημένων τιμών του albedo εκείνης της περιόδου.

Ακόμη, με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων πάνω από το έδαφος, φαίνεται ότι αυξάνεται και το Bifacial Gain, για όλους τους μήνες του χρόνου, όπου κατά τους χειμερινούς μήνες, αυξάνεται από 14.28% σε 19.96%, ενώ για τους υπόλοιπους μήνες, από 5.34% σε 7.78%, με τις τιμές να αντιστοιχούν σε ύψη τοποθέτησης 0.5 και 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος.

5.1.1.2 Αποτελέσματα για Tracking, horizontal axis N-S

- Height above ground modification (αποτελέσματα με μεταβολή της ανύψωσης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους)



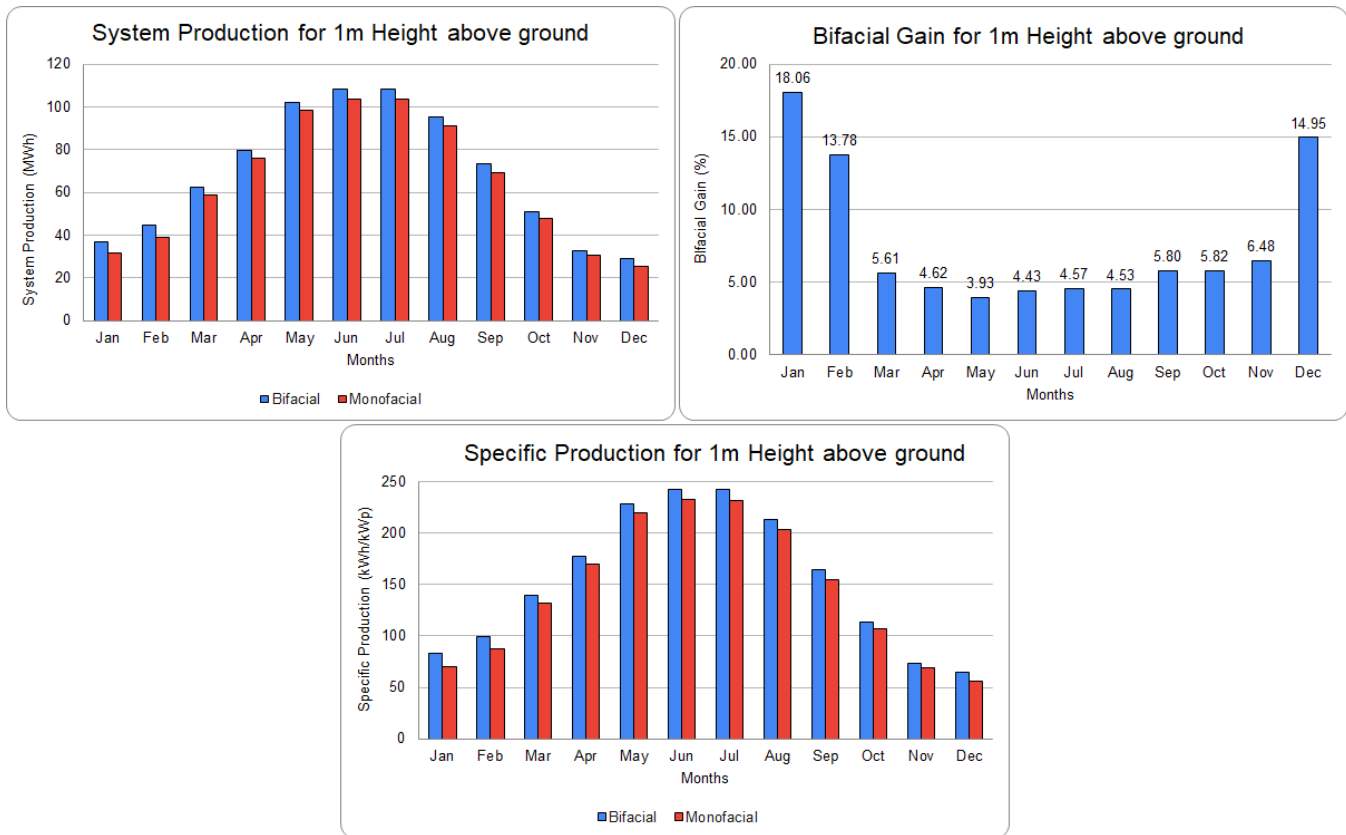
Εικόνα 5.11: Διαγράμματα για ανύψωση στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Στην **Εικόνα 5.11**, για ανύψωση των φωτοβολταϊκών στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το System και το Specific Production αποκτούν τις μέγιστες τιμές τους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως συμβαίνει και στα υπόλοιπα διαγράμματα.

Πιο συγκεκριμένα το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 27.77 μέχρι 106.91MWh, ενώ για τα Monofacial από τις 25.13 μέχρι και τις 103.81MWh, με τις ελάχιστες τιμές να εμφανίζονται τον Δεκέμβριο και τις μέγιστες τον Ιούνιο.

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως έχει εύρος τιμών από 62.2 (τον Δεκέμβριο) έως 239.5 kWh/kWp (τον Ιούνιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 56.3 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 232.56kWh/kWp (τον Ιούλιο).

Τέλος, το Bifacial Gain κυμαίνεται από 6.34% (τον Απρίλιο) μέχρι 23.05% (τον Ιανουάριο), λαμβάνοντας τις μεγαλύτερες του τιμές τους χειμερινούς μήνες.



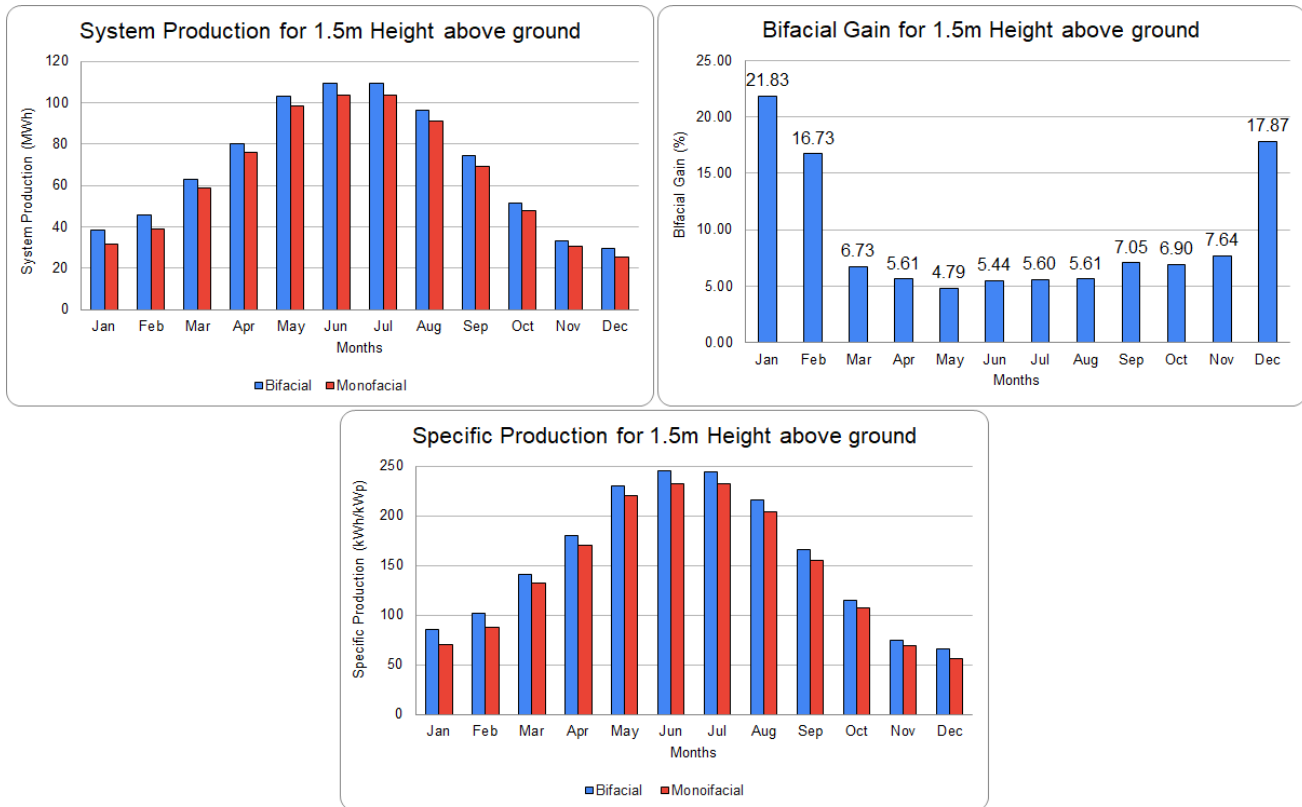
Εικόνα 5.12: Διαγράμματα για ανύψωση στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα της **Εικόνας 5.12**, για ανύψωση των φωτοβολταϊκών στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το φωτοβολταϊκό πάρκο των Bifacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, παρουσιάζει βελτιωμένο System και Specific Production σε σχέση με το αντίστοιχο πάρκο των Monofacial καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, όπως και στις υπόλοιπες περιπτώσεις μεταβολής της ανύψωσης των πλαισίων από το έδαφος.

Ειδικότερα, το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 28.89 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 108.41MWh (τον Ιούνιο), ενώ των Monofacial από 25.13 μέχρι και 103.81MWh, αντίστοιχα για τους ίδιους μήνες.

Από την άλλη, το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από 64.72 (τον Δεκέμβριο) έως και 242.85kWh/kWp (τον Ιούνιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 56.3 μέχρι και 232.56kWh/kWp, με αντιστοιχία των ίδιων μηνών, όπως και παραπάνω.

Τέλος, το Bifacial Gain έχει εύρος τιμών από 3.93% (τον Μάιο) μέχρι 18.06% (τον Ιανουάριο).

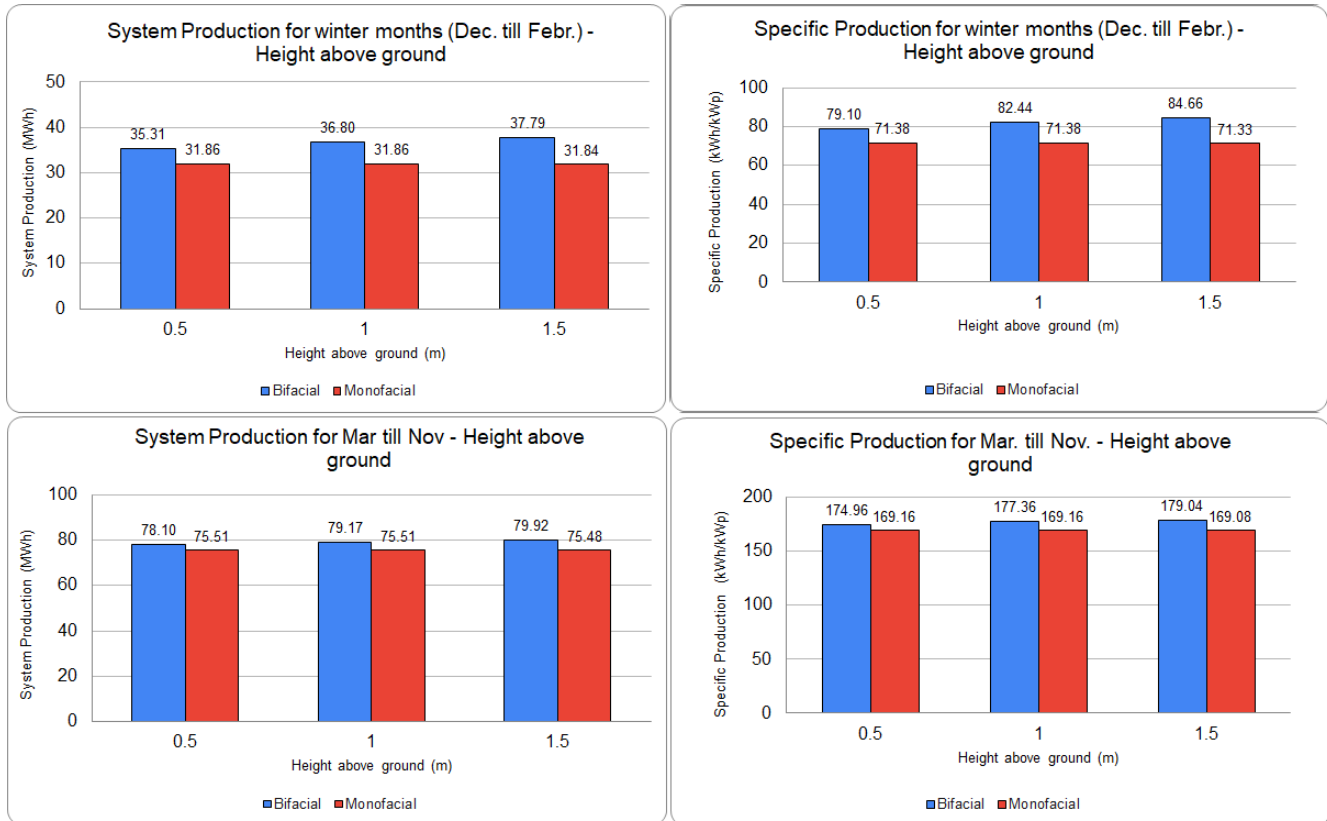


Εικόνα 5.13: Διαγράμματα για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα της **Εικόνας 5.13**, για τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το System Production για το φωτοβολταϊκό πάρκο των Bifacial, αποκτά τιμές από 29.59 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 109.42MWh (τον Ιούνιο), ενώ των Monofacial, από 25.1 μέχρι και 103.77 MWh, αντίστοιχα για τους ίδιους μήνες.

Επίσης, το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από 66.29 (τον Δεκέμβριο) έως 245.12kWh/kWp (τον Ιούλιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 56.24 μέχρι 232.48kWh/kWp, αντίστοιχα για τους παραπάνω μήνες.

Τέλος, το Bifacial Gain έχει εύρος τιμών από 4.79% (τον Μάιο) μέχρι 21.83% (τον Ιανουάριο).



Εικόνα 5.14: Διαγράμματα συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49]

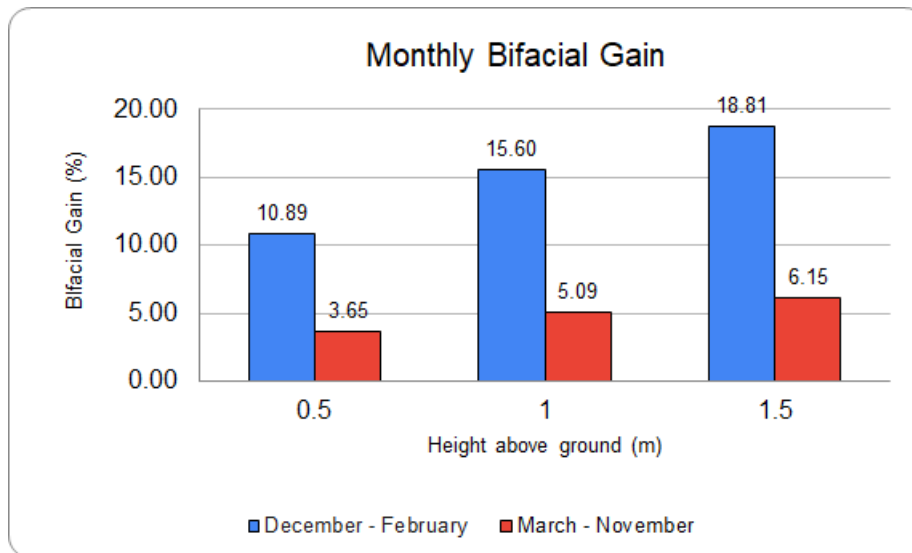
Στην **Εικόνα 5.14**, για τους χειμερινούς μήνες (μέση τιμή του albedo ίση με 0.76), παρατηρείται ότι το System Production αυξάνεται με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, για τα Bifacial, ενώ διατηρείται σχεδόν σταθερό για τα Monofacial.

Πιο συγκεκριμένα, για τοποθέτηση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το System Production των Bifacial είναι 35.31MWh, ενώ για τα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, ισούται με 37.79MWh. Σε αντίθεση με το System Production των φωτοβολταϊκών διπλής όψεως, το System Production των Monofacial φωτοβολταϊκών πλαισίων διατηρείται σταθερό περίπου στις 31.84 MWh.

Παρόμοιο μοτίβο ακολουθείται και στο διάγραμμα του Specific Production των χειμερινών μηνών, όπου για τα Bifacial, αυξάνεται με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης, από τις 79.1 στις 84.66kWh/kWp, ενώ διατηρείται σταθερό περίπου στις 71.33kWh/kWp για την περίπτωση των Monofacial.

Από την άλλη, για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο (μέση τιμή του albedo ίση με 0.24), όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, το System Production των Bifacial αυξάνει ελάχιστα με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων, από 78.1 σε 79.92MWh, ενώ διατηρείται σχεδόν σταθερό στις 75.48 MWh για το πάρκο των Monofacial φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Τέλος, για αύξηση του ύψους τοποθέτησης, το Specific Production των Monofacial διατηρείται σταθερό περίπου στις 169.08kWh/kWp, ενώ αυξάνεται από τις 174.96 στις 179.04kWh/kWp για την περίπτωση των Bifacial.



Εικόνα 5.15: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσει των υψών τοποθέτησης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για τους διάφορους μήνες [49]

Με βάση το διάγραμμα της **Εικόνας 5.15**, παρατηρούμε ότι το Bifacial Gain, το οποίο είναι αρκετά πιο υψηλό κατά τους χειμερινούς μήνες, λόγω των αυξημένων τιμών του albedo εκείνης της περιόδου, αυξάνει διαρκώς με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων πάνω από το έδαφος.

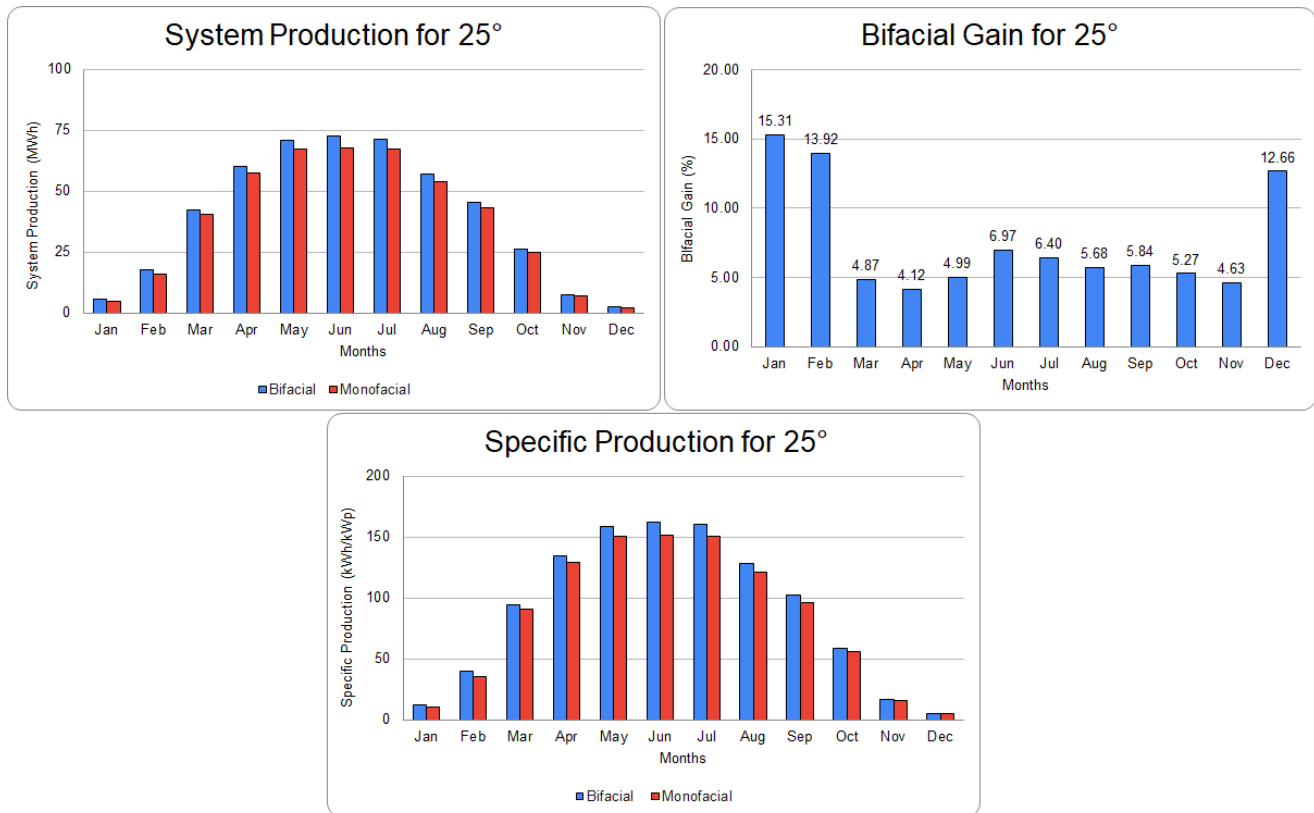
Ειδικότερα, στους χειμερινούς μήνες, αυξάνεται από 10.89% σε 18.81%, ενώ για τους υπόλοιπους μήνες, από 3.65% σε 6.15%, με τις τιμές να αντιστοιχούν σε ύψη τοποθέτησης 0.5 και 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος.

5.2 Αποτελέσματα μελέτης για την Βεστερός Σουηδίας

Ακολουθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περιοχή της Βεστερός.

5.2.1.1 Αποτελέσματα για Fixed Tilted Plane

- Angle modification (αποτελέσματα με μεταβολή της γωνίας τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών για σταθερό ύψος στα 0.5m πάνω από το έδαφος)



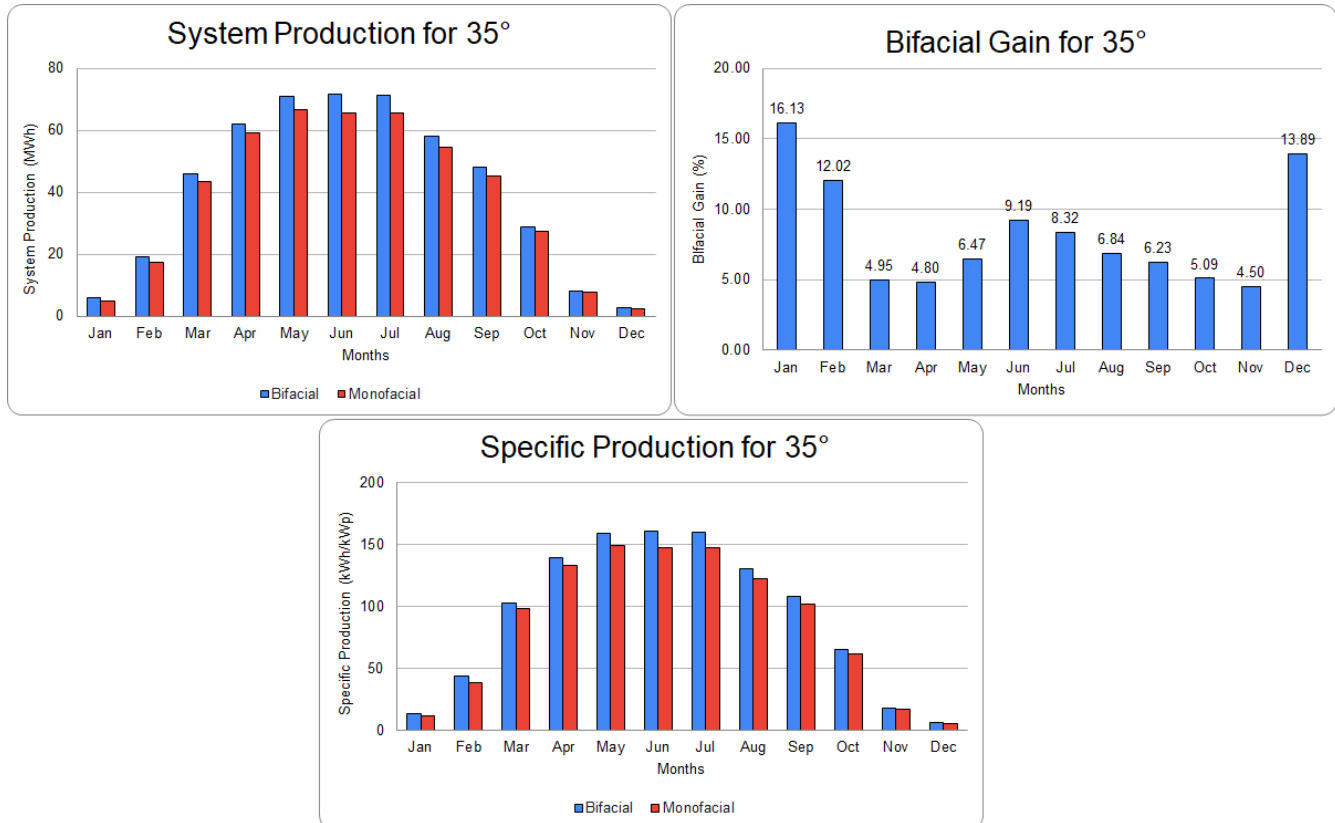
Εικόνα 5.16: Διαγράμματα στις 25° : System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Με βάση τα διαγράμματα της **Εικόνας 5.16**, παρατηρείται ότι για γωνία τοποθέτησης 25°, το System και το Specific Production των δύο φωτοβολταϊκών πάρκων αποκτούν τις βέλτιστές τους τιμές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως συμβαίνει και στις υπόλοιπες περιπτώσεις μεταβολής της γωνίας τοποθέτησης των πλαισίων, με το πάρκο των Bifacial να παρουσιάζει καλύτερη παραγωγή από το πάρκο των Monofacial, καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Έτσι, το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών, λαμβάνει τιμές από 2.41 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 72.45MWh (τον Ιούνιο), ενώ των Monofacial από 2.14 μέχρι και 67.73 MWh, αντίστοιχα για τους ίδιους μήνες.

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από 5.4 έως και τις 162.3kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 4.79 μέχρι 151.72kWh/kWp, με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές να ισχύουν για τους ίδιους μήνες όπως και στο System Production.

Τέλος, το Bifacial Gain έχει εύρος τιμών από 4.12% (τον Απρίλιο) μέχρι 15.31% (τον Ιανουάριο). Σημειώνεται ότι είναι αισθητά βελτιωμένο κατά τους χειμερινούς μήνες, στους οποίους με βάση τον Πίνακα 4.2, παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του albedo.

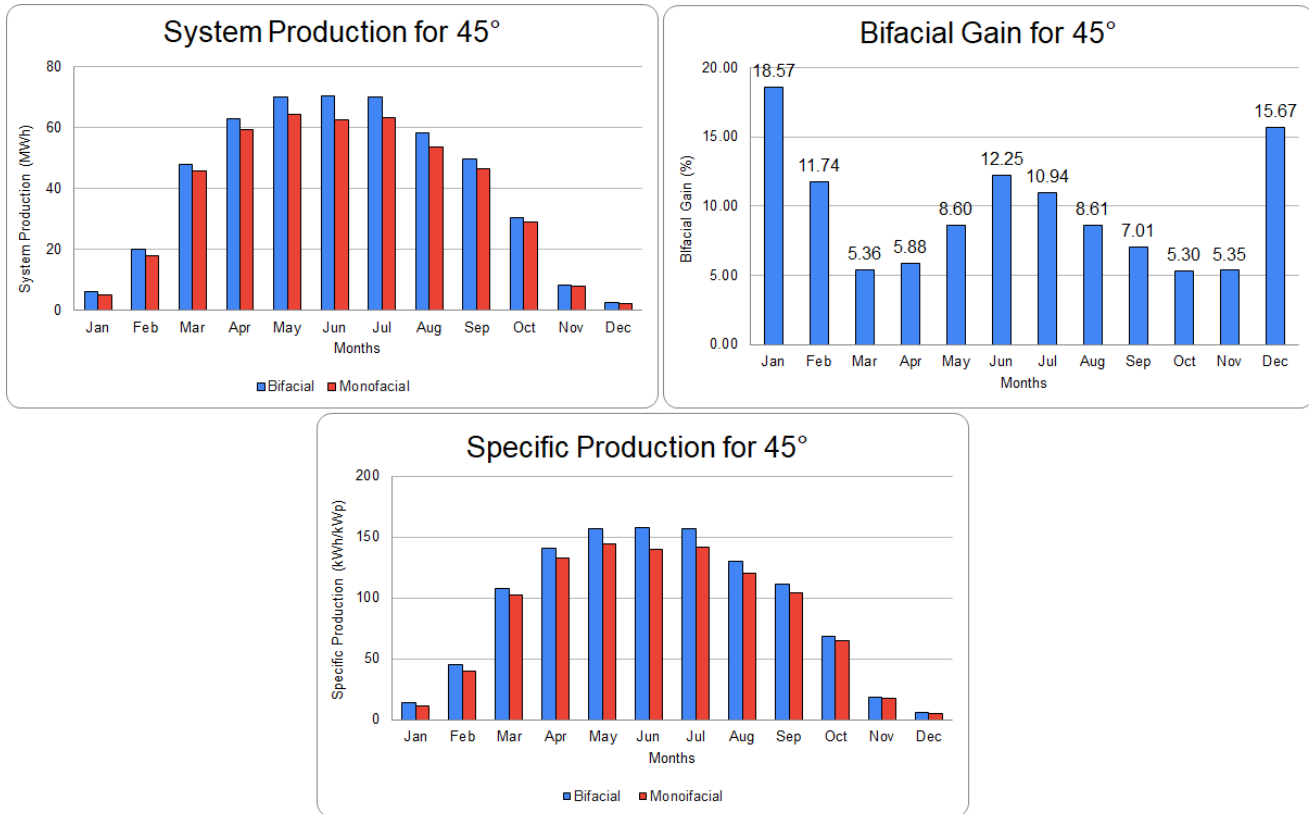


Εικόνα 5.17: Διαγράμματα στις 35°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Για γωνία τοποθέτησης των πλαισίων στις 35°, με βάση την **Εικόνα 5.17**, το System Production των φωτοβολταϊκών διπλής όψεως λαμβάνει τιμές από 2.58 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 71.82MWh (τον Ιούνιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής όψης, από τις 2.26 (τον Δεκέμβριο) μέχρι και τις 66.64MWh (το Μάιο).

Επίσης, το Specific Production των Bifacial φωτοβολταϊκών έχει εύρος τιμών από 5.78 (τον Δεκέμβριο) έως 160.9kWh/kWp (τον Ιούνιο), ενώ για τα Monofacial φωτοβολταϊκά από 5.08 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 149.28kWh/kWp (το Μάιο).

Τέλος, το Bifacial Gain κυμαίνεται από 4.5% (τον Νοέμβριο) μέχρι και 16.13% (τον Ιανουάριο), με τις μεγαλύτερες τιμές του να υφίστανται κατά τους χειμερινούς μήνες.

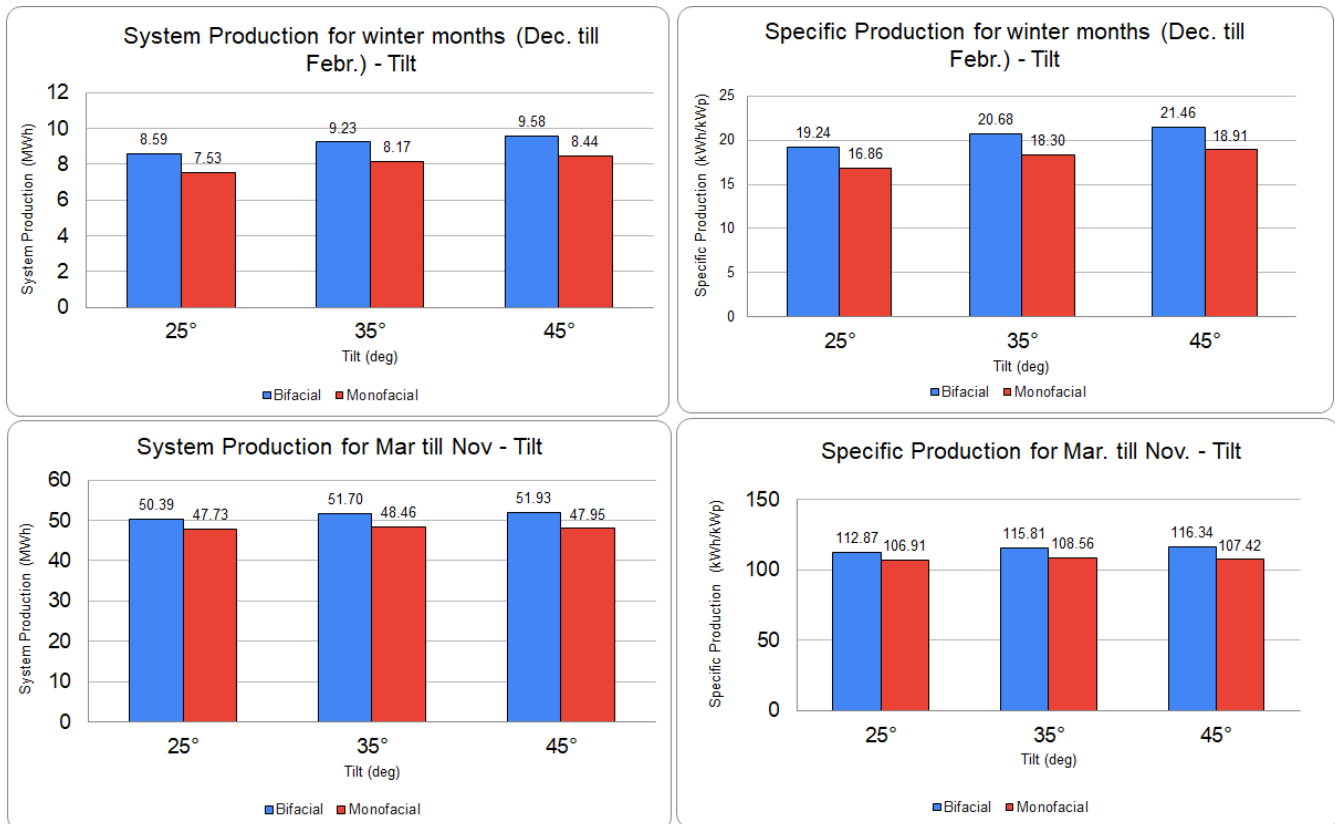


Εικόνα 5.18: Διαγράμματα στις 45°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα της **Εικόνας 5.18**, παρατηρούμε ότι για γωνία τοποθέτησης 45°, όσον αφορά το System Production, το φωτοβολταϊκό πάρκο των Bifacial έχει ως ελάχιστη τιμή τις 2.66MWh (τον Δεκέμβριο) και ως μέγιστη τις 70.2MWh (τον Ιούνιο). Από την άλλη, το System Production των Monofacial κυμαίνεται από τις 2.3 (τον Δεκέμβριο) μέχρι και τις 64.31MWh (το Μάιο).

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από 5.97 (τον Δεκέμβριο) έως 157.27kWh/kWp (τον Ιούνιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 5.16 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 144.06kWh/kWp (το Μάιο).

Τέλος, το Bifacial Gain έχει εύρος τιμών από 5.3% (τον Οκτώβριο) μέχρι 18.57% (τον Ιανουάριο).



Εικόνα 5.19: Διαγράμματα συναρτήσεως των γωνιών τοποθέτησης: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific [49]

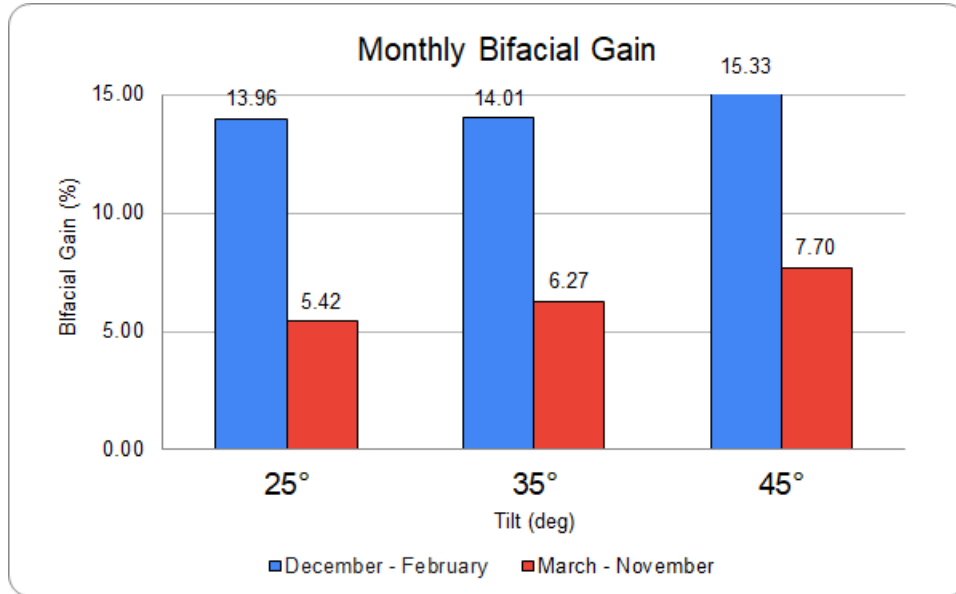
Αρχικά, για την περίπτωση των χειμερινών μηνών της **Εικόνας 5.19** (μέση τιμή του albedo ίση με 0.76), με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι το System Production αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης της γωνίας τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο για τα Bifacial όσο και για τα Monofacial. Έτσι, για τη γωνία των 25°, το System Production των Bifacial είναι 8.59MWh και των Monofacial 7.53MWh, ενώ για τη γωνία των 45°, είναι αντίστοιχα 9.58MWh και 8.44MWh.

Με παρόμοιο τρόπο αυξάνεται και το Specific Production για τους χειμερινούς μήνες. Όπως παρατηρείται, για τη γωνία των 25°, το Specific Production των Bifacial είναι 19.24kWh/kWp και των Monofacial 16.86kWh/kWp, ενώ για τη γωνία των 45°, είναι αντίστοιχα 21.46kWh/kWp και 18.91kWh/kWp.

Για την περίπτωση των μηνών από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο (μέση τιμή του albedo ίση με 0.24), παρατηρούμε, όπως και στους χειμερινούς μήνες, ότι το System Production των Bifacial αυξάνει με την αύξηση της κλίσης της γωνίας τοποθέτησης των πλαισίων. Έτσι, για τη γωνία των 25°, το System Production των Bifacial είναι 50.39MWh, ενώ στις 45°, είναι 51.93MWh.

Για τους ίδιους μήνες, το System Production των Monofacial παρουσιάζει μία άνοδο από τις 47.73 στις 48.46MWh, για γωνίες τοποθέτησης 25° και 35° αντίστοιχα, ενώ τελικά μειώνεται στις 47.95MWh για γωνία 45°.

Όμοια ισχύει και για την περίπτωση του Specific Production, όπου όπως παρατηρούμε, το Specific Production των Bifacial αυξάνεται από τις 112.87 (για γωνία 25°) στις 116.34kWh/kWp (για γωνία 45°), ενώ το Specific Production των Monofacial, αυξάνεται από τις 106.91 στις 108.56 kWh/kWp, ενώ ύστερα φθίνει στις 107.42kWh/kWp, με τα μεγέθη να αντιστοιχούν στις γωνίες των 25°, 35° και 45°.

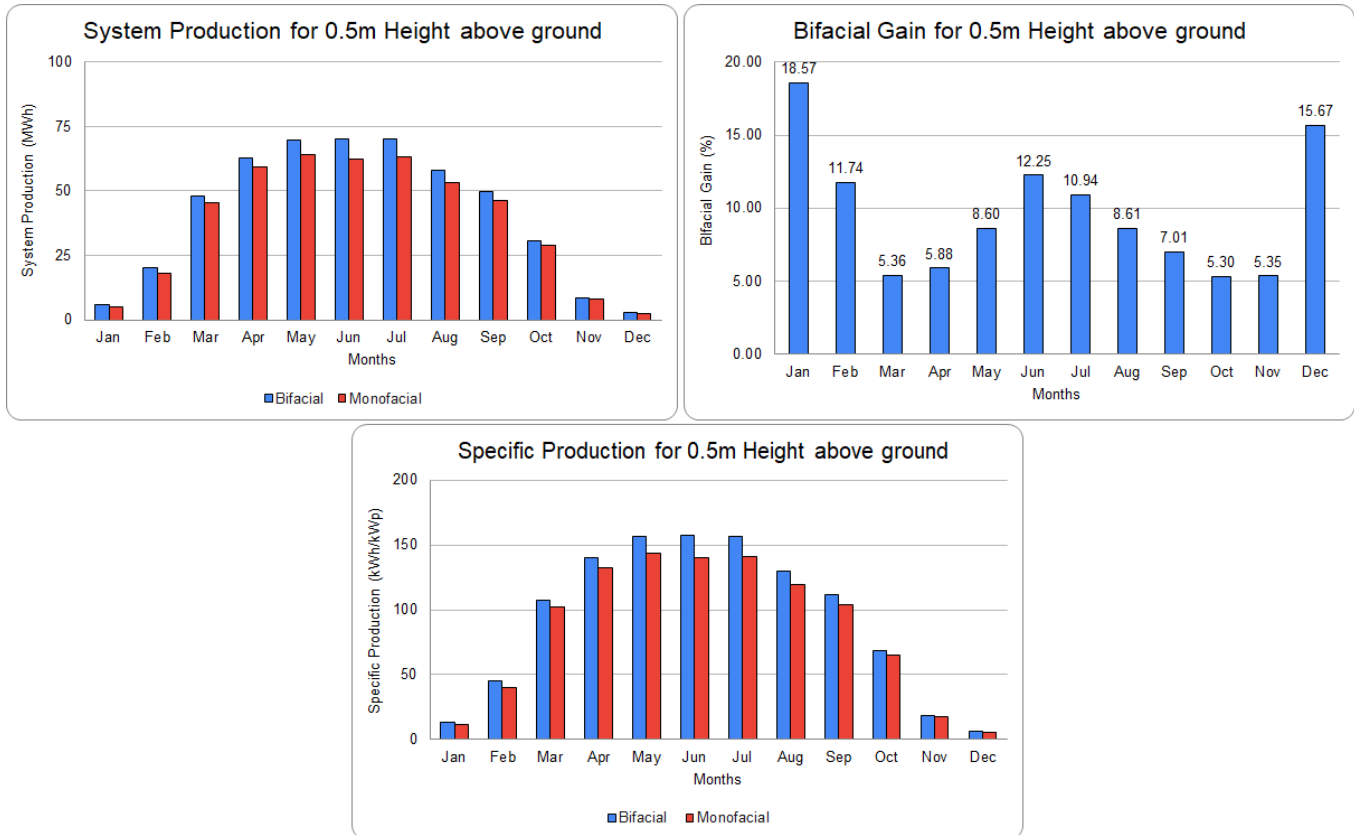


Εικόνα 5.20: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσει των γωνιών τοποθέτησης για τους διάφορους μήνες [49]

Όπως φαίνεται από την **Εικόνα 5.20**, το Bifacial Gain παρουσιάζει έντονη αύξηση κατά τους χειμερινούς μήνες, όπως και αναμενόταν, λόγω των αυξημένων τιμών του albedo εκείνης της χρονικής περιόδου.

Παράλληλα, τόσο για τους χειμερινούς όσο και για τους υπόλοιπους μήνες, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η γωνία τοποθέτησης των πλαισίων, αυξάνεται και το Bifacial Gain. Έτσι, για τους χειμερινούς μήνες από 13.96% έγινε 15.33%, για γωνία τοποθέτησης 25° και 45° αντίστοιχα, ενώ για τους υπόλοιπους μήνες, μετατράπηκε από το 5.42% στο 7.7%, για αντιστοιχία των ίδιων γωνιών τοποθέτησης.

- Height above ground modification (αποτελέσματα με μεταβολή της ανύψωσης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για σταθερή γωνία τοποθέτησης στις 45 μοίρες)



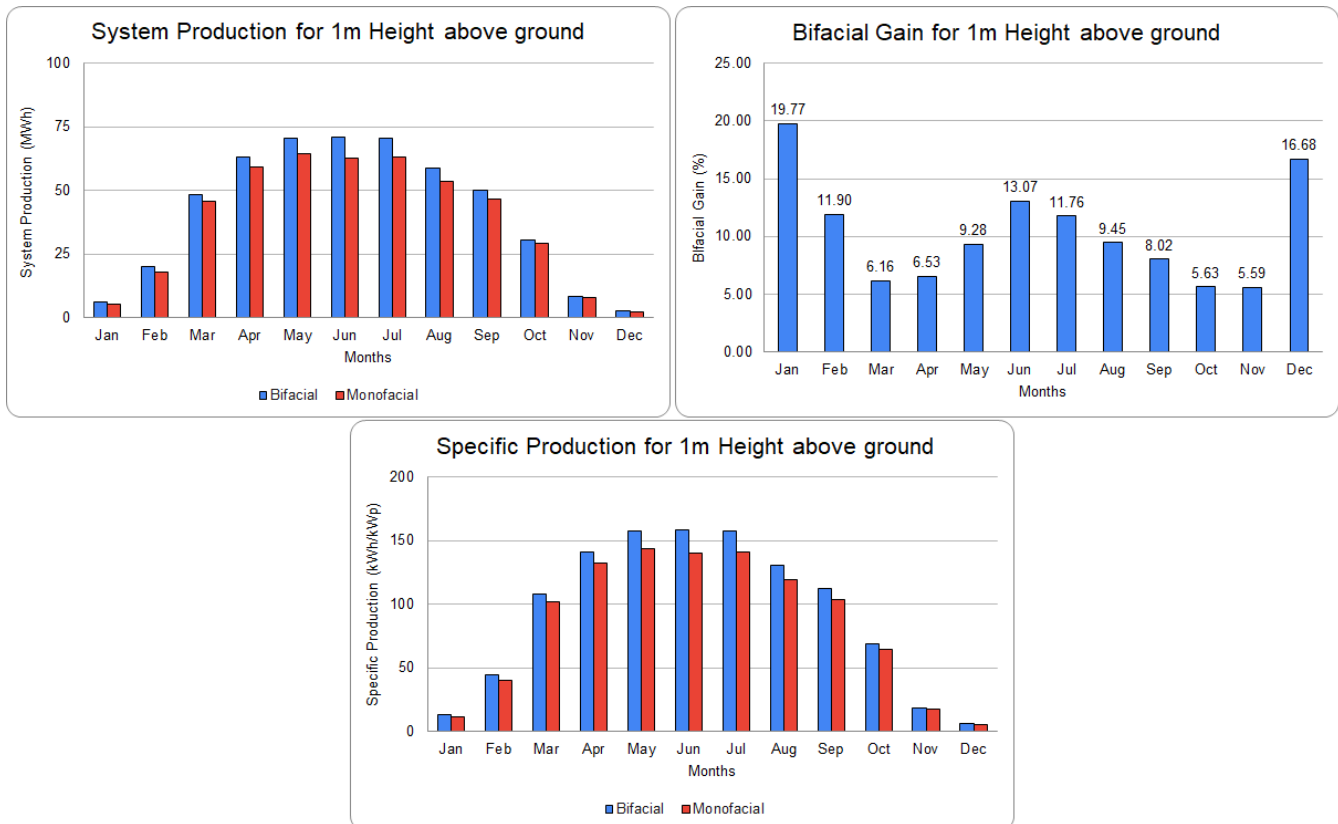
Εικόνα 5.21: Διαγράμματα για ανύψωση στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Από την **Εικόνα 5.21**, για ανύψωση των φωτοβολταϊκών στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, παρατηρείται ότι το System και το Specific Production αποκτούν τις μεγαλύτερες τους τιμές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως συμβαίνει και στα υπόλοιπα διαγράμματα μεταβολής της ανύψωσης των πλαισίων πάνω από το έδαφος.

Πιο συγκεκριμένα το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών λαμβάνει τιμές από 2.66 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 70.2MWh (τον Ιούνιο), ενώ για τα Monofacial από τις 2.3 (τον Δεκέμβριο) μέχρι και τις 64.31MWh (το Μάιο).

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από 5.97 (τον Δεκέμβριο) έως 157.27kWh/kWp (τον Ιούνιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 5.16 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 144.06kWh/kWp (το Μάιο).

Τέλος, το Bifacial Gain έχει εύρος τιμών από 5.3% (τον Οκτώβριο) μέχρι 18.57% (τον Ιανουάριο), ενώ παρουσιάζει ιδιαίτερη αύξηση κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, καθώς και στους χειμερινούς μήνες.

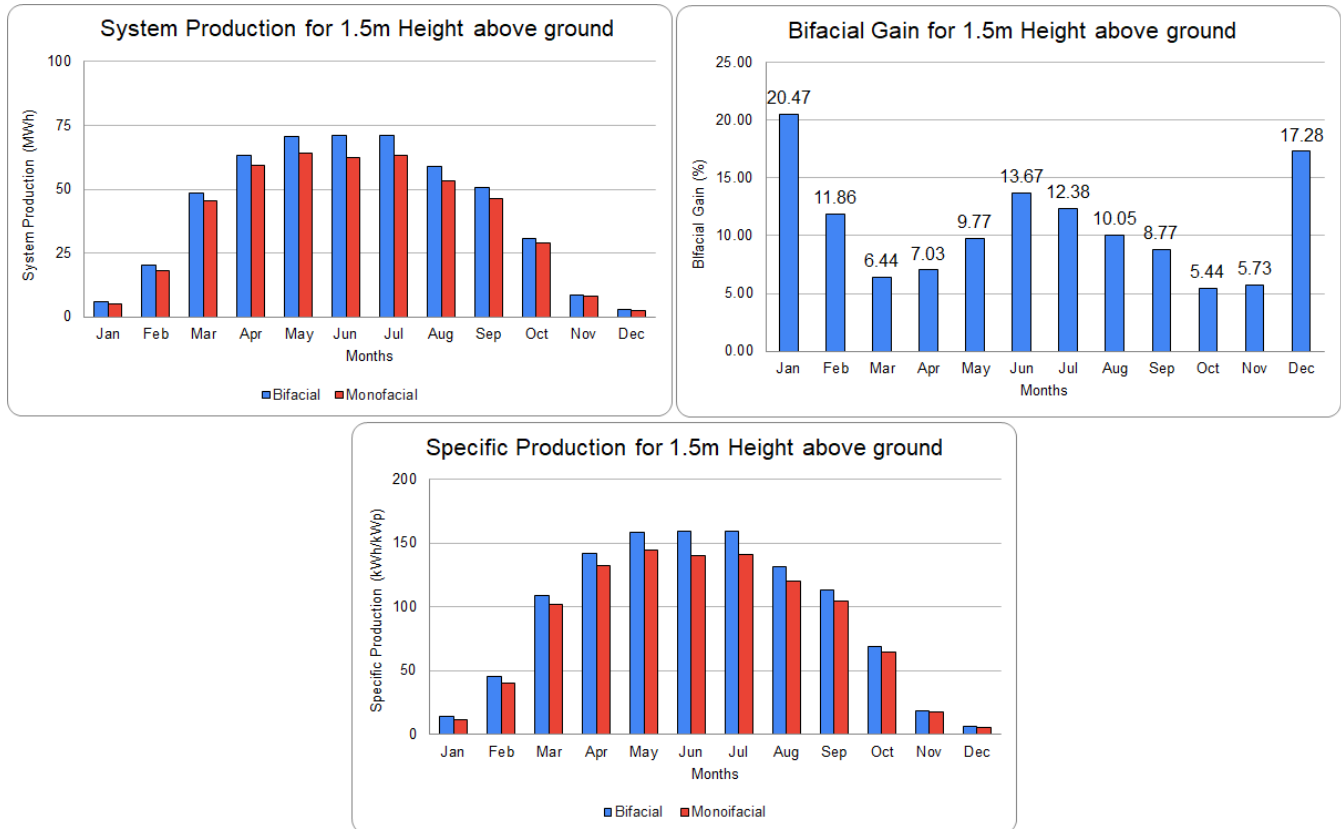


Εικόνα 5.22: Διαγράμματα για ανύψωση στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Παρατηρώντας την **Εικόνα 5.22**, για ανύψωση των φωτοβολταϊκών στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το φωτοβολταϊκό πάρκο των Bifacial φωτοβολταϊκών πλαισίων, αναφορικά με το System Production, αποκτά τιμές από 2.69 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 70.72MWh (τον Ιούνιο), ενώ των Monofacial από 2.3 μέχρι και 64.31MWh, για τους μήνες Δεκέμβριο και Μάιο αντίστοιχα.

Από την άλλη, το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από 6.02 (τον Δεκέμβριο) έως και 158.42kWh/kWp (τον Ιούνιο), ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 5.16 (τον Δεκέμβριο) μέχρι και 144.06kWh/kWp (το Μάιο).

Τέλος, το Bifacial Gain έχει εύρος τιμών από 5.59% (τον Νοέμβριο) μέχρι 19.77% (τον Ιανουάριο).

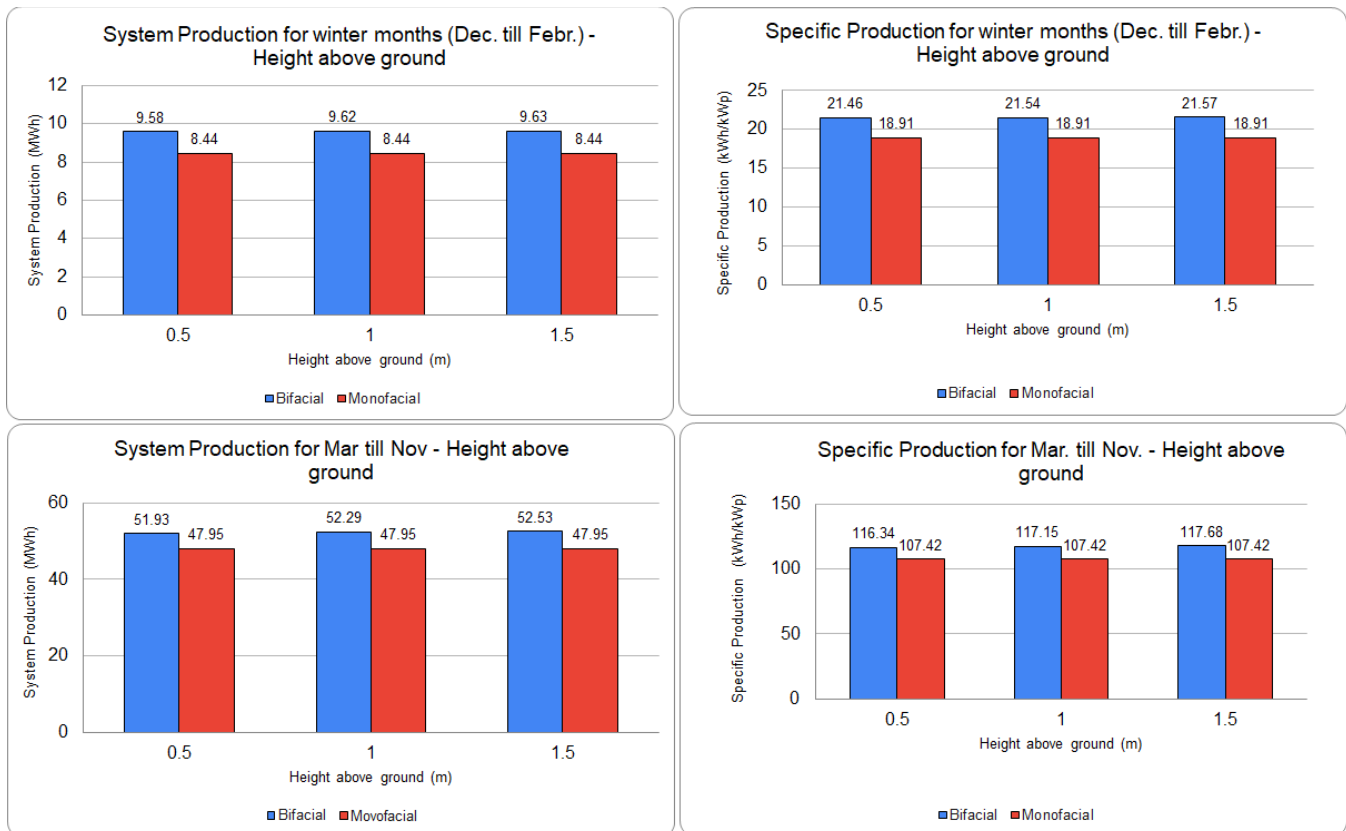


Εικόνα 5.23: Διαγράμματα για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα της **Εικόνας 5.23**, για τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, το System Production για το φωτοβολταϊκό πάρκο των Bifacial, λαμβάνει τιμές από 2.7 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 71.09MWh (τον Ιούνιο), ενώ των Monofacial, από 2.3 (τον Δεκέμβριο) μέχρι και 64.31MWh (το Μάιο).

Επίσης, το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από τις 6.06 έως και τις 159.26kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από τις 5.16 μέχρι 144.06kWh/kWp, με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές να αντιστοιχούν στους ίδιους μήνες όπως και για το System Production.

Τέλος, το Bifacial Gain λαμβάνει τιμές από 5.44% (τον Οκτώβριο) μέχρι 20.47% (τον Ιανουάριο).



Εικόνα 5.24: Διαγράμματα συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49]

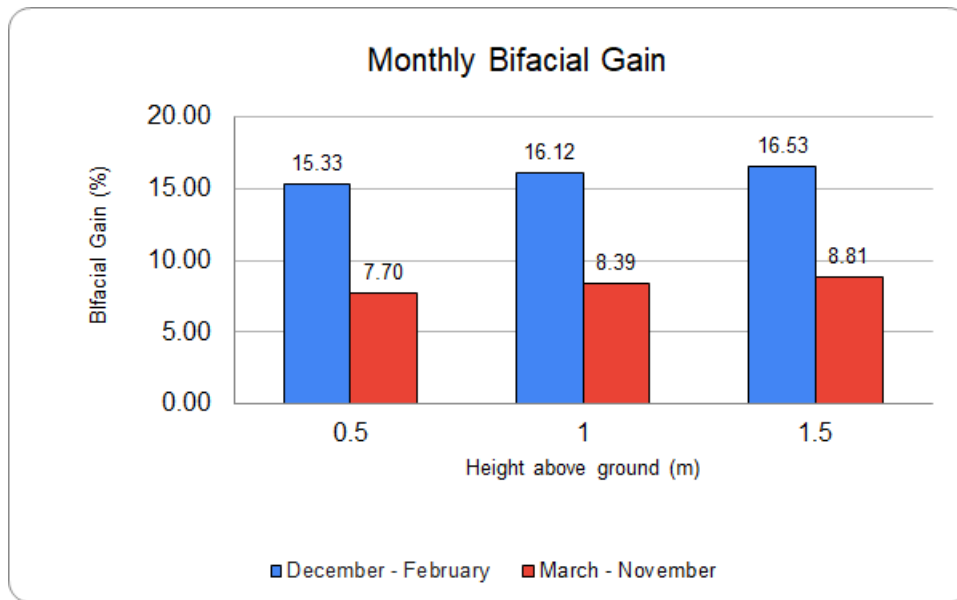
Αρχικά για την περίπτωση των χειμερινών μηνών (μέση τιμή του albedo ίση με 0.76), με βάση τα παραπάνω διαγράμματα της **Εικόνας 5.24**, παρατηρείται ότι το System Production των Bifacial παρουσιάζει πολύ μικρή μεταβολή με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από το έδαφος, ενώ για τα Monofacial διατηρείται σταθερό. Συνεπώς, για ανύψωση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα, το System Production των Bifacial είναι 9.58MWh και των Monofacial 8.44MWh, ενώ για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, είναι αντίστοιχα 9.63MWh και 8.44MWh.

Παρόμοια ισχύει και για την περίπτωση του Specific Production των χειμερινών μηνών. Όπως παρατηρούμε, για ανύψωση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, το Specific Production των Bifacial είναι 21.46kWh/kWp και των Monofacial 18.91kWh/kWp, ενώ για ανύψωση των πλαισίων στα 1.5 μέτρα, είναι αντίστοιχα 21.57kWh/kWp και 18.91kWh/kWp.

Όσον αφορά την περίπτωση των μηνών από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο (μέση τιμή του albedo ίση με 0.24), παρατηρούμε, ότι και εδώ, το System Production των Bifacial παρουσιάζει ελάχιστη μεταβολή με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από το έδαφος, ενώ

για τα Monofacial διατηρείται σταθερό. Οπότε, για ανύψωση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα, το System Production των Bifacial είναι 51.93MWh και των Monofacial 47.95MWh, ενώ για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, είναι αντίστοιχα 52.53 και 47.95MWh.

Όμοια, το Specific Production των Bifacial φωτοβολταϊκών, για τους μήνες από Μάρτιο έως Νοέμβριο, για τοποθέτηση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα, είναι 116.34kWh/kWp και των Monofacial 107.42kWh/kWp, ενώ για τα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, είναι αντίστοιχα 117.68kWh/kWp και 107.42kWh/kWp.



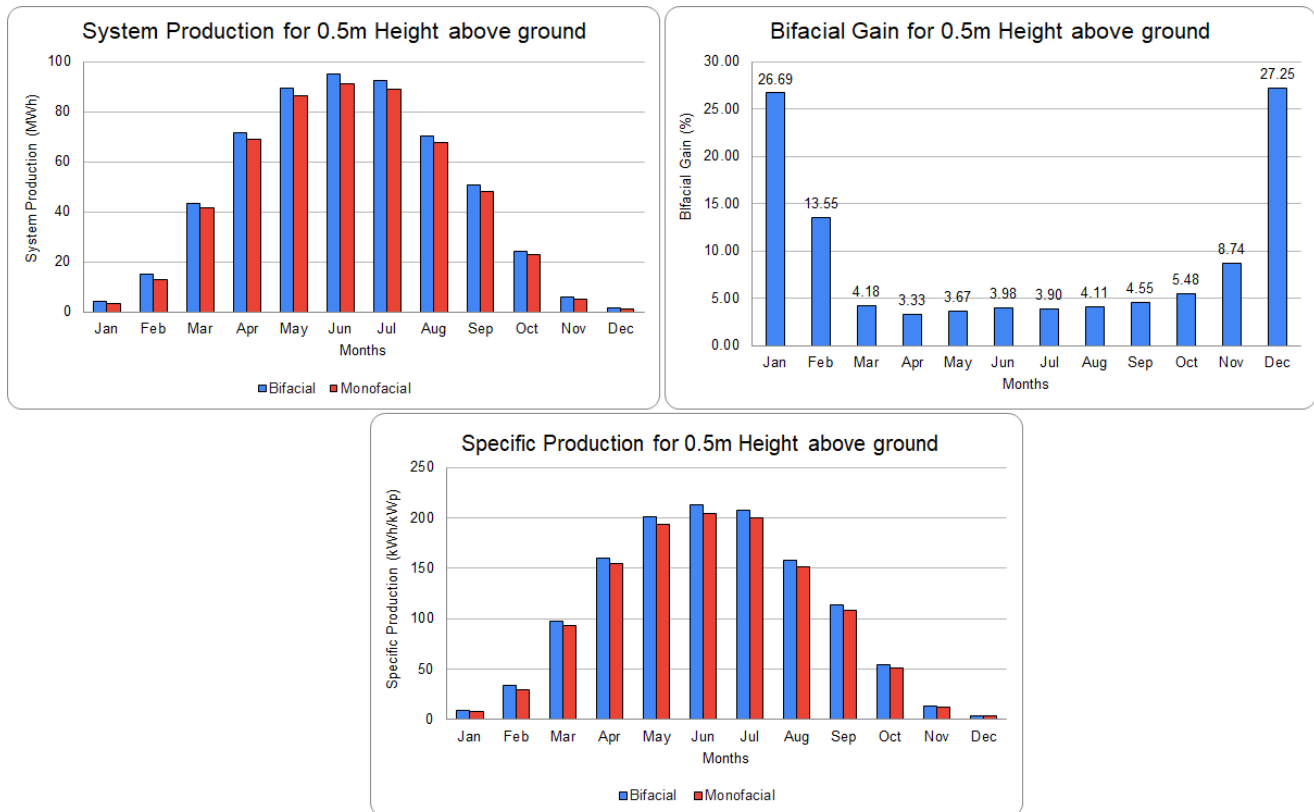
Εικόνα 5.25: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσει των υψών τοποθέτησης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για τους διάφορους μήνες [49]

Με βάση το διάγραμμα της **Εικόνας 5.25**, παρατηρείται ότι το Bifacial Gain, το οποίο είναι αρκετά πιο υψηλό κατά τους χειμερινούς μήνες, αυξάνει διαρκώς με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων πάνω από το έδαφος, για όλους τους μήνες του έτους.

Ειδικότερα, κατά την περίοδο των χειμερινών μηνών, αυξάνεται από 15.33% σε 16.53%, ενώ για τους υπόλοιπους μήνες, από 7.7% σε 8.81%, με τις τιμές να αντιστοιχούν σε ύψη τοποθέτησης 0.5 και 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

5.2.1.2 Αποτελέσματα για Tracking, horizontal axis N-S

- Height above ground modification (αποτελέσματα με μεταβολή της ανύψωσης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους)



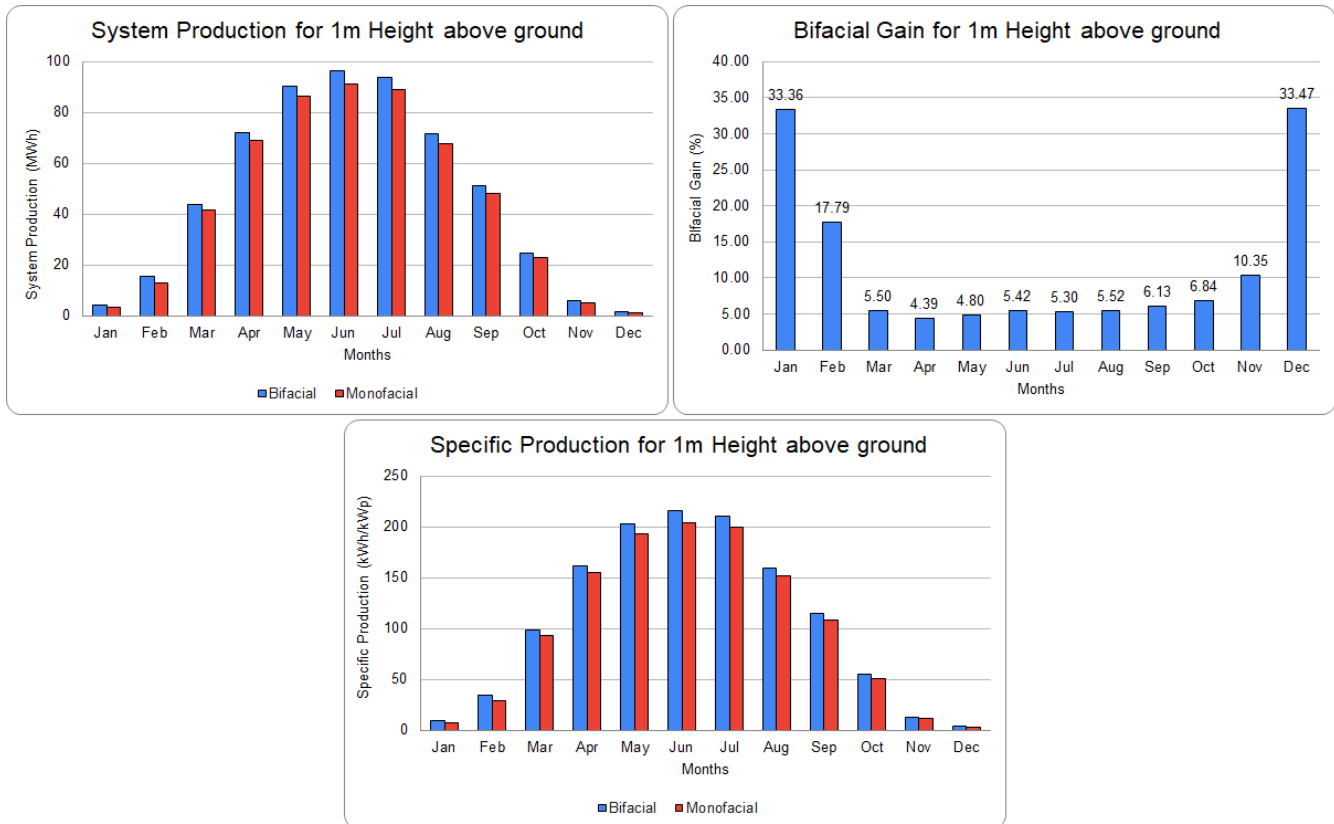
Εικόνα 5.26: Διαγράμματα για ανύψωση στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Από την **Εικόνα 5.26**, για ανύψωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, παρατηρείται ότι το System και το Specific Production αποκτούν τις μεγαλύτερες τους τιμές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (όπως και στα υπόλοιπα αντίστοιχα διαγράμματα συναρτήσεως του ύψους τοποθέτησης).

Ειδικότερα, το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών πλαισίων λαμβάνει τιμές από 1.69 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 94.83MWh (τον Ιούνιο), ενώ για τα Monofacial από τις 1.33 μέχρι και τις 91.24MWh, αντίστοιχα για τους παραπάνω μήνες.

Επιπλέον, το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως έχει εύρος τιμών από 3.8 έως και 212.55kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από 2.98 μέχρι και 204.4kWh/kWp, για τους αντίστοιχους μήνες όπως και στο System Production.

Τέλος, οι τιμές του Bifacial Gain κυμαίνονται από 3.33% (τον Απρίλιο) μέχρι 27.25% (τον Δεκέμβριο), με τις πιο βελτιωμένες τιμές του να αντιστοιχούν στους χειμερινούς μήνες, όπου και παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του albedo.

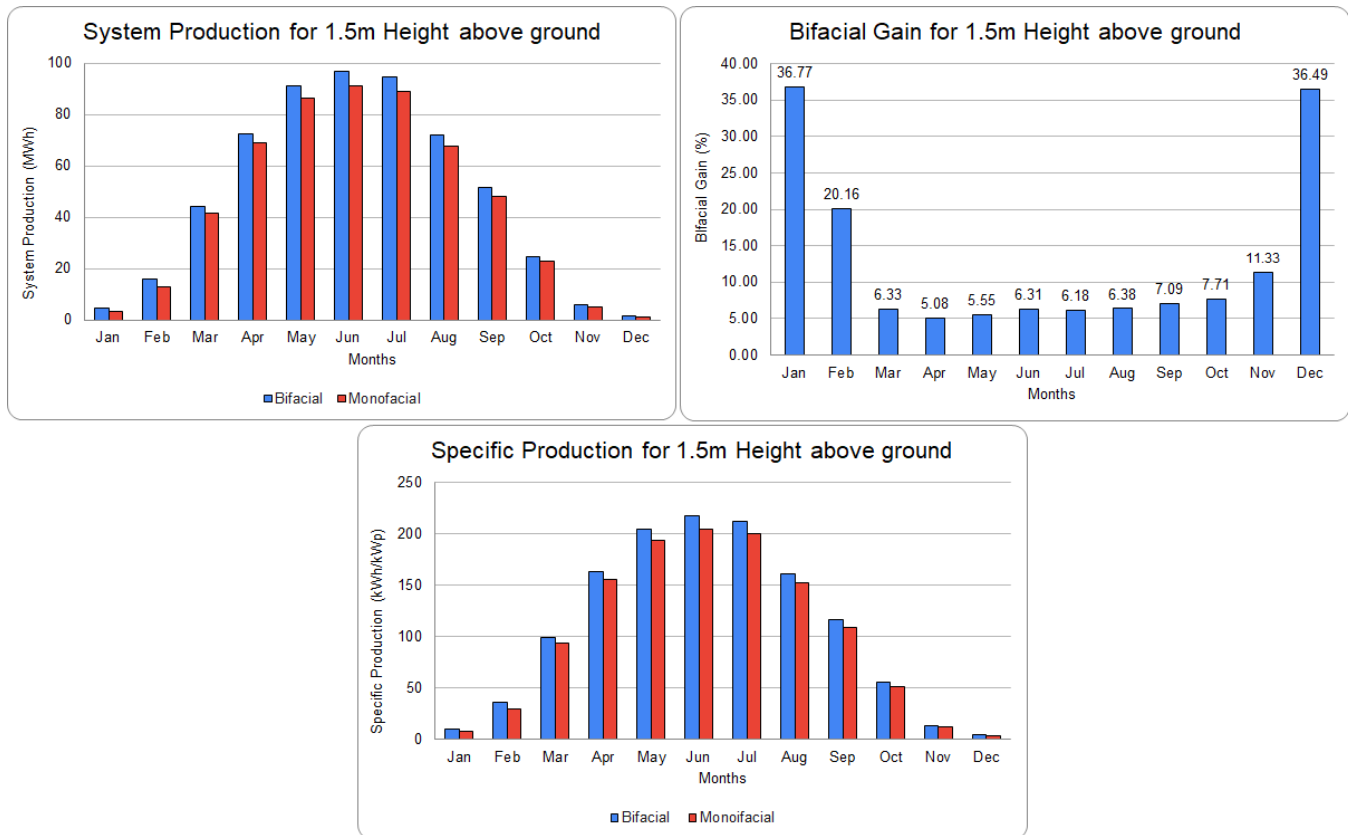


Εικόνα 5.27: Διαγράμματα για ανύψωση στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα της **Εικόνας 5.27**, για τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το System Production για το φωτοβολταϊκό πάρκο των Bifacial, λαμβάνει τιμές από 1.78 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 96.18MWh (τον Ιούνιο), ενώ των Monofacial, από 1.33 μέχρι και 91.24MWh, αντίστοιχα για τους παραπάνω μήνες.

Επίσης, το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως κυμαίνεται από τις 3.98 έως και τις 215.47kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής από τις 2.98 μέχρι 204.4kWh/kWp, με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές για τα δύο συστήματα, να αντιστοιχούν στους ίδιους μήνες όπως και για το System Production.

Τέλος, το Bifacial Gain λαμβάνει τιμές από 4.39% (τον Απρίλιο) μέχρι και 33.47% (τον Δεκέμβριο).

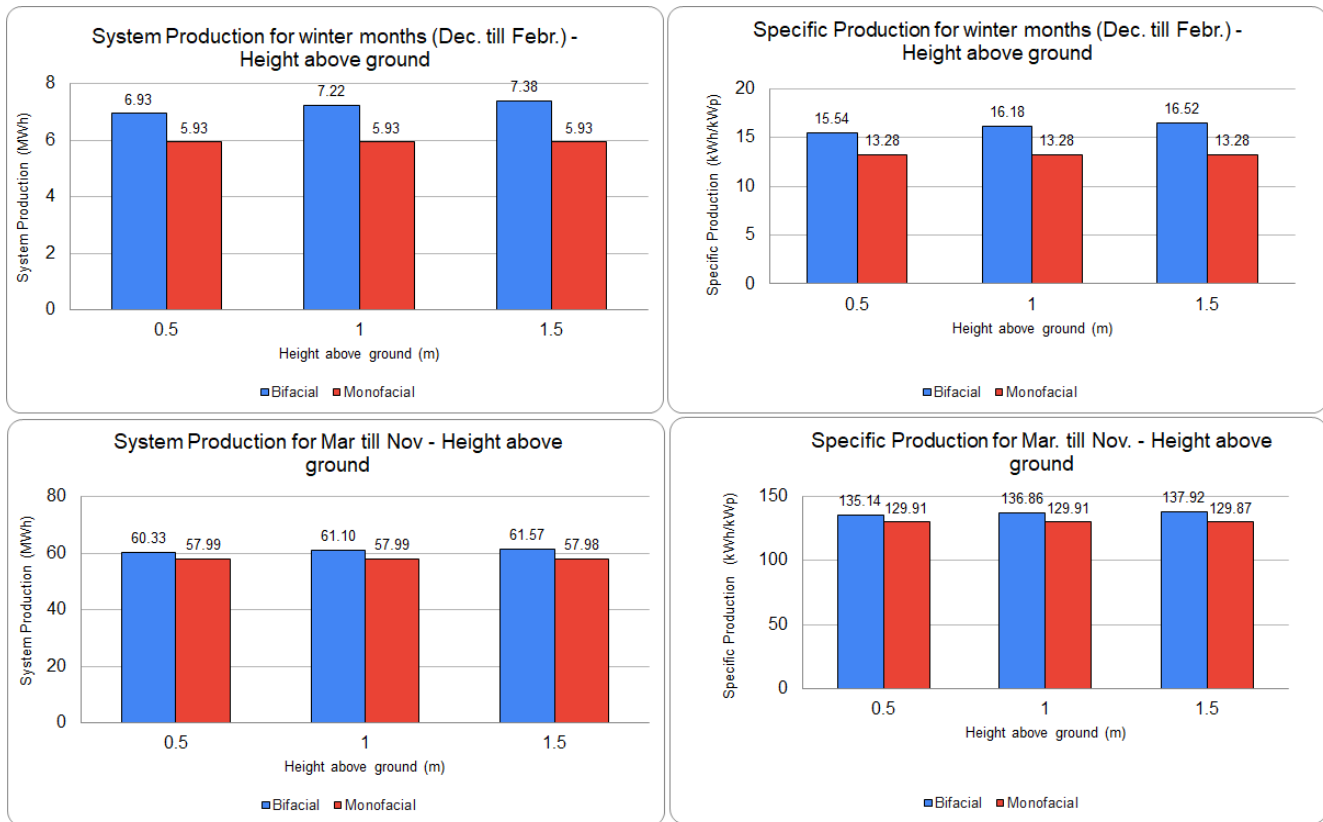


Εικόνα 5.28: Διαγράμματα για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]

Με βάση την **Εικόνα 5.28**, για ανύψωση των φωτοβολταϊκών στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, παρατηρείται ότι το System Production των Bifacial φωτοβολταϊκών πλαισίων λαμβάνει τιμές από 1.82 (τον Δεκέμβριο) μέχρι 96.97MWh (τον Ιούνιο), ενώ για τα Mono-facial από τις 1.33 μέχρι και τις 91.22MWh, αντίστοιχα για τους παραπάνω μήνες.

Το Specific Production για τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως έχει εύρος τιμών από 4.07 έως και 217.24kWh/kWp, ενώ για τα φωτοβολταϊκά μονής όψης, από 2.98 μέχρι και 204.35kWh/kWp, για τους αντίστοιχους μήνες όπως και παραπάνω.

Τέλος, οι τιμές του Bifacial Gain κυμαίνονται από 5.08% (τον Απρίλιο) μέχρι και 36.77% (τον Ιανουάριο).



Εικόνα 5.29: Διαγράμματα συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49]

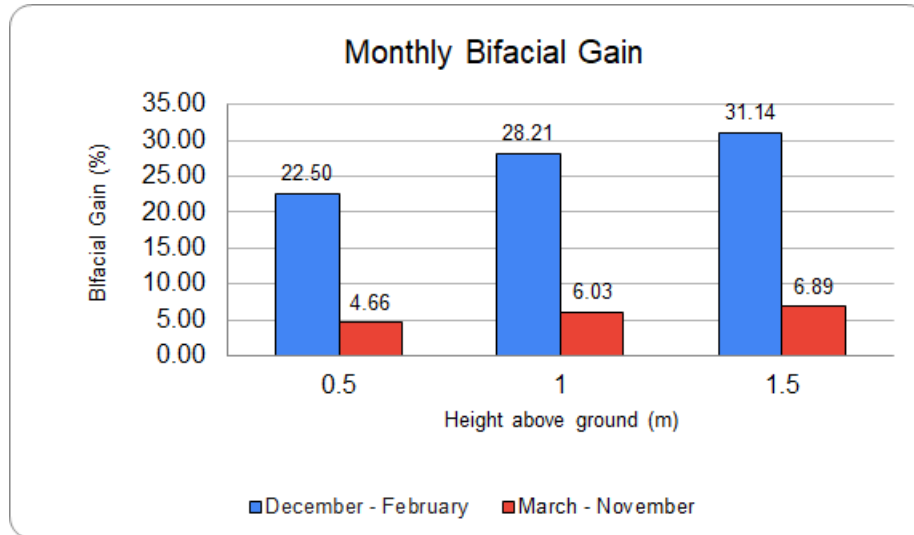
Αρχικά για την περίπτωση των χειμερινών μηνών (μέση τιμή του albedo ίση με 0.76), με βάση την **Εικόνα 5.29**, παρατηρείται ότι το System Production των Bifacial παρουσιάζει μία μικρή άνοδο με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από το έδαφος, ενώ για τα Monofacial διατηρείται σταθερό. Έτσι, για ανύψωση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, το System Production των Bifacial είναι 6.93MWh και των Monofacial 5.93MWh, ενώ για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, είναι αντίστοιχα 7.38MWh και 5.93MWh.

Παρόμοια ισχύει και για την περίπτωση του Specific Production των χειμερινών μηνών. Όπως παρατηρούμε, για ανύψωση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, το Specific Production των Bifacial είναι 15.54kWh/kWp και των Monofacial 13.28kWh/kWp, ενώ για ανύψωση των πλαισίων στα 1.5 μέτρα, είναι αντίστοιχα 16.52kWh/kWp και 13.28kWh/kWp.

Για την περίπτωση των μηνών από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο (μέση τιμή του albedo ίση με 0.24), παρατηρείται, ότι και εδώ, το System Production των Bifacial παρουσιάζει μικρή μεταβολή με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνω από το έδαφος, ενώ για τα Monofacial διατηρείται σχεδόν σταθερό. Οπότε, για ανύψωση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το System Production των Bifacial είναι 60.33MWh και των Monofacial

57.99MWh, ενώ για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, γίνεται αντίστοιχα 61.57 και 57.98MWh.

Όμοια, το Specific Production των Bifacial φωτοβολταϊκών, για τους μήνες από Μάρτιο έως Νοέμβριο, για τοποθέτηση των πλαισίων στα 0.5 μέτρα, είναι 135.14kWh/kWp και των Monofacial 129.91kWh/kWp, ενώ για τα 1.5 μέτρα πάνω από το έδαφος, είναι αντίστοιχα 137.92kWh/kWp και 129.87kWh/kWp.



Εικόνα 5.30: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για τους διάφορους μήνες [49]

Με βάση το διάγραμμα της **Εικόνας 5.30**, παρατηρείται ότι το Bifacial Gain, το οποίο είναι πολύ πιο υψηλό κατά τους χειμερινούς μήνες, λόγω των αυξημένων τιμών του albedo εκείνης της περιόδου, αυξάνει διαρκώς με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης των πλαισίων πάνω από το έδαφος καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Ειδικότερα, στους χειμερινούς μήνες, αυξάνεται από 22.5% σε 31.14%, ενώ για τους υπόλοιπους μήνες, από 4.66% σε 6.89%, με τις τιμές να αντιστοιχούν σε ύψη τοποθέτησης 0.5 και 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

6. Οικονομική Μελέτη

Στο σημείο αυτό, θα ακολουθήσει η περιγραφή της οικονομικής αξιολόγησης του φωτοβολταϊκού πάρκου, από bifacial Φ/Β πλαίσια, εγκατεστημένης ισχύος 450kWp στην Αιανή της Κοζάνης.

Η μελέτη θα πραγματοποιηθεί για σταθερή σχεδίαση, μέσα από το λογισμικό του PVsyst.

Οπότε θα εισαχθούν τα κατάλληλα δεδομένα, ώστε να διερευνηθεί εάν η επένδυση είναι βιώσιμη, υπολογίζοντας παράλληλα και το LCOE του πάρκου.

6.1 Αναφορά των οικονομικών δεδομένων

Καταρχάς, η επένδυσή θεωρείται ότι θα έχει χρονικό ορίζοντα 30 ετών [55], ενώ η εγκατάστασή τίθεται σε λειτουργία από το 2023.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν στο PVsyst, με βάση τις μέσες τιμές της ελληνικής αγοράς καθώς και διάφορες βιβλιογραφικές πηγές, τα οποία αφορούν το συνολικό κόστος της επένδυσης.

Έτσι, στον **Πίνακα 6.1**, παρουσιάζονται τα κόστη του Bifacial Φ/Β πλαισίου της εταιρίας Trina, 'Trina TSM-400DEG15HC.20(II)' [56], [57], τα κόστη του inverter 'BoschBPT-C200' [58], καθώς και τα κόστη εγκατάστασης των παραπάνω [49], [59], στα οποία έχουν συμπεριληφθεί τα διάφορα κόστη μεταφοράς, σύνδεσης στο δίκτυο, κλπ.

Πίνακας 6.1: Συνολικά κόστη επένδυσης για Φ/Β πάρκο με bifacial

	Ποσότητα	Κόστος Μονάδας (€)	Συνολικό Κόστος (€)
Φωτοβολταϊκά Πλαίσια	1116	160	178560
Inverters	2	6800	13600
Global Installation Cost per module	1116	180	200880
Global Installation Cost per inverter	2	350	700
Συνολικό Κόστος Επένδυσης			393740

Επίσης στον **Πίνακα 6.2**, παρουσιάζονται τα ετήσια κόστη συντήρησης και ασφάλειας, καθώς και οι οφειλόμενοι φόροι ανά έτος [35].

Πίνακας 6.2: Υπολογισμός ετήσιων δαπανών λειτουργίας

Κόστος συντήρησης ανά έτος (€ / year)	2600
Κόστος ασφάλειας ανά έτος (€ / year)	1500
Φόροι ανά έτος (€ / year)	6000
OPEX (€ / year)	10100

Τέλος, στον **Πίνακα 6.3** φαίνονται οι οικονομικοί παράμετροι που εισήχθησαν στο λογισμικό, ώστε να ολοκληρωθεί ο τελικός υπολογισμός της επένδυσης.

Σημειώνεται ότι το 60% της επένδυσης προέρχεται από δανειοδότηση και το υπόλοιπο 40% από Ιδία Κεφάλαια. Επιπλέον, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0.064 €/kWh [35].

Επίσης, υπολογίζεται ότι παράγονται ετήσια 717MWh για τις συνθήκες σχεδίασης που έχουν επιλεγεί, δηλαδή για ανύψωση των πλαισίων 1.5 μέτρο πάνω από το έδαφος και για σταθερή γωνία τοποθέτησης στις 25°. Ανάλογα πάντα με τη σχεδίαση που επιλέγεται, μεταβάλλονται τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης, καθώς διαφέρει και η ετήσια παραγόμενη ενέργεια.

Πίνακας 6.3: Οικονομικοί παράμετροι

Inflation (% / year) [60]	1.22
Discount rate (% / year) [35]	4
Income Tax (% / year)	10
Tax depreciation [59]	Straight line
Depreciable assets (€)	192160
Depreciation period (years) [49]	15
Salvage value (€) [49]	5000
Own funds (€)	157496
Loan - Redeemable with fixed amortization (€)	236244
Interest Rate (% / year) [49]	1

6.2 Χρήση PVsyst για οικονομική μελέτη

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστούν σχετικές εικόνες για την οικονομική αξιολόγηση, μέσα από το περιβάλλον του PVsyst.

Στην **Εικόνα 6.1**, γίνεται αναφορά στο 1^ο σκέλος της μελέτης (Investment and charges), το οποίο αφορά την εισαγωγή του συνολικού κόστους της εγκατάστασης, καθώς και των ετήσιων εξόδων για τη λειτουργία της.

Installation costs			
Description	Quantity	Unit price	Total
PV modules			178560.00 EUR
TSM-DEG15HC-20-(II)-400-...	1116.00	160.00	178560.00 EUR
Inverters			13600.00 EUR
BPT-C 200	2.00	6800.00	13600.00 EUR
Installation			201580.00 EUR
Global installation cost per ...	1116.00	180.00	200880.00 EUR
Global installation cost per i...	2.00	350.00	700.00 EUR
Total installation cost			393740.00 EUR
Depreciable asset			192160.00 EUR

Operating costs (yearly)	
Description	Yearly cost
Maintenance	2600.00 EUR
Insurance	1500.00 EUR
Taxes	6000.00 EUR
Subsidies	0.00 EUR
Operating costs (OPEX)	
	10100.00 EUR/year

Εικόνα 6.1: Συνολικές δαπάνες της εγκατάστασης και ετήσιες δαπάνες λειτουργίας στο PVsyst [49]

Στη συνέχεια, στην **Εικόνα 6.2**, παρουσιάζεται το 2^ο σκέλος δεδομένων του λογισμικού, το οποίο αφορά τις διάφορες οικονομικές παραμέτρους (Financial parameters) που εισήχθησαν.

Investment and charges | Financial parameters | Tariffs | Financial results | Carbon balance

Simulation period
 Project lifetime: 30 years | Start year: 2023

Projected variations
 Inflation: 1.22 %/year | Discount rate: 4.00 %/year
 Production variation (aging):
 Linear: -0.5 %/year | Aging tool results

Income dependent expenses
 Income tax: 10.00 %/year | Dividends: 0.00 %/year
 Other income tax: 0.00 %/year

Tax depreciation
 None | Straight-line | Declining balance
 Depreciable assets: 192160.00 EUR
 Salvage value: 5000.00 EUR
 Total redeemable: 187160.00 EUR
 Depreciation period: 15 years

Financing
 Investment: 393740.00 EUR
 Own funds: 157496.00 EUR
 Subsidies: 0.00 EUR
 Loans: +
 Redeemable with fixed amortization: 236244.00 EUR | 15 years | 1.00 %

■ Own funds 40 %
 ■ Loan 60 %

Εικόνα 6.2: Οικονομικές παράμετροι στο PVsyst [49]

Τέλος, στην **Εικόνα 6.3**, εισάγονται τα δεδομένα που σχετίζονται με την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας (Tariffs).

Investment and charges | Financial parameters | Tariffs | Financial results | Carbon balance

Pricing strategy
 Fixed tariff | Variable tariff
 Hourly peak/off-peak tariff
 Seasonal tariff
 Tariff from CSV file | Import

Feed-in tariff
 Fixed feed-in tariff: 0.0640 EUR/kWh

Other general parameters
 Annual connection tax: 0.000 EUR/year
 Annual tariff variation: 0.0 %/year
 Duration of tariff warranty: 30 years
 Feed-in tariff decrease after warranty: 0.0 %

Εικόνα 6.3: Τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας [49]

6.3 Αποτελέσματα οικονομικής μελέτης

Εφόσον όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό, γίνεται ο υπολογισμός για διάφορα μεγέθη, όπως την περίοδο αποπληρωμής, το ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE) και την Καθαρά Παρούσα Αξία (Net Present Value).

Αρχικά, το LCOE υπολογίζεται από την **Σχέση 6.1** [35]:

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{(I_t + M_t + T_t)}{(1+i)^n}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^n}} \quad (6.1)$$

Όπου ως I_t ορίζεται το τοκοχρεολύσιο για το έτος t και ως M_t , ορίζονται τα έξοδα συντήρησης και ασφάλισης για το ίδιο έτος [35]. Επιπλέον το T_t αντιστοιχεί στα έξοδα λόγω φορολογίας για το έτος t και ο όρος E_t στην παραχθείσα ενέργεια του ίδιου έτους [35].

Τέλος, το n αντιστοιχεί στον ορίζοντα της επένδυσης, ενώ το i στο προεξοφλητικό επιτόκιο [35].

Στη συνέχεια, στην **Σχέση 6.2** ακολουθεί ο τύπος υπολογισμού της Καθαρής Παρούσας Αξίας.

Το NPV, είναι ένας δείκτης, ο οποίος αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ των καθαρών κερδών κατά τη διάρκεια της επένδυσης, σε παρούσα αξία, ανοιγμένα στο 1^ο έτος λειτουργίας της εγκατάστασης, αφαιρώντας τα Ιδία Κεφάλαια που χρησιμοποίησε ο επενδυτής [35].

$$\text{NPV} = -C_{in} + \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (6.2)$$

Όπου ως C_{in} ορίζονται τα Ιδία Κεφάλαια του επενδυτή, ενώ οι όροι t και n αντιστοιχούν στο έτος και στον ορίζοντα της επένδυσης [35].

Επιπλέον, το R_t αντιστοιχεί στα καθαρά κέρδη του έτους t , ενώ το i στο προεξοφλητικό επιτόκιο [35].

Στον **Πίνακα 6.4**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επένδυσης.

Πίνακας 6.4: Οικονομικά Αποτελέσματα

NPV (€)	160333.66
Payback Period (years)	14.8
Return on Investment (%)	40.7
LCOE (€/kWh)	0.051

Εφόσον η Καθαρά Παρούσα Αξία είναι θετική, η επένδυση είναι βιώσιμη, με βάση τις παραμέτρους που έχουμε ορίσει. Επιπλέον, το λογισμικό, με βάση το εξαγόμενο LCOE, χαρακτηρίζει την επένδυση κερδοφόρα (profitable).

Από τον **Πίνακα 6.3**, κομβικό ρόλο για τα αποτελέσματα της επένδυσης σε βάθος χρόνου, διαδραματίζει η τιμή του ετήσιου φόρου εισοδήματος (Income Tax). Για παράδειγμα, εάν η τιμή του Income Tax ανερχόταν στο 29%, η περίοδος αποπληρωμής θα ήταν 18.5 έτη, το NPV θα δεχόταν μία μείωση στα 85555.58 ευρώ, ενώ το Return on investment θα αντιστοιχούσε σε 21.7%.

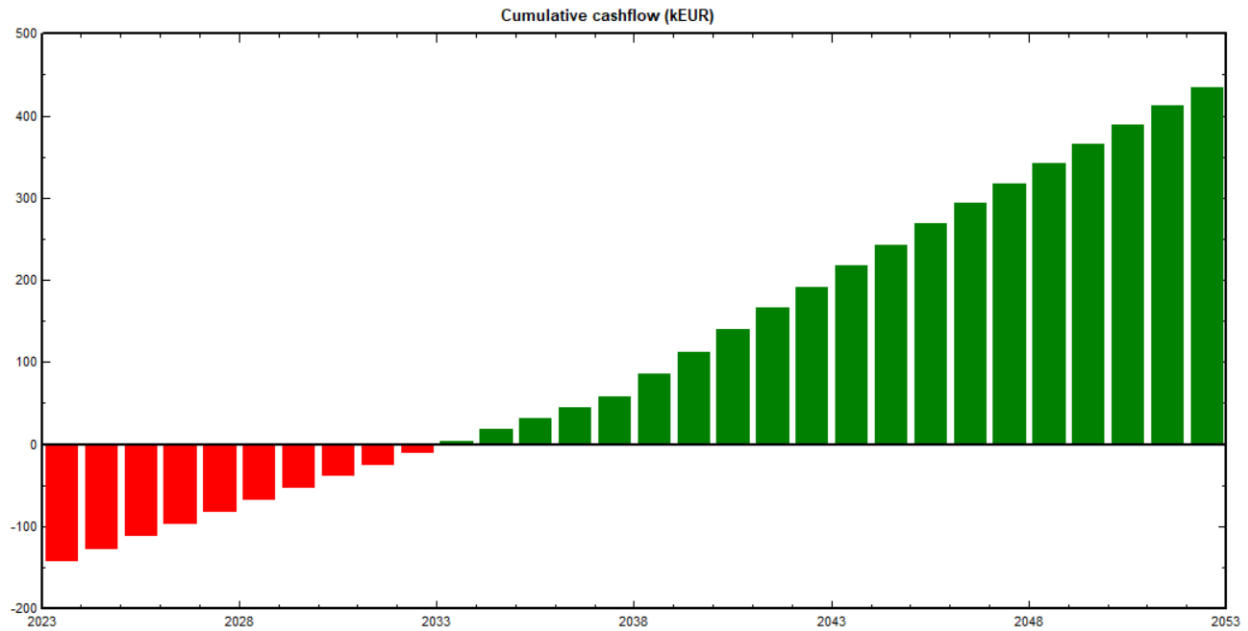
Με παρόμοιο τρόπο, επηρεάζονται τα αποτελέσματα, μεταβάλλοντας διάφορα μεγέθη όπως ο πληθωρισμός, το interest rate, το discount rate κλπ.

Στην **Εικόνα 6.4**, παρουσιάζονται τα αναλυτικά και τελικά οικονομικά αποτελέσματα για κάθε έτος της επένδυσης, όπως αυτά εξήχθησαν από το PVsyst.

Financial analysis										
Detailed economic results (EUR)										
	Electricity sale	Loan principal	Loan interest	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Cumul. profit	% amort.
2023	45919	15750	2362	10100	12477	20979	2098	15609	-142488	7.8%
2024	45689	15750	2205	10223	12477	20784	2078	15433	-128219	15.4%
2025	45461	15750	2047	10348	12477	20588	2059	15257	-114656	22.9%
2026	45233	15750	1890	10474	12477	20392	2039	15080	-101765	30.2%
2027	45007	15750	1732	10602	12477	20195	2020	14904	-89515	37.3%
2028	44782	15750	1575	10731	12477	19998	2000	14726	-77877	44.2%
2029	44558	15750	1417	10862	12477	19801	1980	14549	-66821	51.0%
2030	44335	15750	1260	10995	12477	19603	1960	14371	-56321	57.7%
2031	44114	15750	1102	11129	12477	19405	1941	14192	-46349	64.2%
2032	43893	15750	945	11265	12477	19206	1921	14013	-36882	70.6%
2033	43674	15750	787	11402	12477	19007	1901	13834	-27896	76.9%
2034	43455	15750	630	11541	12477	18807	1881	13654	-19368	83.1%
2035	43238	15750	472	11682	12477	18606	1861	13473	-11276	89.1%
2036	43022	15750	315	11825	12477	18405	1840	13292	-3600	95.1%
2037	42807	15750	157	11969	12477	18203	1820	13111	3679	100.9%
2038	42593	0	0	12115	0	30478	3048	27430	18325	104.7%
2039	42380	0	0	12263	0	30117	3012	27105	32240	108.2%
2040	42168	0	0	12412	0	29756	2976	26780	45459	111.5%
2041	41957	0	0	12564	0	29393	2939	26454	58015	114.7%
2042	41747	0	0	12717	0	29030	2903	26127	69939	117.8%
2043	41538	0	0	12872	0	28666	2867	25800	81261	120.6%
2044	41331	0	0	13029	0	28302	2830	25472	92009	123.4%
2045	41124	0	0	13188	0	27936	2794	25142	102210	126.0%
2046	40919	0	0	13349	0	27570	2757	24813	111890	128.4%
2047	40714	0	0	13512	0	27202	2720	24482	121074	130.7%
2048	40510	0	0	13677	0	26834	2683	24150	129784	133.0%
2049	40308	0	0	13844	0	26464	2646	23818	138045	135.1%
2050	40106	0	0	14012	0	26094	2609	23484	145876	137.0%
2051	39906	0	0	14183	0	25722	2572	23150	153299	138.9%
2052	39706	0	0	14356	0	25350	2535	22815	160334	140.7%
Total	1282193	236244	18900	363240	187160	712893	71289	592520	160334	140.7%

Εικόνα 6.4: Οικονομικά αποτελέσματα από το PVsyst [49]

Στην **Εικόνα 6.5**, παρουσιάζεται το διάγραμμα των ταμειακών ροών της επένδυσης, όπου φαίνεται ότι η επένδυση αποφέρει κέρδος μετά το 10^ο έτος.



Εικόνα 6.5: Διάγραμμα ταμειακών ροών ανά έτος [49]

Εν κατακλείδι, με βάση όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, η επένδυση κρίνεται βιώσιμη και επικερδής, εξαρτώμενη πάντα από τις αντίστοιχες παραμέτρους που εισήχθησαν στο λογισμικό.

7. Συμπεράσματα - προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μελέτη για τα Bifacial φωτοβολταϊκά. Αρχικά, έγινε μία εισαγωγή για την ενεργειακή κατάσταση με σκοπό να γίνει κατανοητός ο λόγος που ο άνθρωπος στρέφεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Έτσι, στη συνέχεια έγινε ανάλυση της ηλιακής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα του τρόπου με τον οποίο ο άνθρωπος την εκμεταλλεύεται.

Εφόσον, το θέμα της παρούσας διπλωματικής είναι τα bifacial φωτοβολταϊκά πραγματοποιήθηκε μία εκτενής αναφορά σε αυτά, ενώ έγινε εμβάθυνση στη σύγκρισή τους με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά.

Δόθηκε έμφαση στον τρόπο με τον οποίο αυτά κατασκευάζονται, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν. Αυτό έγινε με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας τους, αλλά και την άμεση σύγκρισή τους με τα συμβατικά, δηλαδή τα φωτοβολταϊκά μονής όψης. Για την καλύτερη σύγκριση τους όμως, πραγματοποιήθηκε και παραμετρική μελέτη χρησιμοποιώντας το λογισμικό PVsyst, όπου έγινε σύγκριση δύο παρόμοιων φωτοβολταϊκών πάρκων, ένα με διπλής όψης και ένα με μονής όψης, σε δύο χώρες και κάνοντας χρήση διαφορετικών παραμέτρων κάθε φορά.

Οπότε, από την παραπάνω σύγκριση γίνεται κατανοητό ότι τα bifacial φωτοβολταϊκά έχουν σαν κύριο πλεονέκτημα το επιπλέον κέρδος λόγω της εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας και από την οπίσθια όψη τους και σε περιοχές όπου παρουσιάζεται υψηλό albedo. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα επιπλέον κέρδος της τάξεως του 20% ετησίως.

Επιπλέον, ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους στο χρόνο, κάτι που επιτυγχάνεται και με την εμφάνιση υψηλής ανθεκτικότητας στις διαβρώσεις και στις μηχανικές καταπονήσεις. Ως αποτέλεσμα, παράγεται περισσότερη ενέργεια και μειώνονται τα λειτουργικά κόστη.

Από την άλλη, τα φωτοβολταϊκά διπλής όψεως είναι βαρύτερα, ενώ παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος αγοράς, αλλά και κατασκευής, καθώς χρησιμοποιούν πιο σύγχρονες και περίπλοκες τεχνολογίες. Όπως προαναφέρθηκε, έχουν γυάλινη οπίσθια όψη, και συνεπώς απαιτείται πιο εξειδικευμένη διαδικασία εγκατάστασης, ώστε να επιτύχουν τελικά τις προβλεπόμενες επιδόσεις τους, στο μέγιστο βαθμό.

Τέλος, από την οικονομική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, έγινε αντιληπτό ότι ένα πάρκο με φωτοβολταϊκά διπλής όψεως για τυπικές τιμές όπως χρησιμοποιήθηκαν είναι βιώσιμο. Εν ολίγοις, γίνεται γρήγορα απόσβεση των χρημάτων και παρουσιάζεται κέρδος.

Συμπερασματικά, από την ανάλυση και τη μελέτη που έγινε, γίνεται άμεσα κατανοητό ότι η τεχνολογία των bifacial φωτοβολταϊκών φέρει πολλά πλεονεκτήματα. Αυτά μπορούν να υπερिशύσουν των μειονεκτημάτων και να τα καταστήσουν ανταγωνιστή των τυπικών – mono-facial φωτοβολταϊκών, που αποτελούν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Η χρήση τους μπορεί να γίνει σε όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα, καθώς και σε καινούριες, αξιοποιώντας το βασικό πλεονέκτημα τους δηλαδή της χρήσης και της οπίσθιας όψης.

Στην παρούσα εργασία έγινε ανάλυση των bifacial φωτοβολταϊκών και κυρίως η σύγκρισή τους με τα monofacial. Το θέμα αυτό μπορεί να αναπτυχθεί ακόμα περισσότερο. Κάποιες προτάσεις πάνω σε αυτό το ζήτημα δηλαδή των bifacial φωτοβολταϊκών είναι οι εξής:

- Χρήση του PVsyst για περισσότερες περιοχές με διαφορετικό κλίμα
- Σύγκριση ανάμεσα σε δύο διαφορετικά μοντέλα bifacial φωτοβολταϊκών
- Εμβάθυνση στον τρόπο λειτουργίας bifacial φωτοβολταϊκών και την καλύτερη αξιοποίηση τους σε νέες εφαρμογές
- Μελέτη των bifacial φωτοβολταϊκών σε multilevel solar panel systems, για την εξοικονόμηση χώρου
- Μελέτη νέων υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα bifacial φωτοβολταϊκά με σκοπό τη μείωση του κόστους
- Εστίαση στους λόγους υποβάθμισης των bifacial φωτοβολταϊκών και εύρεση τρόπων αντιμετώπισης αυτών

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση από το 1965 έως το 2021 [1]	9
Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων από το 1965 έως το 2021 [1]	10
Εικόνα 1.3: Συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια από φωτοβολταϊκά πάνελ [3]	11
Εικόνα 1.4: Ανεμογεννήτριες στα ανοιχτά των ακτών των ΗΠΑ [4].....	12
Εικόνα 1.5: Υδροηλεκτρικό Φράγμα στη Σλοβενία [5]	12
Εικόνα 1.6: Αναδυόμενος Ατμός από Γεωθερμικό Σταθμό στην Ισλανδία [6].....	13
Εικόνα 1.7: Θαλάσσια ενέργεια από κύματα [7].....	13
Εικόνα 1.8: Γεωργική Βιομάζα που προορίζεται για ενεργειακή χρήση [9].....	14
Εικόνα 2.1: Αύξων αριθμός της ημέρας του έτους, n , μέση ημέρα κάθε μήνα και αντίστοιχη τιμή της ηλιακής απόκλισης δ [12].....	17
Εικόνα 2.2: Ηλιακή απόκλιση δ , συναρτήσε των ημερών του έτους [13].....	18
Εικόνα 2.3: Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες [15]	22
Εικόνα 2.4: Επιμέρους τμήματα ηλιακού συλλέκτη [16]	22
Εικόνα 2.5: Συλλέκτες κενού [17]	23
Εικόνα 2.6: Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες [18].....	24
Εικόνα 2.7: Φωτοβολταϊκά συστήματα [19]	24
Εικόνα 2.8: Ένωση p-n [22]	27
Εικόνα 2.9: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [23]	27
Εικόνα 2.10: Φωτοβολταϊκό κελί πάνω αριστερά, πλαίσιο πάνω δεξιά, πάνελ κάτω αριστερά και συστοιχία κάτω δεξιά [26].....	28
Εικόνα 2.11: Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου [28]	29
Εικόνα 2.12: Φωτοβολταϊκό άμορφου πυριτίου [29]	30
Εικόνα 2.13: Φωτοβολταϊκά Τελλουριούχου καδμίου [29].....	31
Εικόνα 2.14: Φωτοβολταϊκό Δισελινοϊνδιούχου χαλκού [31].....	31
Εικόνα 3.1: Πρόβλεψη διεξόδου Bifacial Φωτοβολταϊκών έως το 2030 [39]	33
Εικόνα 3.2: Λειτουργία φωτοβολταϊκού διπλής όψης [41].....	34
Εικόνα 3.3: Bifacial p-type PERC+ [42].....	36
Εικόνα 3.4: Bifacial n-PERT [42].....	37
Εικόνα 3.5: nIBC Bifacial Cell [32].....	37
Εικόνα 3.6: Τιμές του albedo για διαφορετικές επιφάνειες [42].....	38
Εικόνα 3.7: Μέτρηση bifacial gain ενός bifacial φωτοβολταϊκού σε διαφορετικές επιφάνειες [45]	39
Εικόνα 3.8: Μεταβολή Bifacial gain με βάση το ύψος του φωτοβολταϊκού για διαφορετικές τοποθεσίες [46]	40
Εικόνα 3.9: Μεταβολή Bifacial gain με βάση την κλίση του φωτοβολταϊκού για διαφορετικές τοποθεσίες [46]	41
Εικόνα 3.10: Ορισμός αξονικής απόστασης (pitch) [44].....	41
Εικόνα 4.1: Συστήματα μοντελοποίησης [49].....	44
Εικόνα 4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων από την Προσομοίωση [49]	45

Εικόνα 4.3: 3D Απεικόνιση φωτοβολταϊκού πάρκου [49]	46
Εικόνα 4.4: Παρουσίαση χαρακτηριστικών ηλεκτρικού εξοπλισμού Φ/Β πάρκου [49]	48
Εικόνα 4.5: Πίνακας Μηνιαίων Μετεωρολογικών Δεδομένων για την Αιανή της Κοζάνης [49]	49
Εικόνα 4.6: Απεικόνιση των μεγεθών του Φ/Β πλαισίου [61]	51
Εικόνα 4.7: Αξονική Απόσταση Φ/Β πλαισίων [49]	52
Εικόνα 4.8: Προσομοίωση Φ/Β πάρκου Σταθερών Βάσεων Στήριξης [49]	52
Εικόνα 4.9: Γραμμή Ορίζοντα Αιανής [49]	53
Εικόνα 4.10: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης για την Αιανή (Fixed Tilted Plane) [49]	54
Εικόνα 4.11: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης για την Αιανή (Fixed Tilted Plane) [49]	55
Εικόνα 4.12: Προσομοίωση Φ/Β πάρκου με Ιχνηλάτες Ενιαίου Άξονα [49]	56
Εικόνα 4.13: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης για την Αιανή (Single Axis Tracking) [49]	57
Εικόνα 4.14: Πίνακας Μηνιαίων Μετεωρολογικών Δεδομένων για την Βεστερός της Σουηδίας [49]	58
Εικόνα 4.15: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει της γωνίας τοποθέτησης για τη Βεστερός (Fixed Tilted Plane) [49]	60
Εικόνα 4.16: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης για τη Βεστερός (Fixed Tilted Plane) [49]	61
Εικόνα 4.17: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης για τη Βεστερός (Single Axis Tracking) [49]	62
Εικόνα 5.1: Διαγράμματα στις 25°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	63
Εικόνα 5.2: Διαγράμματα στις 35°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	64
Εικόνα 5.3: Διαγράμματα στις 45°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	65
Εικόνα 5.4: Διαγράμματα συναρτήσει των γωνιών τοποθέτησης: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49]	66
Εικόνα 5.5: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσει των γωνιών τοποθέτησης για τους διάφορους μήνες [49]	67
Εικόνα 5.6: Διαγράμματα για ανύψωση στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	68
Εικόνα 5.7: Διαγράμματα για ανύψωση στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	69
Εικόνα 5.8: Διαγράμματα για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	70

Εικόνα 5.9: Διαγράμματα συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49].....	71
Εικόνα 5.10: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για τους διάφορους μήνες [49].....	72
Εικόνα 5.11: Διαγράμματα για ανύψωση στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	73
Εικόνα 5.12: Διαγράμματα για ανύψωση στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	74
Εικόνα 5.13: Διαγράμματα για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	75
Εικόνα 5.14: Διαγράμματα συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49].....	76
Εικόνα 5.15: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για τους διάφορους μήνες [49].....	77
Εικόνα 5.16: Διαγράμματα στις 25° : System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	78
Εικόνα 5.17: Διαγράμματα στις 35°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	79
Εικόνα 5.18: Διαγράμματα στις 45°: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49]	80
Εικόνα 5.19: Διαγράμματα συναρτήσεως των γωνιών τοποθέτησης: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific [49].....	81
Εικόνα 5.20: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσεως των γωνιών τοποθέτησης για τους διάφορους μήνες [49].....	82
Εικόνα 5.21: Διαγράμματα για ανύψωση στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	83
Εικόνα 5.22: Διαγράμματα για ανύψωση στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	84
Εικόνα 5.23: Διαγράμματα για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	85
Εικόνα 5.24: Διαγράμματα συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production για τους χειμερινούς μήνες	

πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49].....	86
Εικόνα 5.25: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για τους διάφορους μήνες [49].....	87
Εικόνα 5.26: Διαγράμματα για ανύψωση στα 0.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	88
Εικόνα 5.27: Διαγράμματα για ανύψωση στο 1 μέτρο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	89
Εικόνα 5.28: Διαγράμματα για ανύψωση στα 1.5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production αριστερά, Bifacial Gain δεξιά και Specific Production κάτω [49].....	90
Εικόνα 5.29: Διαγράμματα συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους: System Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω αριστερά, Specific Production για τους χειμερινούς μήνες πάνω δεξιά, System Production για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Νοέμβριο κάτω αριστερά και Specific Production για τους ίδιους μήνες κάτω δεξιά [49].....	91
Εικόνα 5.30: Διάγραμμα του Bifacial Gain συναρτήσεως των υψών τοποθέτησης πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για τους διάφορους μήνες [49].....	92
Εικόνα 6.1: Συνολικές δαπάνες της εγκατάστασης και ετήσιες δαπάνες λειτουργίας στο PVsyst [49]	95
Εικόνα 6.2: Οικονομικές παράμετροι στο PVsyst [49]	96
Εικόνα 6.3: Τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας [49]	96
Εικόνα 6.4: Οικονομικά αποτελέσματα από το PVsyst [49]	98
Εικόνα 6.5: Διάγραμμα ταμειακών ροών ανά έτος [49].....	99

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Γεωγραφικά Δεδομένα, Αιανή Κοζάνης [49]	49
Πίνακας 4.2: Μηνιαίες Τιμές Albedo [35]	50
Πίνακας 4.3: Γεωγραφικά Δεδομένα, Βεστερός Σουηδίας [49]	58
Πίνακας 6.1: Συνολικά κόστη επένδυσης για Φ/Β πάρκο με bifacial	93
Πίνακας 6.2: Υπολογισμός ετήσιων δαπανών λειτουργίας	94
Πίνακας 6.3: Οικονομικοί παράμετροι	94
Πίνακας 6.4: Οικονομικά Αποτελέσματα	97

Αναφορές

- [1] Hannah Ritchie, Max Roser, Pablo Rosado, «Energy,» *Our World in Data*, 2022.
- [2] «World population to reach 8 billion on 15 November 2022,» United Nations, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.un.org/en/desa/world-population-reach-8-billion-15-november-2022>.
- [3] Wikipedia, «Solar energy,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy.
- [4] The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) , «energy.gov,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-energy-technologies-office>.
- [5] National Geographic, «Hydroelectric Energy,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/hydroelectric-energy>.
- [6] Wikipedia, «Geothermal_energy,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_energy.
- [7] IRENA, «IRENA and Ocean Energy Europe Partner to Drive Ocean Energy Industry,» 1 December 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.irena.org/news/pressreleases/2020/Dec/IRENA-and-Ocean-Energy-Europe-Partner-to-Drive-Ocean-Energy-Industry>.
- [8] Wikipedia, «Βιομάζα,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B9%CE%BF%CE%BC%CE%AC%CE%B6%CE%B1>.
- [9] Davine Janssen, «The Dutch have decided: Burning biomass is not sustainable,» EURACTIV, 21 July 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.euractiv.com/section/energy/news/the-dutch-have-decided-burning-biomass-is-not-sustainable/>.
- [10] Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, Θερμικά - Ηλιακά Συστήματα, τόμ. 1, Αθήνα, 2011.
- [11] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε., ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ, Αθήνα, 2012.
- [12] J. A. Duffie, Solar Energy Of Thermal Processes, 4th επιμ., John Wiley & Sons, 2013.
- [13] Α. Ζερβός, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.
- [14] D. Y. Goswami, «Ηλιακή Ενέργεια για Μηχανικούς,» Αθήνα, 2021.
- [15] «ENERGY GAS CENTER,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.gastherm.gr/oikiakes-efarmoges/iliaka/>.
- [16] «ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ & ΗΛΙΑΚΟΙ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΕΣ ECO SOL,» 22 Απρίλιος 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://thermansinews.blogspot.com/2015/04/eco-sol.html>.
- [17] «Ηλιακοί συλλέκτες κενού auroTHERM exclusive,» Θερμογκαζ, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://thermogaz.gr/product-detail/iliakoi-syllektes-kenoy-aurotherm-exclusive-vaillant/>.

- [18] Ευάγγελος Μπέλλος & Χρήστος Τζιβανίδης, «Παραβολικός επιμήκης ηλιακός θερμικός συλλέκτης,» *Θερμουδραυλικός*, 21 Οκτωβρίου 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thermohydravlikos.gr/paravolikos-epimikis-iliakos-thermikos-syllektis/>.
- [19] Yiamco Engineering, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.yiamco.gr/>.
- [20] Wikipedia, «Passive solar building design,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_solar_building_design.
- [21] Wikipedia, «Ημιαγωγός,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BC%CE%B9%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CF%8C%CF%82>.
- [22] «Δίοδος σε ορθή πόλωση,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://users.sch.gr/kgiannaras/genika-ilektronika/diodos-se-orthi-polosi.html>.
- [23] Amy Beaudet, «How Do Solar Panels Work?,» 19 October 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.altestore.com/blog/2015/10/how-do-solar-panels-work/>.
- [24] Σ. Πασσίσης, *Οικονομοτεχνική Μελέτη Διαστασιολόγησης Φωτοβολταϊκών Στέγης για Διασύνδεση με το Ηλεκτρικό Δίκτυο*, Χανιά, 2018.
- [25] Κ. Παπακωνσταντίνου, *Μελέτη Διαστασιολόγησης και Ενσωμάτωσης στο Δίκτυο Φωτοβολταϊκών-Αποθηκευτικών Συστημάτων υπό τον Θεσμό της Ιδιοκατανάλωσης*, Αθήνα, 2015.
- [26] FLORIDA SOLAR ENERGY CENTER, «Cells, Modules & Arrays,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_Electricity/basics/cells_modules_arrays.htm.
- [27] Zhang, Tiantian and Wang, Meng and Yang, Hongxing, «A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems,» *Energies*, τόμ. 11, p. 3157, 2018.
- [28] SOLAR ZONE, «ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eco2day.gr/%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC-%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%BB/%CE%BA%CF%81%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%8D-%CF%80%CF%85%CF%81%CE%B9%CF%84%CE%AF%CE%BF%CF%85/?fbclid>.
- [29] «ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://microkosmos.uoa.gr/gr/magazine/ergasies_foititon/ettap/2010-11/photovoltaic/thin_film.htm.
- [30] Wikipedia, «Cadmium telluride photovoltaics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cadmium_telluride_photovoltaics.
- [31] PHIL KREVELD, «CIS/CIGS SOLAR PANELS EXPLAINED,» *Electrical Connection*, 22 September 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://electricalconnection.com.au/ciscigs-solar-panels-explained/>.
- [32] Wikipedia, «Bifacial solar cells,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Bifacial_solar_cells#History_of_the_bifacial_solar_cell.
- [33] A. Cuevas, «The early history of bifacial solar cells,» 2005.

- [34] Moehlecke, A., Zanesco, I., Luque, A., Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC), τόμ. 2, 1994, pp. 1663-1666.
- [35] Κουρκουραϊδης Θ., Βέλτισση Σχεδίαση Bifacial Φ/Β Εγκαταστάσεων, 2020.
- [36] ANTON NYGREN, ELIN SUNDSTRÖM, Evaluating the albedo impact on bifacial PV systems based on case studies in Denver, USA and Västerås, Sweden, B. Stridh, Επιμ., 2021.
- [37] Kopecek, Radovan and Libal, Joris, «Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges,» *Energies*, τόμ. 14, 2021.
- [38] M. Tahir Patel and Ramachandran A. Vijayan and Reza Asadpour and M. Varadharajaperumal and M. Ryyan Khan and Muhammad A. Alam, «Temperature-dependent energy gain of bifacial PV farms: A global perspective,» *Applied Energy*, τόμ. 276, 2020.
- [39] «International Technology Roadmap for Photovoltaic,» VDMA, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic>.
- [40] Ayala Pelaez, Silvana, Bifacial Solar Panels System Design, Modeling, and Performance, The University of Arizona, 2019.
- [41] «Bifacial solar panels: innovative and more efficient,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.solarreviews.com/blog/bifacial-solar-panels>.
- [42] IEA, «Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications,» International Energy Agency, 2021.
- [43] «IBC Solar Cells».
- [44] LG Electronics Inc., «BIFACIAL DESIGN GUIDE,» 2017.
- [45] Chiodetti, Matthieu and Lindsay, Amy and Dupeyrat, Patrick and Binesti, Didier and Lutun, Eric and Khalid, Radouane and Mousel², Sophie, PV BIFACIAL YIELD SIMULATION WITH A VARIABLE ALBEDO MODEL, 2016.
- [46] Q CELLS, «BIFACIAL DESIGN GUIDELINE,» 2020.
- [47] Mark Z. Jacobson and Vijaysinh Jadhav, «World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels,» *Solar Energy*, τόμ. 169, pp. 55-66, 2018.
- [48] Marcus Graefenhain, Energy Yield Simulation Analysis of Bifacial PV Installations in the Nordic Climate, I. T. Frank Fiedler, Επιμ., 2017.
- [49] «PVSyst - Photovoltaic Software,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pvsyst.com/>.
- [50] Trina Solar Co, «Trinasolar,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://static.trinasolar.com/sites/default/files/EN_Datasheet_Duomax_Twin_DEG15HC.20II_201907.pdf.
- [51] Bosch Power Tec, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/bosch-solar-energy-ag/bpt-c-200-300-350-central-inverter-transformerless/54351-786811.html#open2048125>.

- [52] «Solar resource maps of Greece,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/greece>.
- [53] Kambezidis, Harry and Psiloglou, Basil, «Estimation of the Optimum Energy Received by Solar Energy Flat-Plate Convertors in Greece Using Typical Meteorological Years. Part I: South-Oriented Tilt Angles,» *Applied Sciences*, τόμ. 11, 02 2021.
- [54] Clara Grönlund, Måns Wallentinsson, Linus Rustas, Emil Forsén, Potential solar power installations within the municipality of Uppsala, K. Starborg, Επιμ., UPPSALA, 2018.
- [55] Syahira, Syafiq and Sulaiman, Shahril Irwan and Abdul Rahim, Siti Rafidah, «Design of ground-mounted grid-connected photovoltaic system with bifacial modules using PVsyst software,» 2022.
- [56] Kinect Solar, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://kinectsolar.com/product/trina-tsm-400deg15hc-20ii-400w-mono-split-cell-bifacial-silver-frame-clear-backsheet-1500v-ts4/>.
- [57] pvXchange, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pvxchange.com/Price-Index>.
- [58] EUROPE-SOLAR STORE, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.europe-solarstore.com/solar-inverters.html?inverter_power=32.
- [59] Espina, Randell and Enano, Nelson and Descalsota, Ed and Occidental, Jason, «Modeling and Simulation of a 48-kW Off-grid Solar-PV Power System Using PVsyst,» 07 2022.
- [60] WorldData.info, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.worlddata.info/europe/greece/inflation-rates.php#:~:text=During%20the%20observation%20period%20from,year%20inflation%20rate%20was%208.5%25..>
- [61] Ελευθέριος Αμανατίδης, «Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας,» Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών. [Ηλεκτρονικό].