



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στον Τομέα Θερμότητας και το εργαστήριο Ψύξης,Κλιματισμού και Ηλιακής Ενέργειας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς όσους συνέβαλαν με τη βοήθειά τους στην διεκπεραίωση αυτής, αλλά καθ' όλα τα έτη των σπουδών μου.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χρήστο Τζιβανίδη για την καθοδήγησή του, το ενδιαφέρον και τη βοήθειά καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας μου, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω και να φέρω εις πέρας αυτό το πολύ ενδιαφέρον θέμα.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Τερτίπη για την καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια του αυτούς τους μήνες της διπλωματικής. Οι συμβουλές του όσον αφορά την προσέγγιση του θέματος, τη μέθοδο και την επίλυση ήταν καθοριστικής σημασίας. Τον ευχαριστώ θερμά για τον χρόνο που αφιέρωσε.

Επίσης επιθυμώ να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γιώργο Κάραλη για όλη τη βοήθεια του στα αρχικά στάδια της εργασίας μου, για τον χρόνο που αφιέρωσε και τις διασυνδέσεις που μου προσέφερε ώστε να εξασφαλίσω τα απαραίτητα δεδομένα για την εργασία.

Από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών ευχαριστώ τον κ. Κώστα Λαγουβάρδο και τον εξωτερικό του συνεργάτη κ. Σταύρο Ντάφη για τη συνεργασία μας όσον αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα ανοικτής θάλασσας. Η συμβολή τους ήταν καθοριστική και είμαι ευγνώμων.

Από τον Τομέα Υδρολογίας της ΔΕΗ ευχαριστώ την κα Μαγγίνα, τον κ. Γάτση και τον κ. Βήτα για τη συνεργασία μας σχετικά με τα μετεωρολογικά δεδομένα στην λίμνη. Τους ευχαριστώ πολύ για την προθυμία και την πολύτιμη βοήθεια τους.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ χρωστώ στους γονείς μου, Αρτέμιδα και Σάββα, και στην αδελφή μου Μαρία, την οποία ευχαριστώ για τη στήριξη, την υπομονή και την αγάπη της τα χρόνια των σπουδών μας στην Αθήνα. Η εργασία μου αφιερώνεται σε εκείνη.

Τέλος, η διπλωματική αυτή αφιερώνεται στους αγαπημένους μου και σε όλους μου τους φίλους.

**Χριστίνα Σάββα**

**Αθήνα 2023**

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.



Χριστίνα Σάββα

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ABSTRACT .....	8
ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΑ .....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1. Ενέργεια και ΑΠΕ .....	12
1.1.1. Παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες.....	12
1.1.2. Ρόλος των ΑΠΕ .....	13
1.1.3. Ηλιακή ενέργεια ως μορφή ΑΠΕ .....	14
1.2. Ηλιακή ενέργεια .....	15
1.2.1. Ο Ήλιος ως πηγή ενέργειας.....	15
1.2.2. Ηλιακή ακτινοβολία.....	15
1.2.3. Sky Models.....	16
1.2.4. Ακτινοβολία και επιφάνεια .....	18
1.2.5. Βασικά μεγέθη.....	18
1.2.6. Ήλιος και πλωτός φωτοβολταϊκός συλλέκτης.....	21
1.3. Φωτοβολταϊκός συλλέκτης.....	22
1.3.1. Γενικά .....	22
1.3.2. Αρχές λειτουργίας.....	22
1.3.3. Επίδραση θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.....	25
1.3.4. Κλίση και προσανατολισμός.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΛΩΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ .....	29
2.1. Γενικά .....	29
2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πλωτών Φ/Β .....	31
2.2.1. Πλεονεκτήματα .....	31
2.2.2. Μειονεκτήματα.....	35
2.3. Εφαρμογές πλωτών φωτοβολταϊκών.....	37
2.4. Πλωτές κατασκευές και διατάξεις.....	41
2.4.1. Έρευνα των Grech κ.ά. ....	41
2.4.2. Πλωτή εγκατάσταση της SolarinBlue.....	44
2.4.3. Πλωτή εγκατάσταση της Tractebel.....	45
2.4.4. Πλωτή εγκατάσταση της Oceans of Energy.....	45
2.4.5. Πλωτή εγκατάσταση της Ciel&Terre .....	46
2.5. Συστήματα πρόσδεσης και αγκύρωσης .....	47
2.5.1. Γενικά .....	47
2.5.2. Άκαμπτα συστήματα πρόσδεσης.....	47
2.5.3. Τεταμένα συστήματα πρόσδεσης .....	48

2.5.4.	Μη τεταμένα/αλυσοειδή συστήματα πρόσδεσης.....	49
2.5.5.	Συμβατά συστήματα πρόσδεσης.....	50
2.1.	Επίδραση των καιρικών συνθηκών .....	51
2.1.1.	Κύματα.....	51
2.1.2.	Άνεμος .....	53
2.1.3.	Θαλάσσια ρεύματα .....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PV <sub>syst</sub> .....	60
3.1.	Γενικά .....	60
3.2.	Εργαλεία .....	60
3.3.	Βάσεις δεδομένων .....	63
3.4.	Batch simulation.....	64
3.5.	Μορφή ενός τυπικού Report .....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΑΝΟΙΚΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ.....	70
4.1:	Γενικά .....	70
4.2:	Κριτήρια .....	70
4.3:	Κριτήρια της εργασίας.....	79
4.4:	Επιλογή τελικής τοποθεσίας και χαρακτηριστικά.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΛΙΜΝΗ .....	82
5.1:	Γενικά .....	82
5.2:	Επιλογή και χαρακτηριστικά της τοποθεσίας .....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΠΛΩΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΑΡΚΑ .....	85
6.1:	Διάταξη και τοποθεσία .....	85
6.1.1.	:Περίπτωση ανοικτής θάλασσας.....	85
6.1.2 :	Περίπτωση λίμνης .....	85
6.2:	Προσανατολισμός και κλίση της διάταξης .....	87
6.2.1:	Προσανατολισμός.....	87
6.2.2:	Κλίση .....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PV <sub>syst</sub> .....	88
7.1.	Γενικά .....	88
7.2.	Τοποθεσίες στη στεριά για τη θάλασσα και την λίμνη.....	88
7.2.1.	Χερσαία τοποθεσία εγκατάστασης στην περίπτωση της ανοικτής θάλασσας .....	88
7.2.2.	Χερσαία τοποθεσία εγκατάστασης στην περίπτωση της λίμνης .....	89
7.3.	Αλλαγές στο λογισμικό και την προσομοίωση .....	90
7.3.1.	Albedo - Λευκαύγεια .....	90
7.3.2.	Συντελεστής απωλειών θερμότητας .....	91
7.3.3.	Μετεωρολογικά μεγέθη .....	95
7.3.4.	Απώλειες «αναντιστοιχίας» - Mismatch losses .....	95

7.3.5.	Απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης – Soiling losses .....	95
7.4.	Μετεωρολογικά μεγέθη στις πλωτές τοποθεσίες .....	96
7.4.1.	Δεδομένα ανοικτής θάλασσας.....	96
7.4.2.	Δεδομένα λίμνης.....	97
7.5.	Μορφή και δημιουργία μετεωρολογικών αρχείων .....	97
7.5.1.	Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος (ΤΜΥ).....	97
7.5.2.	Μετεωρολογικά δεδομένα της λίμνης στο λογισμικό.....	103
7.6.	Μετεωρολογικά αρχεία των χερσαίων τοποθεσιών .....	105
7.7.	Σύγκριση μετεωρολογικών δεδομένων μεταξύ των χερσαίων και πλωτών τοποθεσιών.....	106
7.7.1.	Τοποθεσία λίμνης και Μοσχάτο.....	106
7.7.2.	Τοποθεσία ανοικτής θάλασσας και Νέα Μεσάγκαλα.....	108
7.8.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ .....	110
7.8.1.	Γενικά .....	110
7.8.2.	Σενάρια τα οποία εξετάστηκαν.....	112
7.9.	Οικονομική ανάλυση πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	117
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....</b>		<b>119</b>
8.1	Γενικά .....	119
8.2	ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Μελέτη ενεργειακής συμπεριφοράς της πλωτής εγκατάστασης σε σύγκριση με τη χερσαία για μεταβαλλόμενη γωνία κλίσης, σταθερή απόσταση βήματος (pitch) και συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$ .....	119
8.2.1	Ανοικτή θάλασσα .....	119
8.2.2	Χερσαία τοποθεσία της περίπτωσης της θάλασσας-Νέα Μεσάγκαλα .....	126
8.2.3	Λίμνη .....	131
8.2.4	Χερσαία τοποθεσία της περίπτωσης της λίμνης-Μοσχάτο .....	136
8.3	ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ διατάξεων με μεταβλητή γωνία κλίσης των συλλεκτών, μεταβλητή απόσταση βήματος (pitch) και σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$ ... 141	141
8.3.1	Ανοικτή θάλασσα .....	141
8.3.2	Λίμνη .....	144
8.4	ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ διατάξεων με σταθερή γωνία κλίσης συλλεκτών, μεταβλητή απόσταση βήματος (pitch) και σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$ ..... 148	148
8.4.1	Ανοικτή θάλασσα .....	148
8.4.2	Λίμνη .....	151
8.5	ΣΕΝΑΡΙΟ 4: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ των διατάξεων με μεταβλητό συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$ και σταθερή γωνία κλίσης συλλεκτών και απόσταση βήματος (pitch)..... 155	155
8.5.1	Ανοικτή θάλασσα .....	155
8.5.2	Λίμνη .....	155
8.6	ΣΕΝΑΡΙΟ 5: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών των διατάξεων φωτοβολταϊκών συλλεκτών πολυκρυσταλλικού πυριτίου με σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$ , γωνία κλίσης συλλεκτών και απόσταση βήματος (pitch) .....	156
8.6.1	Ανοικτή θάλασσα .....	156

8.6.2	Λίμνη .....	158
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	161
	Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	163
	Κατάλογος Πινάκων .....	167
	Κατάλογος Εικόνων.....	168
	Βιβλιογραφία.....	170

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα πλωτά φωτοβολταϊκά είναι μια ραγδαία αναπτυσσόμενη τεχνολογία στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με ποικίλες εφαρμογές ανά το παγκόσμιο. Παρότι η κύρια χρήση των φωτοβολταϊκών συναντάται σε χερσαίες εγκαταστάσεις, σήμερα οι πλωτοί συλλέκτες εγκαθίστανται σε υδάτινα σώματα σαν φράγματα, λίμνες άρδευσης, ταμιευτήρες υδροηλεκτρικών σταθμών και στην ανοικτή θάλασσα. Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η προσομοίωση και ενεργειακή μελέτη των πλωτών φωτοβολταϊκών στο λογισμικό PVsyst, με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων για δύο τοποθεσίες στην Ελλάδα, σε ανοικτή θάλασσα και λίμνη. Αρχικά, έγινε επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης των πλαισίων βάσει πληθώρας περιβαλλοντικών, τεχνικών και κοινωνικών κριτηρίων και συλλογή των μετεωρολογικών δεδομένων. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση της θάλασσας συλλέχθηκαν από Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και της λίμνης από τον Τομέα Υδρολογίας της ΔΕΗ. Για τους σκοπούς της μελέτης επιλέχθηκε η τοποθεσία σε ανοικτή θάλασσα στην περιοχή των Νέων Μεσαγκαλών, ενώ για καθαρά ερευνητικούς σκοπούς μελετήθηκε και η εγκατάσταση πλωτών φωτοβολταϊκών στη λίμνη Πλαστήρα, εφαρμογή μη ρεαλιστική καθώς αποτελεί περιοχή Natura. Μελετήθηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια σχεδιαστικών παραμέτρων των πλωτών εγκαταστάσεων, ενώ για την καλύτερη προσομοίωση των πλωτών πλαισίων στο λογισμικό ήταν απαραίτητη η μεταβολή διαφόρων παραμέτρων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας ανέδειξαν καλύτερη ενεργειακή απόδοση των πλωτών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων κατά 10.4% στη θάλασσα και 8.7% στην λίμνη συγκριτικά με τις χερσαίες. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις πλωτές συστοιχίες είναι χαμηλότερες συγκριτικά με τις χερσαίες και ως αποτέλεσμα οι απώλειες λόγω επιπέδων θερμοκρασίας είναι αρκετά μικρότερες. Ο λόγος απόδοσης και ο συντελεστής φορτίου είναι κατά 4% και 10% αυξημένοι στα πλωτά φωτοβολταϊκά στη θάλασσα, ενώ στην περίπτωση της λίμνης οι τιμές είναι 7% και 8% αντίστοιχα. Από τα σενάρια μελέτης τα οποία πραγματοποιήθηκαν αναλύθηκαν συνδυασμοί διαφόρων μεταβλητών και σταθερών μεγεθών και εξήχθησαν τα ανάλογα διαγράμματα. Συμπερασματικά, η πλωτά φωτοβολταϊκά αποδίδουν καλύτερα από τα χερσαία λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών τους και αποτελούν μια υποσχόμενη τεχνολογία με κύριο δυνητικά ρόλο στο παγκόσμιο ενεργειακό δυναμικό.



## ABSTRACT

Floating photovoltaics (FPV) is a rapidly developing technology in the field of renewable energy sources with a variety of applications worldwide. Although the main use of photovoltaics is land-based plants, the FPV plants are installed in water bodies such as dams, irrigation ponds, lakes, reservoirs of hydropower plants, and offshore. In this diploma thesis, we aim to simulate and analyse the performance characteristics of lake and offshore FPV installations using PVsyst Software based on acquired meteorological data. The first step was the selection of the location of the installation based on environmental, technical and social criteria and the acquisition of meteorological data. The weather data used in the offshore case was provided by the National Observatory of Athens and the data of the lake case by the Hydrology Department of Public Power Corporation (DEI). For this study, the offshore location in the area of New Messagala was selected, while for purely research purposes the installation of FPV in Plastira Lake was also studied, an unrealistic application as it is a Natura-protected location. Five different scenarios of design parameters of the floating facilities were studied, while for a better simulation of the floating collectors, adjustment of various parameters was required. The results of our simulations revealed greater energy efficiency of the FPV installations by 10.4% in the offshore case and 8.7% in the lake compared to the land-based system. The temperatures developed in the floating arrays are lower compared to land-based ones and as a result, the losses due to temperature levels are considerably smaller. The performance ratio and capacity factor are increased by 4% and 10% in the offshore FPV, while in the case of the lake the values are 7% and 8% respectively. From the carried-out scenarios, combinations of multiple variables and fixed parameters were analyzed and corresponding diagrams were extracted. In conclusion, floating photovoltaics perform better than land-based plants due to their lower temperatures and are a promising technology with a major potential role in the global energy sector.

## ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΑ

$\bar{H}_o$	: Ηλιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας
$G_{inc}$	: Εισερχόμενη ακτινοβολία στη Φ/Β συστοιχία
$H_d$	: Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
$T_{amb}$	: Θερμοκρασία του αέρα στο περιβάλλον
$T_{cell} / T_c$	: Θερμοκρασία του Φ/Β κελιού
$a_d$	: Ανάκλαση του διάχυτου φωτός
$C_D$	: Συντελεστής αντίστασης/οπισθέλκουσας
$C_L$	: Συντελεστής άνωσης
$H_T$	: Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια
ABEX	: Κόστος εγκατάλειψης
$A_x$	: Προβαλλόμενη επιφάνεια στην κατεύθυνση ροής
$A_z$	: Προβαλλόμενη επιφάνεια στην κατακόρυφη διεύθυνση
BOP	: Balance of plant
°C	: Βαθμοί σε κλίμακα Κελσίου
CAPEX	: Συνολικό κόστος επένδυσης
CF	: Συντελεστής φορτίου – Capacity Factor
CO <sub>2</sub>	: Διοξείδιο του άνθρακα
$D$	: Σχετική συμβολή του διάχυτου φωτός στη συνολική ηλιακή ακτινοβολία
DC	: Συνεχές ρεύμα
DHI	: Diffuse Horizontal Irradiation – Διάχυτη οριζόντια ακτινοβολία
DHI	: Diffuse Horizontal Irradiation
DTA <sub>arr</sub>	: Διαφορά θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών πάνελ με εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας
E <sub>grid</sub>	: Ενέργεια η οποία διαχέεται στο δίκτυο
E <sub>specific</sub>	: Η ειδική παραγωγή ανά έτος
$E_R$	: Ονομαστική παραγόμενη ενέργεια
FPV	: Floating Photovoltaics-Πλωτά Φωτοβολταϊκά
$F_x$	: Ταχύτητα ανέμου στην κατεύθυνση ροής
$F_z$	: Ταχύτητα ανέμου στην κατακόρυφη διεύθυνση
$G_b$	: Ολική ηλιακή ακτινοβολία η οποία φτάνει στο έδαφος
$G_d$	: Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία
GHI	: Global Horizontal Irradiation – Παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία
GincLss	: Απώλειες ενέργειας λόγω επιπέδου ακτινοβολίας
GlobEff_Irr	: Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη
GlobInc	: Προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο συλλεκτικό επίπεδο
$G_r$	: Ανακλώμενη ακτινοβολία λόγω του εδάφους
$G_{SC}$	: Ηλιακή σταθερά
$H_s$	: Σημαντικό ύψος κύματος
$i$	: Επιτόκιο αναγωγής
$I$	: Ρεύμα φορτίου

$I_d$	: Ρεύμα διόδου
$I_{mp}$	: Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος
$I_{ph}$	: Ρεύμα φωτός
$I_{PV}$	: Ρεύμα φωτοβολταϊκής μονάδας
$I_{sc}$	: Ρεύμα βραχυκυκλώματος
LCOE	: Levelized Cost of Energy – Κόστος παραγόμενης ενέργειας
Ls	: Normalised losses- Ανηγμένες απώλειες
N	: Διάρκεια ζωής έργου
n	: Ημέρα του έτους
OPEX	: Κόστος συντήρησης και λειτουργίας
PBP	: Pay back period - Χρόνος απόσβεσης επένδυσης
$P_{mp}$	: Μέγιστη ισχύς φωτοβολταϊκού
PnomPV	: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών STC
PR	: Performance Ratio – Λόγος απόδοσης
$P_{rated}$	: Ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών
PV	: Φωτοβολταϊκά
$Q_d$	: Ιδεατός παράγοντας διόδου
R	: Συντελεστής ετήσιας επιβάρυνσης κεφαλαίου
$r$	: Συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους,
RES	: Renewable Energy Sources
ShdLoss	: Απώλειες ενέργειας λόγω σκιάσεων
Si	: Πυρίτιο
Si-mono	: Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο
Si-poly	: Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο
SlgLoss	: Απώλειες ενέργειας λόγω κατακαθίσεων και σκόνης
STC	: Standard Test Conditions
T_array	: Αναπτυσσόμενη θερμοκρασία της σειράς των πάνελ
TMY	: Typical Meteorological Year - Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος
$V_d$	: Τάση διόδου
$V_{mid}$	: Ταχύτητα του ανέμου στο μέσο άνοιγμα του ηλιακού πάνελ
$V_{mp}$	: Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος
$V_{oc}$	: Τάση ανοικτού κυκλώματος
$V_{PV}$	: Τάση φωτοβολταϊκής μονάδας
$V_t$	: Θερμική τάση
Wind_vel	: Wind velocity – Ταχύτητα ανέμου
$\alpha$	: Συντελεστής απορρόφησης
$\alpha_s$	: Γωνία ηλιακού ύψους
ΑΠΕ	: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
$\beta$	: Γωνία κλίσης συλλέκτη
$\gamma_s$	: Γωνία αζιμουθίου
$\delta$	: Ηλιακή απόκλιση
$\Delta T_{array}$	: Διαφορά θερμοκρασίας σειράς των πάνελ με το περιβάλλον

$H$	: Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια
$\eta$	: Βαθμός απόδοσης του Φ/Β συλλέκτη
$\theta$	: Γωνία πρόσπτωσης
$\theta_z$	: Γωνία ζενίθ
IAM	: Incidence Angle Modifier
$\rho$	: Πυκνότητα αέρα
$\tau$	: Συντελεστής διάβασης
$\varphi$	: Γεωγραφικό πλάτος
Φ/Β	: Φωτοβολταϊκά
$\omega$	: Ωριαία γωνία ηλίου
$\omega_s$	: Ωριαία γωνία δύσης ηλίου
$El_{price}$	: Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας
$U$	: Συντελεστής απωλειών θερμότητας λόγω συναγωγής
$U_c$	: Ανεξάρτητος συντελεστής απωλειών θερμότητας
$U_v$	: Συντελεστής απωλειών θερμότητας εξαρτώμενος από τον άνεμο
$G(n)$	: Ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας
$v$	: Ταχύτητα ανέμου
$\alpha(\theta_z)$	: Άμεση ανάκλαση

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

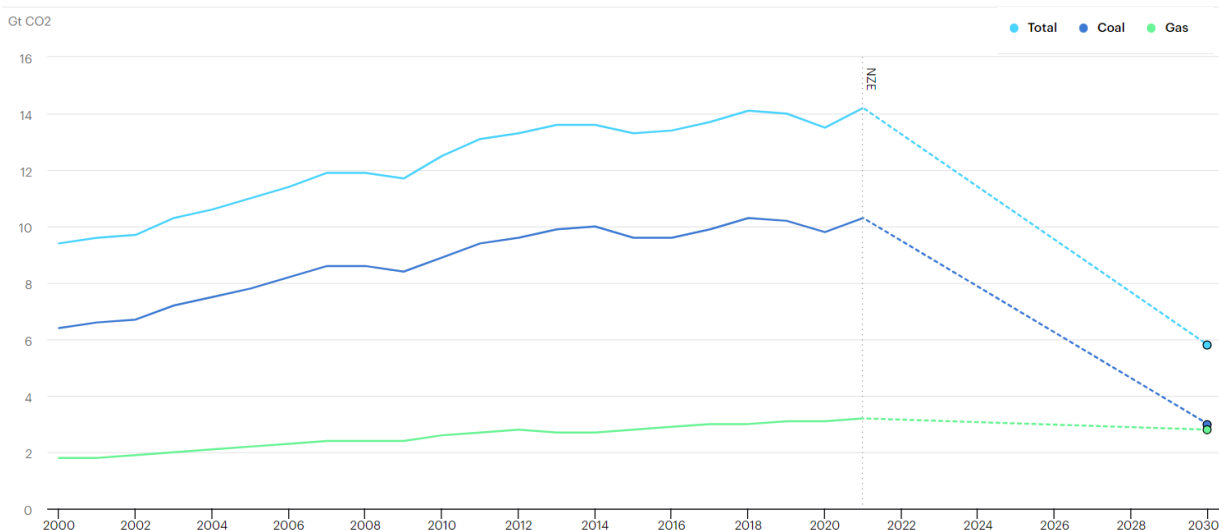
## 1.1. Ενέργεια και ΑΠΕ

### 1.1.1. Παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες

Στη Γενική Συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών (UNGA) το 2015 καθορίστηκαν οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), οι οποίοι καθορίζουν ένα ισχυρό πλαίσιο για διεθνή συνεργασία των χωρών με στόχο την επίτευξη ενός βιώσιμου μέλλοντος για τον πλανήτη. Οι 17 στόχοι βρίσκονται στο επίκεντρο της «Ατζέντας 2030» και στοχεύουν στον τερματισμό της ακραίας φτώχειας, την καταπολέμηση της ανισότητας και την προστασία του περιβάλλοντος. Η αειφόρος ενέργεια είναι καίριας σημασίας για την επιτυχία της Ατζέντας 2030 και αποτελεί τον 7<sup>ο</sup> πυλώνα, ο οποίος περιλαμβάνει τρεις βασικούς στόχους: εξασφάλιση οικονομικής, αξιόπιστης και καθολικής πρόσβασης σε σύγχρονες ενεργειακές υπηρεσίες, αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα και διπλασιασμός του παγκόσμιου ρυθμού βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης [1].

Ο τομέας ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς εκπομπές άνθρακα αποτελεί τη βάση ενός παγκόσμιου συστήματος καθαρής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια βρίσκεται στο επίκεντρο των σύγχρονων οικονομιών, με το αναμενόμενο μερίδιό της στην τελική κατανάλωση ενέργειας να ξεπερνά το 50% έως το 2050, καθώς η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται ραγδαία. Τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία δεν συμμετέχουν σε δέσμευση ή αποθήκευση άνθρακα (unbated fossil fuels), αντιπροσωπεύσαν το 61.3% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του 2021 [2]. Η ισχυρή αύξηση των εκπομπών στην ηλεκτρική ενέργεια κατά το 2021 οφείλεται στη συνεχώς αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση (η αύξηση της ζήτησης υπολογίστηκε στα 1200 TWh δηλαδή +5%). Αυτό σημαίνει ότι η άνοδος ξεπέρασε αρκετά τη μείωση της ζήτησης ενέργειας λόγω της πανδημίας του Covid-19 του 2020. Φυσικά, η καύση άνθρακα ενισχύθηκε περαιτέρω από τις πολύ υψηλές τιμές του φυσικού αερίου.

Το μερίδιο των εκπομπών CO<sub>2</sub> λοιπόν, πρέπει να μειωθεί στο 26% έως το 2030 ώστε να συμβαδίζει με το πλάνο μηδενικών εκπομπών άνθρακα έως το 2050. Στο Διάγραμμα 1.1, παρουσιάζονται οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για περίοδο 30 ετών σύμφωνα με το πλάνο για μηδενικές εκπομπές το 2050.



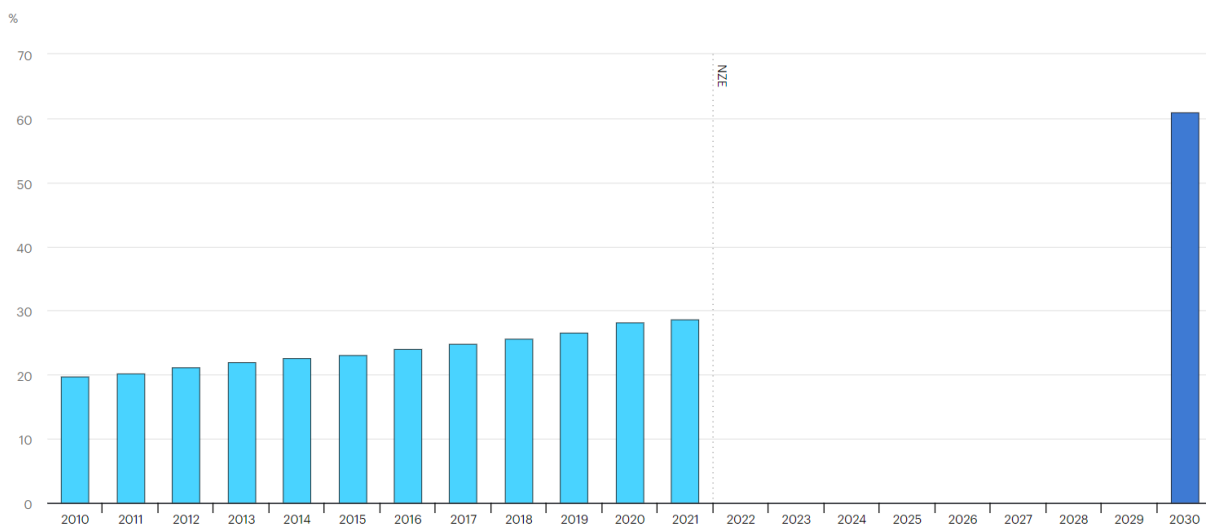
Διάγραμμα 1.1 Παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η προβλεπόμενη μείωση τους για το σενάριο των μηδενικών εκπομπών το 2050 [3]

Οι παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub> στον τομέα της ενέργειας, για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, αυξήθηκαν κατά σχεδόν 700 Mt CO<sub>2</sub> το 2021, φτάνοντας το ρεκόρ των 14 Gt. Αιτία της αύξησης αυτής αποτελεί η ισχυρή αύξηση της καύσης άνθρακα, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος. Όπως παρατηρείται επίσης στο Διάγραμμα 1.1, οι τρέχουσες τάσεις δεν ευθυγραμμίζονται με τα ορόσημα του Σεναρίου των Καθαρών Μηδενικών Εκπομπών 2050, όπου θα πρέπει οι εκπομπές του τομέα ηλεκτρικής ενέργειας μειώνονται κατά περισσότερο από 7% ετησίως έως το 2030, φθάνοντας στην τιμή των 165 gCO<sub>2</sub>/kWh, μείωση δηλαδή κατά 65% σε σχέση με τα 455 gCO<sub>2</sub>/kWh σήμερα.

### 1.1.2. Ρόλος των ΑΠΕ

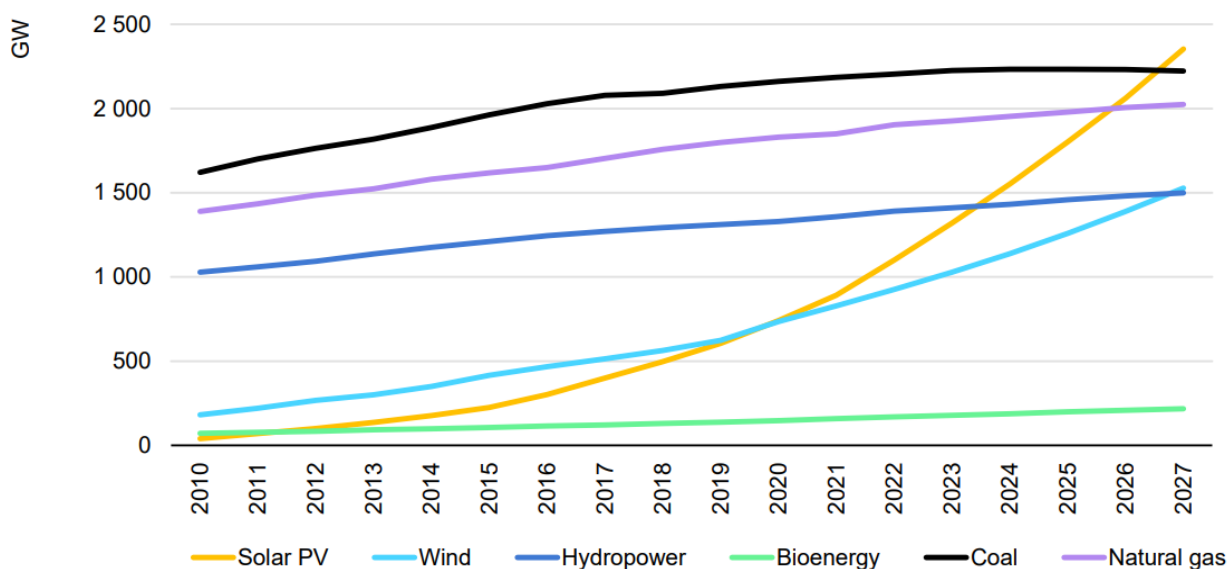
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στη μετάβαση προς την καθαρή ενέργεια και η χρήση τους είναι ένας από τους κύριους παράγοντες για τη διατήρηση της συνεχώς αυξανόμενης μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, κάτω από 1.5°C. Συγκριτικά με το 2020, η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ το 2021, ξεπέρασε κατά 500 TWh την παραγωγή του προηγούμενου έτους, ενώ το 2022 αποτέλεσε έτος ρεκόρ για την προσθήκη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό δυναμικό, με ετήσια τιμή ίση με 340 GW [4],[5].

Ωστόσο, η ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ πρέπει να επεκταθεί ταχύτερα για να φτάσει τα ορόσημα στο Σενάριο Καθαρών Μηδενικών Εκπομπών έως το 2050, όπου το μερίδιο παραγωγής των ΑΠΕ πρέπει να αυξηθεί από το 29% του 2021 σε πάνω από 60% έως το 2030. Συμπερασματικά, η ετήσια παραγωγή πρέπει να αυξάνεται κατά 12% κατά την περίοδο των ετών 2022-2030, τιμή διπλάσια από τον μέσο όρο για τα έτη 2019-2021 [6]. Αυτό, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.2 όπου το μερίδιο των ΑΠΕ παρουσιάζεται ως ποσοστό στην ολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 1.2 Μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο μηδενικών εκπομπών, 2010-2030 [6]

Η εμφανώς αυξημένη προσθήκη εγκατεστημένης ισχύος ανανεώσιμης ενέργειας οφείλεται στο ταχέως μειωμένο κόστος των ΑΠΕ και την ανταγωνιστικότητα, ιδιαίτερα για τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV) και την αιολική ενέργεια [7]. Στο Διάγραμμα 1.3 παρουσιάζεται η ικανότητα ισχύος για συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τα έτη από 2010 μέχρι και την πρόβλεψη για το 2027. Όπως φαίνεται, η ισχύς των φωτοβολταϊκών και αιολικών τεχνολογιών είναι αυτές με τη μεγαλύτερη αυξανόμενη τάση, με την ισχύ των ηλιακών συστημάτων να διπλασιάζεται εντός 5ετίας (2021-2026).

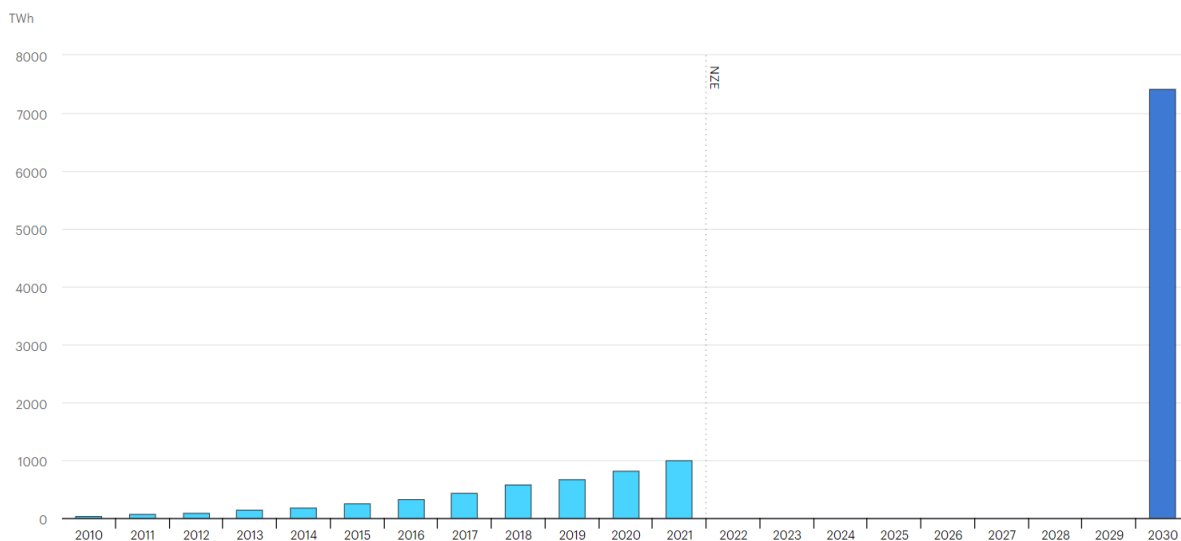


Διάγραμμα 1.3 Αθροιστική ικανότητα ισχύος ανά τεχνολογία για τα έτη 2010-2027 [4]

### 1.1.3. Ηλιακή ενέργεια ως μορφή ΑΠΕ

Η παραγωγή ενέργειας από ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα αυξήθηκε κατά 22% το 2021, ξεπερνώντας τις 1000 TWh και αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη αναπτυσσόμενη πηγή παραγωγής μεταξύ όλων των τεχνολογιών ΑΠΕ το 2021, μετά την αιολική ενέργεια (βλ. Διάγραμμα 1.3). Η τεχνολογία αυτή, αποτελεί την επιλογή με το χαμηλότερο κόστος για νέα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να προβλέπονται όλο και περισσότερες επενδύσεις τα επόμενα χρόνια. Χαρακτηριστικά σημειώνεται ότι η τιμή των φωτοβολταϊκών μειώθηκε σε 0.30 \$/Wp το 2018, σημειώνοντας πτώση σχεδόν 99.6% σε 42 χρόνια (1976) [8].

Σχετικά με το Σενάριο των Καθαρών Μηδενικών Εκπομπών έως το 2050 (βλ. Διάγραμμα 1.4), η παραγωγή από φωτοβολταϊκά θα πρέπει να αυξηθεί κατά 25% την περίοδο 2022-2030 ώστε να επιτευχθούν οι προβλεπόμενοι στόχοι. Αυτό σημαίνει υπερτριπλασιασμός της ετήσιας αύξηση της δυναμικότητας έως το 2030, κάτι που απαιτεί οργανωμένη πολιτική προσπάθεια από δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς [9].



Διάγραμμα 1.4 Παραγωγή ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας βάσει του Σεναρίου Καθαρών Μηδενικών εκπομπών, 2010-2030 [9]

## 1.2. Ηλιακή ενέργεια

### 1.2.1. Ο Ήλιος ως πηγή ενέργειας

Ο Ήλιος είναι μια σφαίρα αποτελούμενη από πληθώρα στρώσεων αερίων διαμέτρου 1390000 km και απέχει  $1.5 \cdot 10^{11}$  m περίπου από τη Γη [10]. Οι στρώσεις αερίων είναι θερμότερες προς το κέντρο του, με την εξωτερική στρώση, η οποία ακτινοβολεί την ενέργεια της στο ηλιακό σύστημα, να έχει ισοδύναμη θερμοκρασία μέλανος σώματος 5777K. Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο άφθονη και σταθερή πηγή ενέργειας και η μεγαλύτερη που προσπίπτει επί της επιφάνειας της γης, μεταξύ όλων των υπόλοιπων δυνάμεων στο σύμπαν [11].

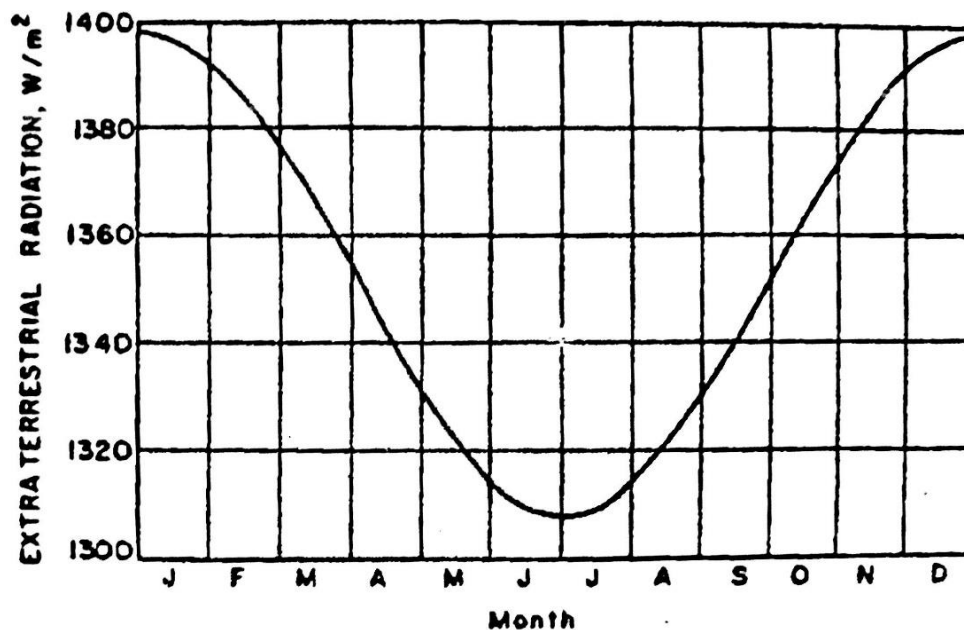
Η προσπίπτουσα ενέργεια στη γη χωρίζεται σε 30% ενέργεια, 47% θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας που ανακυκλώνεται στο σύμπαν, 23% ενέργεια υπεύθυνη για τον υδάτινο κύκλο και την κατακρήμνιση της βιόσφαιρας και λιγότερο από 0.5% φωτοσύνθεση και κίνηση του ανέμου και των κυμάτων [11]. Η ηλιακή σταθερά  $G_{SC}$  είναι ίση με  $1353 \text{ W/m}^2$  και αποτελεί την ενέργεια από τον ήλιο ανά μονάδα χρόνου, σε μια επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας κατά τη μέγιστη απόσταση γης-ήλιου [12]. Ένα μέρος του φωτός του ήλιου διαχέεται και φτάνει στη γη, με τη μορφή διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας. Ενώ και οι δύο τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ηλιακής ενέργειας, μόνο η άμεση μπορεί να αξιοποιηθεί από τεχνολογίες παραγωγής υψηλών θερμοκρασιών. Ετησίως στην Ευρώπη, το ποσοστό των δύο (άμεση και διάχυτη ακτινοβολία) μοιράζεται εξίσου ανά 50% [13].

### 1.2.2. Ηλιακή ακτινοβολία

Με τη μεταβολή της απόστασης γης-ήλιου προκύπτει και μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας. Η ακτινοβολία η οποία λαμβάνει ένα επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας δίνεται από την Εξίσωση 1.1, όπου  $n$  η ημέρα του έτους με εύρος 1 έως 365. Η κατανομή της παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.5.

$$G(n) = G_{SC} \left( 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{2\pi \cdot n}{365} \right) \right)$$

Εξίσωση 1.1



Διάγραμμα 1.5 Μεταβολή της ακτινοβολίας καθέτου επιπέδου εκτός ατμόσφαιρας συναρτήσει των μηνών του έτους [12]



### 1.2.3. Sky Models

Υπάρχουν πολλά μοντέλα ουρανού τα οποία χρησιμοποιούνται για πρόβλεψη της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μια κεκλιμένη επιφάνεια και διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα ισότροπα και ανισότροπα μοντέλα. Ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζουν τη διάχυτη ακτινοβολία τα δύο μοντέλα αποτελεί και τη βασική διαφορά μεταξύ τους. Η διάχυτη ακτινοβολία διαχωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο είναι η ισότροπη ομοιόμορφη ακτινοβολία προερχόμενη από ολόκληρο τον ουράνιο θόλο, η δεύτερη είναι η κυκλική διάχυση που προκύπτει από την προς τα εμπρός διασπορά της ακτινοβολίας στο πλησιέστερο τμήμα του ουρανού στον ήλιο και τρίτη η λάμψη του ορίζοντα (horizon brightening) που συγκεντρώνεται κοντά στον ορίζοντα [14].

#### Ισότροπο μοντέλο

Το ισότροπο μοντέλο αποτελεί το απλούστερο, και πιο εύκολο ως προς τη χρήση, μοντέλο πρόβλεψης της ολικής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο. Η βασική αρχή του υποθέτει ισότροπο συνδυασμό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό και από την ανάκλαση του εδάφους. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία θεωρείται ίση, ανεξαρτήτως του προσανατολισμού της επιφάνειας.

Στην έρευνα τους, οι Μέγλερ κ.ά. [15], οι οποίοι εξέτασαν τη βέλτιστη γωνία κλίσης για φωτοβολταϊκά πάνελ, διαμόρφωσαν ένα μαθηματικό μοντέλο για πρόβλεψη της παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Το μαθηματικό μοντέλο τους, συμπεριλαμβάνει τις μεταβολές της παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας και προέκυψε από τον συνδυασμό του μοντέλου της διάχυτης συνιστώσας, των Liu και Jordan [16], με τις άλλες δύο συνιστώσες (δέσμες και αντανάκλαση από το έδαφος). Το μοντέλο των Liu και Jordan εξετάστηκε βασισμένο σε πειραματικά δεδομένα και ήταν το πιο ακριβές. Συγκεκριμένα το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει εξίσου την ισότροπη διάχυτη ακτινοβολία από τον ουρανό και την ανακλώμενη από το έδαφος (Εξίσωση 1.2) [14].

$$G(\beta, \gamma) = B(0, 0)R_{T-H} + D_a(\beta, \gamma) + D_g(\beta, \gamma) \quad \text{Εξίσωση 1.2}$$
$$\text{Όπου } D_a(\beta, \gamma) = D(0, 0) \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \text{ και } D_g(\beta, \gamma) = G(0, 0) \times \rho_g \times \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

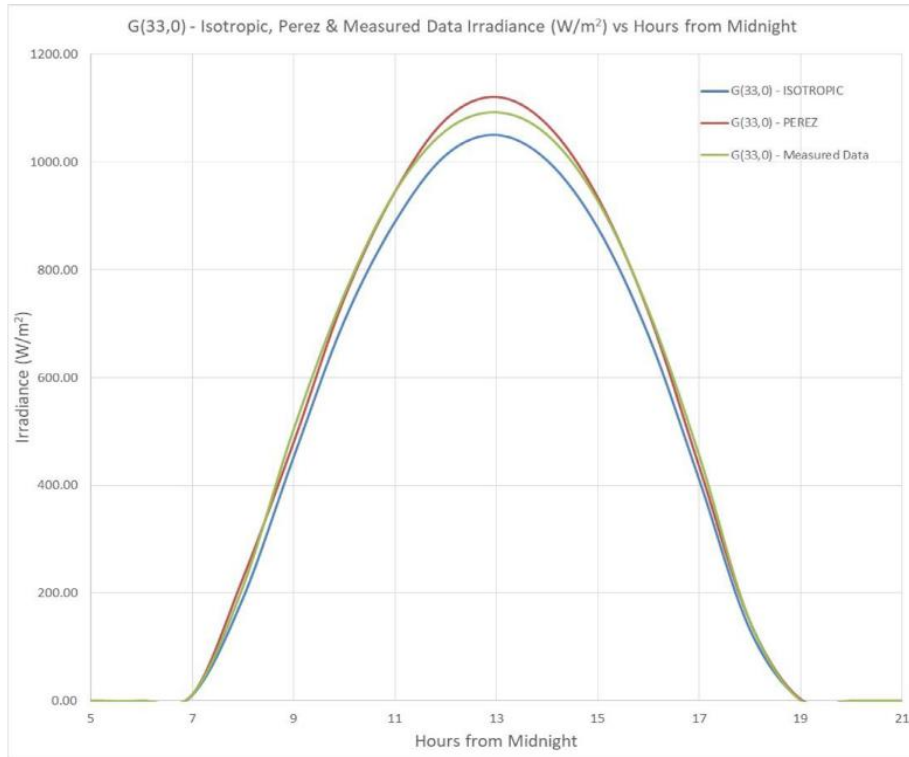
#### Ανισότροπο μοντέλο

Το μοντέλο αυτό προσφέρει πιο ακριβές, και πιο περίπλοκο, υπολογισμό της παγκόσμιας ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο. Το μοντέλο των Perez κ.ά. [17], Εξίσωση 1.3, υπολογίζει λεπτομερώς και τις τρεις συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας, συμπεριλαμβάνοντας και τη λάμψη του ορίζοντα (horizon brightening).

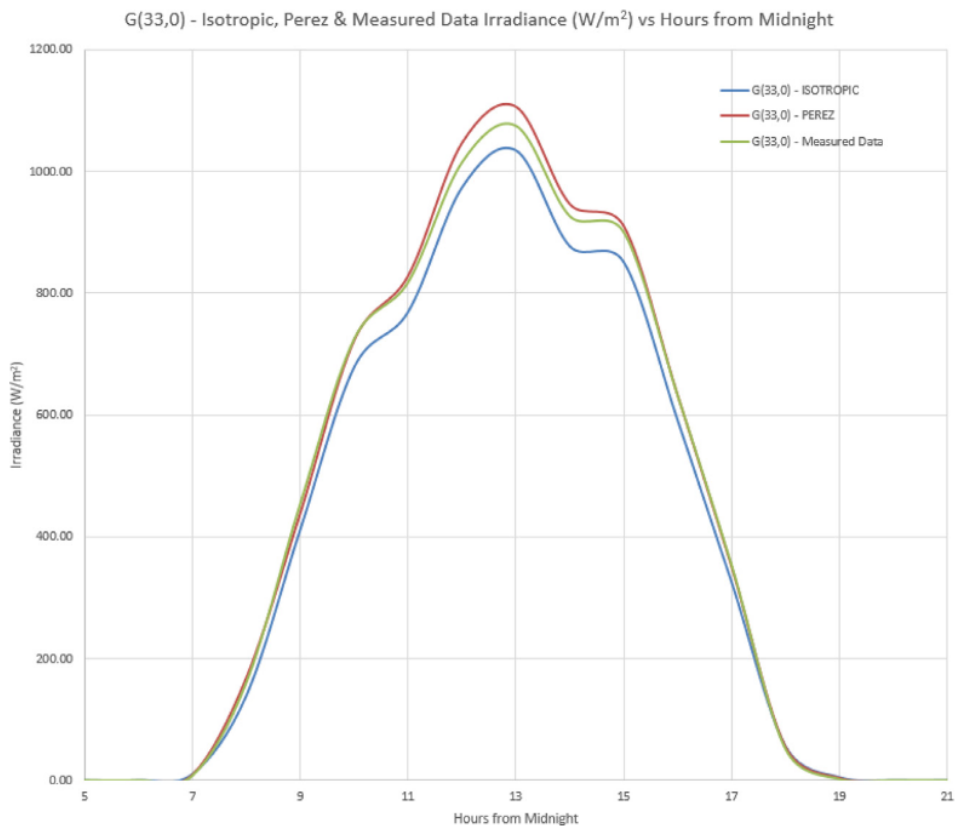
$$G(\beta, \gamma) = B(0, 0) \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + D(0, 0) \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin\beta \right] + G(0, 0) \rho \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad \text{Εξίσωση 1.3}$$

#### Σύγκριση των δύο μοντέλων

Οι ερευνητές Bugeja κ.ά. [14] συνέκριναν την ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο 33° (και μέτρο λευκαύγειας ανακλαστικότητας εδάφους 0.35) από τα δύο μοντέλα με μετρούμενη ακτινοβολία. Οι μετρήσεις έγιναν σε έναν μετεωρολογικό σταθμό του Ινστιτούτου για την Αειφόρο Ενέργεια στο Marsaxlokk της Μάλτας. Στο Διάγραμμα 1.6 και το Διάγραμμα 1.7 παρουσιάζονται οι κατανομές των μοντέλων και των μετρήσεων. Όπως φαίνεται, το ισότροπο μοντέλο προσεγγίζει πιο συντηρητικά τις πραγματικές τιμές ακτινοβολίας, ενώ το ανισότροπο (μοντέλο Perez) δίνει πιο ακριβή, αλλά ελάχιστα υπερεκτιμημένα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 1.6 Προσομοίωση αίθριου καιρού [14]



Διάγραμμα 1.7 Προσομοίωση συννεφιασμένου καιρού [14]

Ο Πίνακας 1.1 συγκρίνει τη μέση απόκλιση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης των δύο μοντέλων (ισότροπο και ανισότροπο) ως προς τα πραγματικά δεδομένα. Τη λιγότερη απόκλιση παρουσιάζει το μοντέλο των Perez κ.ά. για κάθε είδος συννεφιάς ή αιθριότητας.

Πίνακας 1.1 Μέση απόκλιση της προσομοίωσης των δύο μοντέλων από πραγματικές μετρήσεις ακτινοβολίας [14]

Type of Sky	Average Deviation from Real Data (Perez Model) (%)	Average Deviation from Real Data (Isotropic Model) (%)
Clear	2.34	6.93
Cloudy	2.02	6.74
Overcast	4.62	9.90

#### 1.2.4. Ακτινοβολία και επιφάνεια

Σημαντική είναι η σχέση μεταξύ της ηλιακής μετάδοσης με την γωνία πρόσπτωσης, συναρτήσει της υψής του υλικού. Ο Πίνακας 1.2 των Beckman κ.ά. [18] παρουσιάζει αυτή η συσχέτιση για δύο τύπους γυαλιού (χαραγμένο και μη).

Πίνακας 1.2 Ηλιακή μετάδοση και είδος επιφάνειας [18]

Type of Glass	Transmittance by Incidence Angle						
	0 °	20 °	40 °	50 °	60 °	70 °	80 °
Etched	0.941	0.947	0.945	0.938	0.916	0.808	0.562
Un-etched	0.888	0.894	0.903	0.886	0.854	0.736	0.468

#### 1.2.5. Βασικά μεγέθη

##### ▪ Ηλιακή απόκλιση

Ηλιακή απόκλιση ορίζεται η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού και παίρνει τιμές από -23.45 έως +23.45 [12]. Οι θετικές τιμές της είναι κατά τον Βορρά και υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.4.

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad \text{Εξίσωση 1.4}$$

##### ▪ Ωριαία γωνία δύσης ηλίου

Η ωριαία γωνία δύσης ή ανατολής, δηλαδή η γωνία στην οποία ο ήλιος δύει ή ανατέλλει, υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.5, όπου  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος.

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \quad \text{Εξίσωση 1.5}$$

### ▪ Ωριαία γωνία ηλίου

Ωριαία γωνία  $\omega$  ορίζεται η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, λόγω της περιστροφής της γης με ρυθμό  $15^\circ/\text{hr}$ . Είναι δηλαδή το πλήθος των μοιρών στις οποίες περιστρέφεται η γη πριν ο ήλιος βρεθεί ακριβώς πάνω από τον εκάστοτε τοπικό μεσημβρινό. Υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.6, όπου  $\text{min}$  αντιστοιχούν στα λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι και λαμβάνεται θετικό για μ.μ και αρνητικό για π.μ [12].

$$\omega = 0.25 \cdot \text{min} \quad \text{Εξίσωση 1.6}$$

### ▪ Γωνία ηλιακού ύψους

Γωνία ηλιακού ύψους  $\alpha_s$  ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ήλιου με τον ορίζοντα, η συμπληρωματική δηλαδή γωνία της γωνίας ζενίθ  $\theta_z$  [10] και υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.7.

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad \text{Εξίσωση 1.7}$$

### ▪ Γωνία αζιμουθίου

Το αζιμούθιο  $\gamma_s$ , σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο, είναι η γωνία στο οριζόντιο επίπεδο, μεταξύ της προβολής της ευθείας που ενώνει το εν λόγω σημείο με την θέση του ήλιου και την νότια κατεύθυνση. Υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.8.

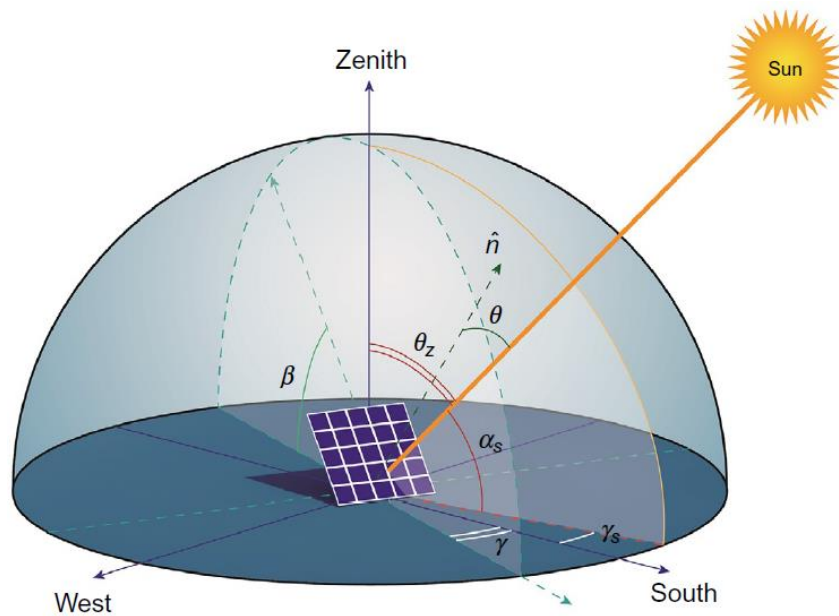
$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \alpha_s} \quad \text{Εξίσωση 1.8}$$

### ▪ Γωνία πρόσπτωσης

Γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  ορίζεται η γωνία μεταξύ του κάθετου άξονα του φωτοβολταϊκού πλαισίου και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.9, όπου  $\gamma$  η γωνία αζιμουθίου του επιπέδου και  $\beta$  η γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad \text{Εξίσωση 1.9}$$

Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζονται οι γωνίες οι οποίες αναλύθηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 1.1 Χαρακτηριστικές γωνίες μεταξύ ηλίου και φωτοβολταϊκού συλλέκτη [10]

#### ▪ Ηλιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μεταβολές της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τον ήλιο και της απόστασης γης-ηλίου έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή και της ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Η μέση μηνιαία ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.10.

$$\bar{H}_o = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot G_{SC} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) \cdot \left[\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{2\pi \cdot \omega_s}{360} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta\right] \quad \text{Εξίσωση 1.10}$$

#### ▪ Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια

Περίπου 72% της ηλιακής ακτινοβολίας καταφτάνει στην επιφάνεια της γης και 7% καταφτάνει ως διάχυτη ακτινοβολία. Το υπόλοιπο μέρος της, απορροφάται από το όζον, τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας, τον αέρα και τη σκόνη και ένα πολύ μικρό μέρος (περίπου 3%) επιστρέφει στην ατμόσφαιρα [13]. Η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια ορίζεται από την Εξίσωση 1.11, όπου  $K_T$  ο συντελεστής αιθριότητας. Ο συντελεστής αιθριότητας ορίζεται ως το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας το οποίο τελικά καταφτάνει στη Γη.

$$H = K_T \cdot \bar{H}_o$$

Εξίσωση 1.11

#### ▪ Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια

Η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια αποτελείται από τρεις συνιστώσες και υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.12. Αυτές είναι η άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία [13] και συμπεριλαμβάνονται στον όρο  $R$  ο οποίος υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.13, όπου  $r$  ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους,  $R_b$  ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και  $H_d$  η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο.

$$H_T = R \cdot H$$

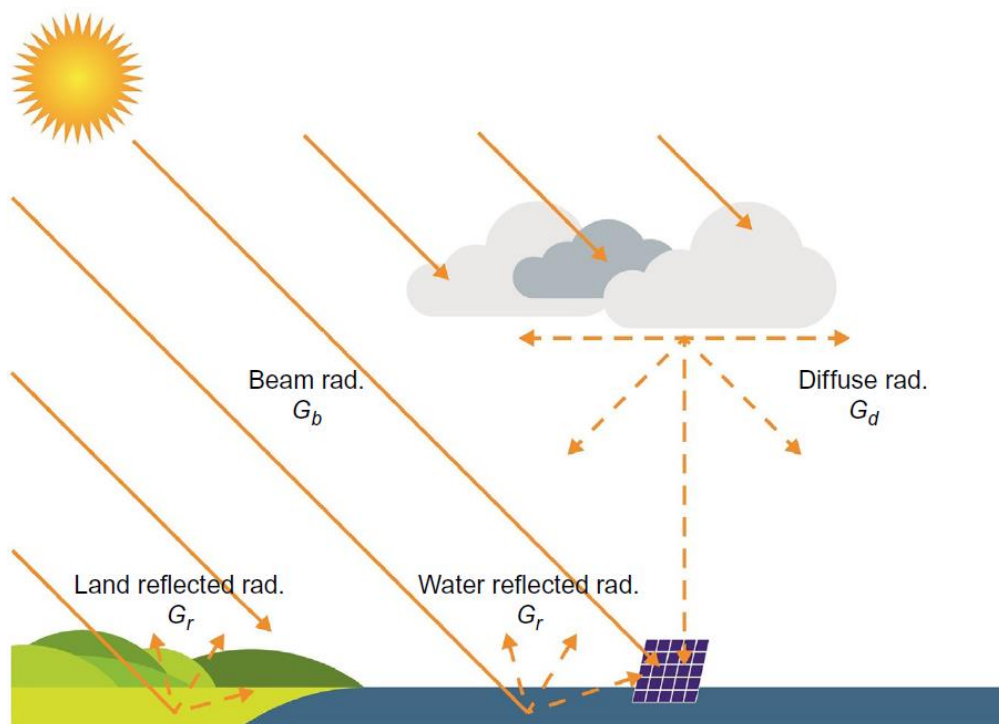
Εξίσωση 1.12

$$R = \left[ \left( 1 - \frac{H_d}{H} \right) \cdot R_b \right] + \left[ \frac{H_d}{H} \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right] + \left[ r \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right]$$

Εξίσωση 1.13

### 1.2.6. Ήλιος και πλωτός φωτοβολταϊκός συλλέκτης

Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζονται οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας που αλληλοεπιδρούν με έναν πλωτό φωτοβολταϊκό συλλέκτη. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία που καταλήγει στη γη και άμεσα διέρχεται ευθύγραμμα μέσα από την ατμόσφαιρα και φτάνει στο έδαφος ορίζεται ως  $G_b$ , ενώ η διάχυτη συνιστώσα ονομάζεται  $G_d$ . Η τελευταία, αποτελεί την ακτινοβολία η οποία έχει διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα και στα σύννεφα. Η  $G_r$  ορίζεται ως η ανακλώμενη ακτινοβολία λόγω του εδάφους και των περιβαλλόντων επιφανειών (π.χ. νερό).



Εικόνα 1.2 Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας οι οποίες αλληλοεπιδρούν με τον φωτοβολταϊκό συλλέκτη [10]

Η ολική ανακλώμενη προσπίπτουσα ακτινοβολία  $G_{PV}$  σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι το άθροισμα όλων των προαναφερθέντων συνιστωσών, οι οποίες συμβολίζονται ως  $G_{PV,b}$ ,  $G_{PV,d}$  και  $G_{PV,r}$ . Η άμεση ακτινοβολία στο επίπεδο  $G_{PV,b}$ , αποτελεί μια απλή συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$ . Η διάχυτη ακτινοβολία,  $G_{PV,d}$ , είναι δυσκολότερο να προσεγγιστεί με ακρίβεια σε σχέση με την άμεση ακτινοβολία και με την προσέγγιση του ισότροπου μοντέλου εξαρτάται μόνο από την κλίση του επιπέδου του συλλέκτη. Τέλος, η ανακλώμενη ακτινοβολία,  $G_{PV,r}$ , από τις γύρω επιφάνειες υπολογίζεται για τις επιφάνειες μπροστά από την φωτοβολταϊκή μονάδα και η ευκολότερη προσέγγιση αποτελεί η θεώρηση μιας μεγάλης οριζόντιας επιφάνειας με ανακλαστικότητα εξαρτώμενη από τα υλικά από τα οποία αποτελείται. Έτσι, θεωρείται πως η ανακλώμενη ακτινοβολία διαχέεται με την ίδια ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις.

## 1.3. Φωτοβολταϊκός συλλέκτης

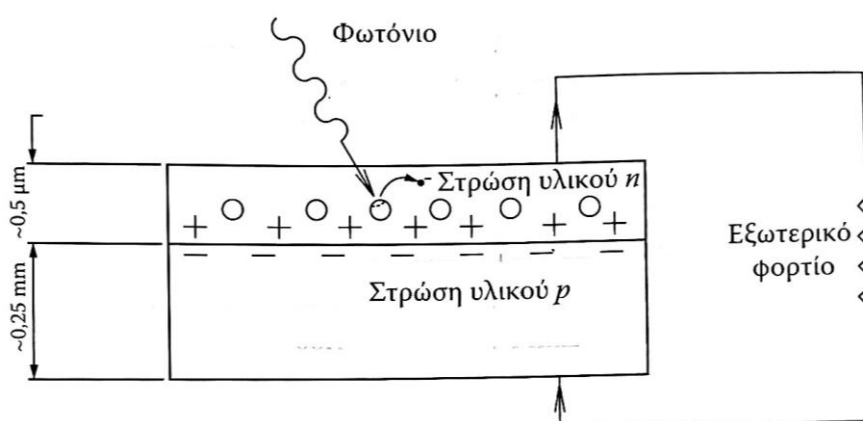
### 1.3.1. Γενικά

Οι φωτοβολταϊκές μονάδες είναι συσκευές στερεάς κατάστασης και ως αποτέλεσμα χαρακτηρίζονται από απλότητα κατασκευής, με μικρή συντήρηση, δίχως κινητά μέρη. Αυτό που χαρακτηρίζει τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, και τα ξεχωρίζει ουσιαστικά από τις υπόλοιπες τεχνολογίες, είναι η ικανότητα τους για αυτονομία εντός μεγάλου εύρους ισχύος από  $\mu\text{W}$  έως  $\text{MW}$  [11]. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών έχει σημειώσει μεγάλη άνοδο εντός των τελευταίων δεκαετιών και αποτελεί μια τεχνολογία με πληθώρα εφαρμογών.

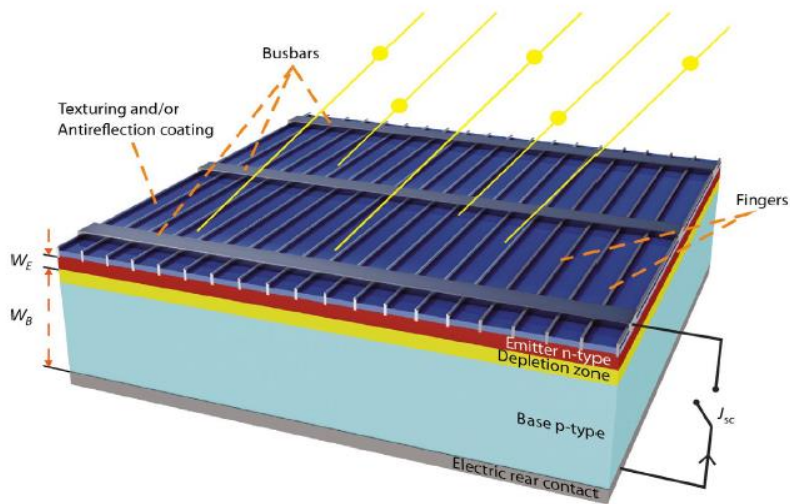
### 1.3.2. Αρχές λειτουργίας

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ δημιουργούνται μέσω σύζευξης ηλιακών κυψελών. Οι ηλιακές κυψέλες είναι ημιαγωγία υλικά και η πλειονότητα τους κατασκευάζεται από πυρίτιο  $\text{Si}$ . Η αρχή λειτουργίας της φωτοβολταϊκής κυψέλης αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, κατά το οποίο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η απορρόφηση ενός φωτονίου από ένα ηλεκτρόνιο σθένους ενός ατόμου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας του ηλεκτρονίου κατά την ποσότητα της ενέργειας του φωτονίου [11]. Στην περίπτωση όπου η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη ή ίση με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, το ηλεκτρόνιο μεταπηδά προς τη στοιβάδα αγωγιμότητας και πλέον κινείται ελεύθερα.

Εάν το ηλεκτρόνιο διοχετευτεί μέσω μιας αντίστασης σε μια επαφή p-n καταλήγει σε μια οπή, τότε παράγεται ενέργεια. Πιο λεπτομερώς, λόγω των φωτονίων που προσπίπτουν στην πλευρά τύπου n, εμφανίζεται πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων που εν συνεχεία κινούνται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος προς την πλευρά τύπου p (βλ. Εικόνα 1.3). Αυτή η ροή των ηλεκτρονίων, μειώνει την προκαλούμενη ανισορροπία φορτίου στο στοιχείο λόγω του φωτός. Όταν τα ηλεκτρόνια φτάσουν στη στρώση υλικού τύπου p, τα αρνητικά φορτία στη στρώση της επαφής p-n εμποδίζουν την κίνηση των ηλεκτρονίων προς τη στρώση n και λόγω του λεπτού πάχους της στρώσης n η κίνηση τους πίσω στις οπές περιορίζεται. Τρισδιάστατη απεικόνιση της τεχνολογίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.

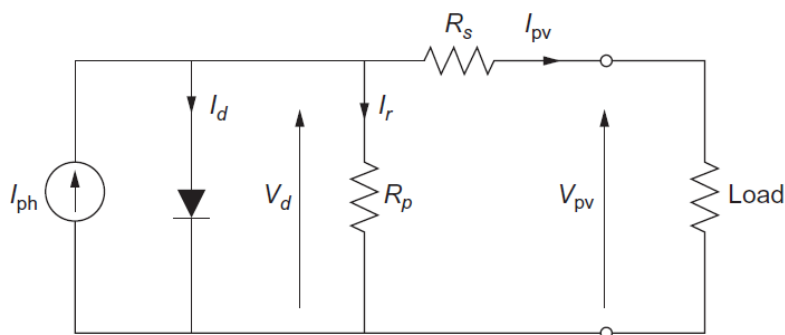


Εικόνα 1.3 Φωτοβολταϊκή συσκευή και επαφή p-n [11]



Εικόνα 1.4 Σχηματική όψη ενός εξωτερικά βραχυκυκλωμένου ηλιακού κυττάρου [11]

Στην Εικόνα 1.5 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτοβολταϊκής μονάδας. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται είναι μια πραγματική διόδος παράλληλα με μια ιδανική πηγή ρεύματος, η οποία παράγει ρεύμα αναλόγως της ηλιακής ροής στην οποία εκτίθεται (φωτόνια). Τα σημαντικά μεγέθη τα οποία παρουσιάζονται είναι η  $V_{PV}$ , δηλαδή η τάση φωτοβολταϊκής μονάδας [V], το ρεύμα φωτοβολταϊκής μονάδας  $I_{PV}$  [A], το ρεύμα φωτός  $I_{ph}$  [A] και το ρεύμα και τάση διόδου,  $I_d$  [A] και  $V_d$  [V] αντίστοιχα.



Εικόνα 1.5 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτρικής φωτοβολταϊκής μονάδας μονής διόδου [10]

Οι δύο πιθανές συνθήκες για το πραγματικό Φ/Β και για το ισοδύναμο κύκλωμά του, είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$ , δηλαδή το ρεύμα που ρέει όταν οι ακροδέκτες βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους, και η ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  ίση με την τάση στους ακροδέκτες, όταν τα καλώδια παραμένουν ανοιχτά.

Όταν τα καλώδια του ισοδύναμου κυκλώματος βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους, δεν ρέει ρεύμα στην (πραγματική) διόδο και έτσι  $V_d=0$ , και το ρεύμα από την ιδανική πηγή ρέει μέσω των βραχυκυκλωμένων απαγωγών. Τότε, το ρεύμα της ίδιας της πηγής ρεύματος πρέπει να είναι ίσο με  $I_{sc}$ . Όταν τα καλώδια από το φωτοβολταϊκό στοιχείο παραμένουν ανοιχτά, το ρεύμα του φορτίου,  $I$ , είναι μηδενικό και η τάση στα άκρα του φορτίου είναι ίση με  $V_{oc}$ .

Στις περιπτώσεις σκίασης, όπου είναι αναγκαίο ένα πιο σύνθετο ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β, το κύκλωμα τότε περιλαμβάνει κάποια στοιχεία αντίστασης, τα οποία αντιστοιχούν στις απώλειες ισχύος. Αυτές είναι η παράλληλη αντίσταση  $R_p$  [ $\Omega$ ] και η αντίσταση σε σειρά  $R_s$  [ $\Omega$ ] (βλ. Εικόνα 1.5). Στην Εξίσωση 1.14, ορίζεται το ρεύμα της φωτοβολταϊκής μονάδας. Στην εξίσωση αυτή  $n_s$  είναι το πλήθος των μονάδων σε σειρά,  $V_t$  [V]



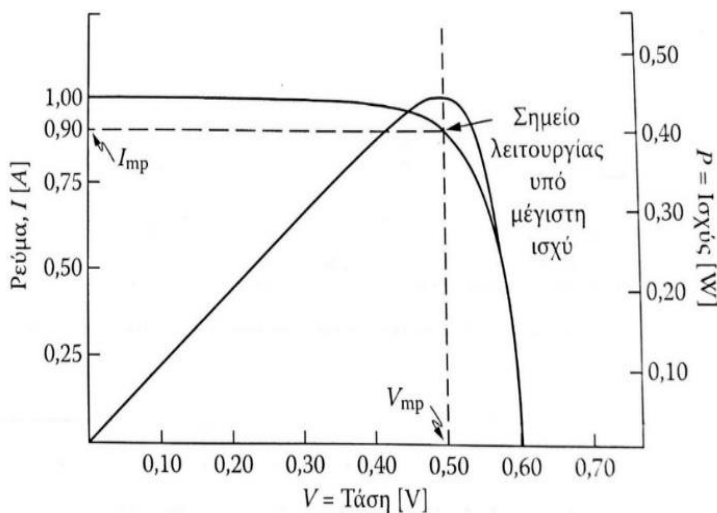
είναι η θερμοκή τάση η οποία ορίζεται από την Εξίσωση 1.15 και είναι περίπου ίση με 25.7 mV, σε θερμοκρασία δωματίου 25 °C και  $Q_d$  ο ιδεατός παράγοντας της διόδου [11].

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{n_s V_t Q_d}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_p} \quad \text{Εξίσωση 1.14}$$

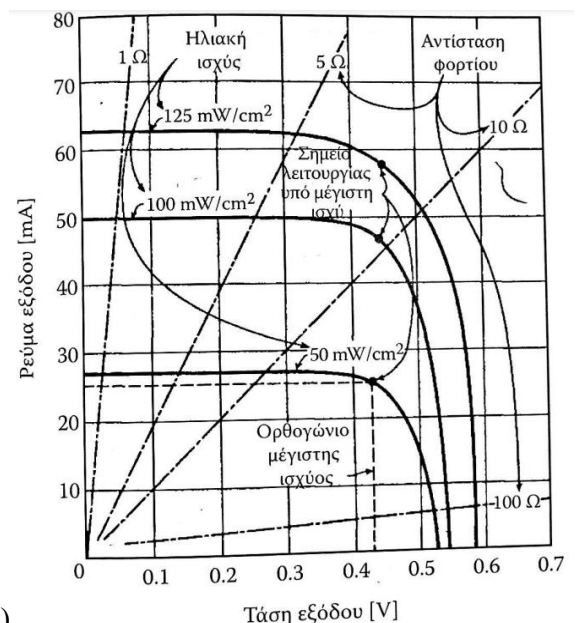
$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad \text{Εξίσωση 1.15}$$

Μια τυπική φωτοβολταϊκή μονάδα αποτελείται από 60 ή 72 κελιά σε σειρά. Μια μονάδα 72 κελιών μπορεί να λειτουργεί είτε ως μία μονάδα των 24 V με τις 72 κυψέλες σε σειρά, είτε ως μονάδες των 12 V με δύο παράλληλες σειρές με 36 κελιά σε σειρά έκαστη. Είναι επίσης δυνατόν, πολλαπλές μονάδες να συνδεθούν σε σειρά ώστε να αυξηθεί η τάση και παράλληλα το ρεύμα, και κατ' επέκταση η παραγωγή υψηλής ισχύος. Σημαντικό στοιχείο στον σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ο καθορισμός του απαιτούμενου πλήθους μονάδων που πρέπει να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα ώστε να εξυπηρετηθεί η απαιτούμενη ενέργεια. Αυτοί οι συνδυασμοί ορίζονται ως συστοιχία (array).

Η χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V μιας φωτοβολταϊκής μονάδας παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 1.8, όπου σημειώνεται και το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος. Οι τιμές της τάσης και του ρεύματος που αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος  $P_{mp}$  συμβολίζονται με  $V_{mp}$  και  $I_{mp}$  αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 1.8 επίσης απεικονίζεται η επίδραση της φωτεινής έντασης και της αντίστασης λόγω του φορτίου στην απόδοση της κυψέλης πυριτίου. Όσο αυξάνεται η ηλιακή ισχύς, η τάση και το ρεύμα εξόδου αυξάνονται, ενώ όσο αυξάνεται η αντίσταση του φορτίου, το ρεύμα εξόδου μειώνεται και αυξάνεται η τάση.



(A)



(B)

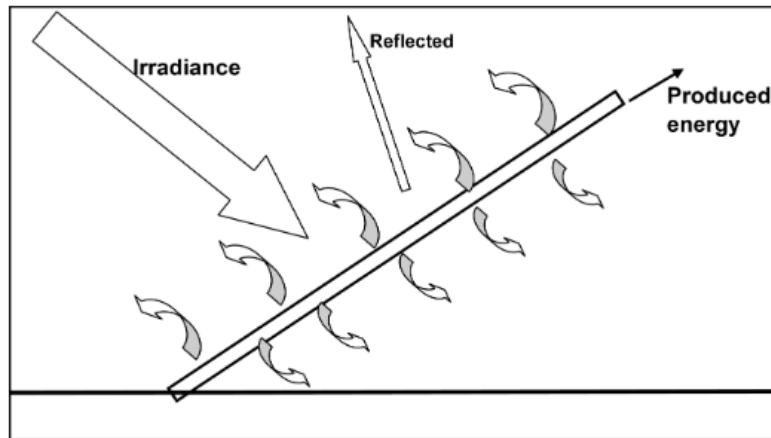
Διάγραμμα 1.8 (A) Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής μονάδας (B) Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V συναρτήσει της ηλιακής ισχύος και της αντίστασης λόγω φορτίου [11]

### 1.3.3. Επίδραση θερμοκρασίας και ακτινοβολίας

Στην Εικόνα 1.6, απεικονίζονται οι ροές θερμότητας στον φωτοβολταϊκό συλλέκτη και αυτές εξηγούνται στην Εξίσωση 1.16. Στην Εξίσωση 1.16 εξισώνονται οι ροές με τις θερμικές απώλειες ψύξης μέσω συναγωγής με το περιβάλλον της συστοιχίας, όπου  $G_{inc}$  η εισερχόμενη ακτινοβολία στη Φ/Β συστοιχία,  $\alpha$  ο συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας,  $\eta$  ο βαθμός απόδοσης του Φ/Β συλλέκτη,  $T_{amb}$  η θερμοκρασία του αέρα στο περιβάλλον,  $T_{cell}$  η θερμοκρασία του Φ/Β κελιού και  $U$  ο συντελεστής απωλειών θερμότητας λόγω συναγωγής.

$$\alpha \cdot G_{inc} \cdot (1 - \eta) = U(T_{cell} - T_{amb})$$

Εξίσωση 1.16



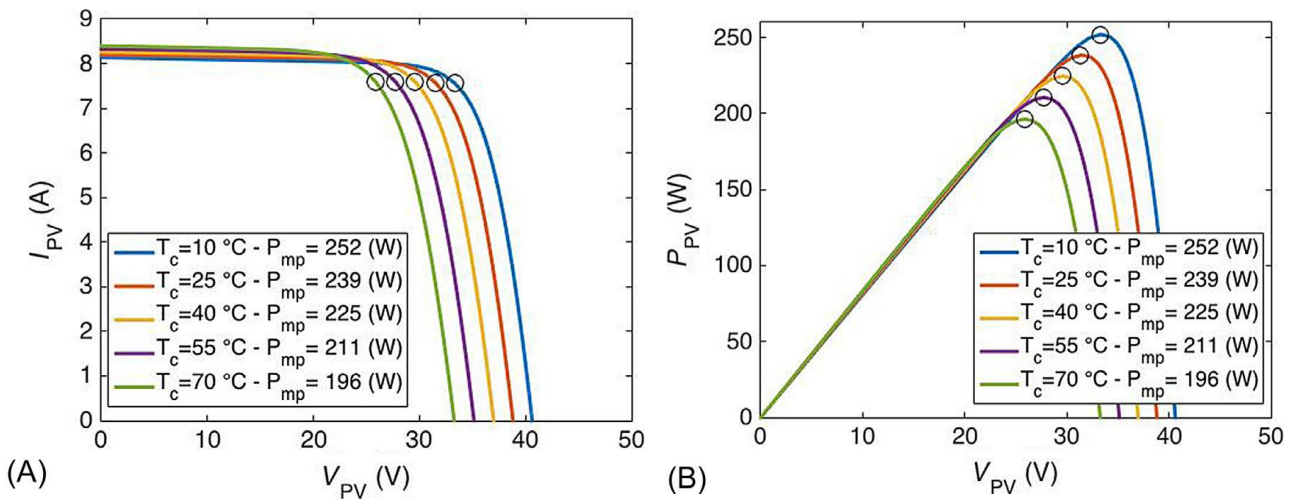
Εικόνα 1.6 Ροές θερμότητας στον φωτοβολταϊκό συλλέκτη [19]

Η θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται στον Φ/Β συλλέκτη περιγράφεται από την Εξίσωση 1.17 και έχει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του συλλέκτη, όπως αναλύεται και στη συνέχεια.

$$T_c = T_{amb} + \frac{1}{U} (\alpha \cdot G_{inc} \cdot (1 - \eta))$$

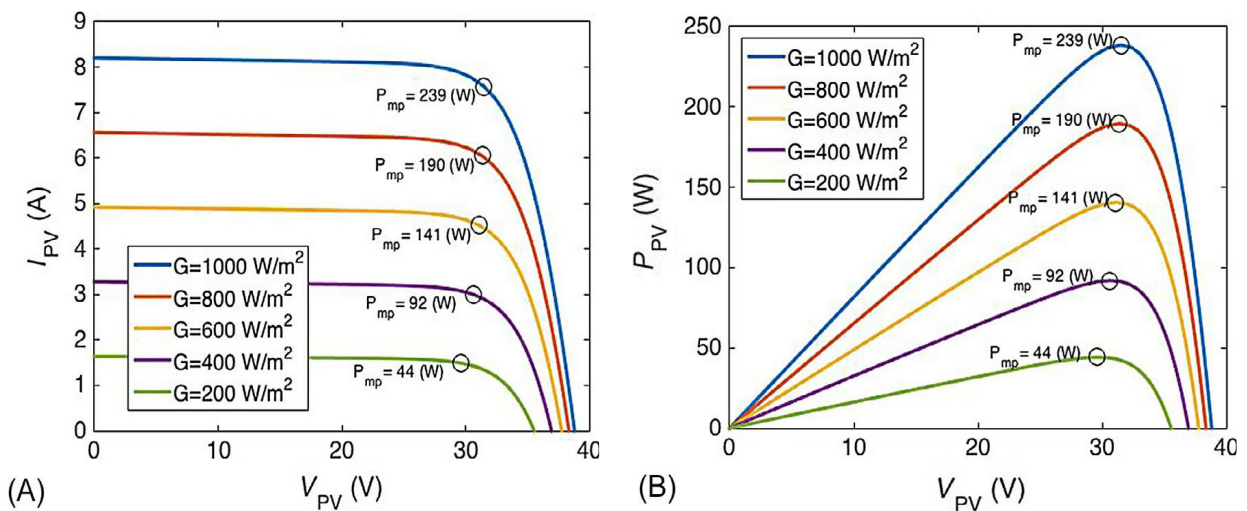
Εξίσωση 1.17

Στο Διάγραμμα 1.9 απεικονίζονται οι καμπύλες λειτουργίας για ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη σε διάφορες θερμοκρασίες, για σταθερή τιμή ηλιακής προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Παρατηρείται ότι η τιμή της μέγιστης ισχύος μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας, λόγω της αύξησης της τάσης εξόδου. Το συμπέρασμα είναι ότι σε μικρότερες θερμοκρασίες η φωτοβολταϊκή μονάδα αποδίδει καλύτερα.



Διάγραμμα 1.9 Χαρακτηριστικές καμπύλες μιας φωτοβολταϊκής μονάδας συναρτήσει της θερμοκρασίας της για προσπίπτουσα κάθετη ακτινοβολία ίση με  $1\text{ kW/m}^2$ : (Α) καμπύλη  $I$ - $V$  (Β) καμπύλη  $P$ - $V$  [10]

Στο Διάγραμμα 1.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες λειτουργίας για ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη μεταβαλλόμενης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, για σταθερή τιμή θερμοκρασίας του. Η τιμή μέγιστης ισχύος αυξάνεται αυξανόμενης της ακτινοβολίας, λόγω της αύξησης του ρεύματος εξόδου. Συμπεραίνεται ότι σε μεγαλύτερες τιμές ακτινοβολίας η φωτοβολταϊκή μονάδα αποδίδει καλύτερα.



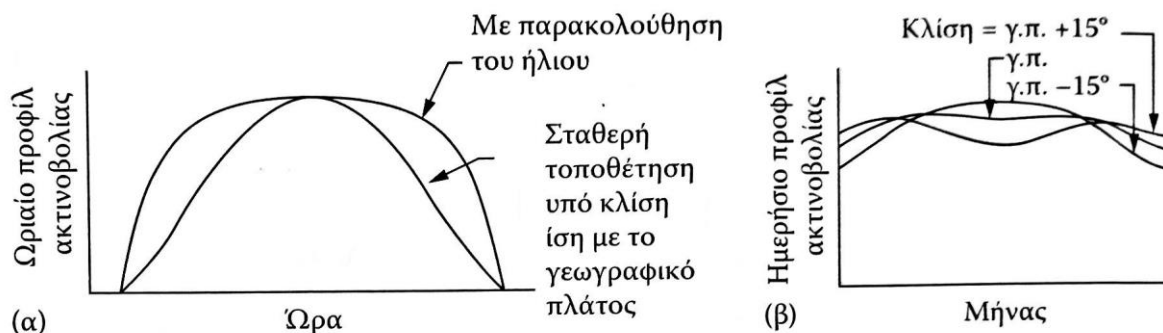
Διάγραμμα 1.10 Χαρακτηριστικές καμπύλες της φωτοβολταϊκής μονάδας συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας με θερμοκρασία μονάδας  $T_c = 25^\circ\text{C}$ : (Α) καμπύλη  $I$ - $V$  (Β) καμπύλη  $P$ - $V$  [10]

### 1.3.4. Κλίση και προσανατολισμός

#### 1.3.4.1. Βέλτιστη γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πάνελ

Η βέλτιστη γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πάνελ εξαρτάται σημαντικά από την τοποθεσία της εγκατάστασης. Για τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση των πλαισίων απαιτούνται δεδομένα της ετήσιας ηλιακής

ακτινοβολίας για την εκάστοτε περιοχή [14]. Γενικά, για τη βέλτιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών κατά τους θερινούς μήνες, η κλίση η οποία επιλέγεται είναι ίση με  $10^\circ$  έως  $15^\circ$  μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες αντίστοιχα  $10^\circ$  έως  $15^\circ$  μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους. Για την ετήσια βέλτιστη απόδοση τους καθ' όλο το έτος, επιλέγεται γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας (βλ. Διάγραμμα 1.11). Στις περιοχές βορείου ημισφαιρίου η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών γίνεται με νότιο προσανατολισμό και αντίστοιχα με βόρειο προσανατολισμό στις χώρες του νοτίου ημισφαιρίου.



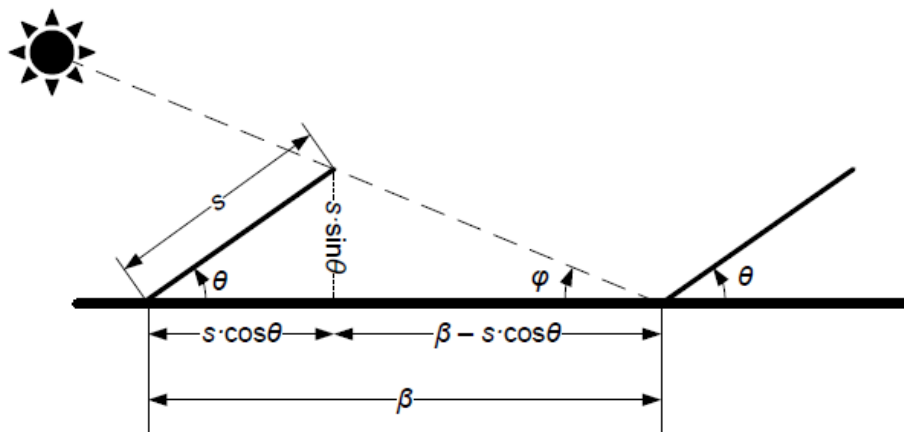
Διάγραμμα 1.11 (α) Διάγραμμα του ωριαίου προφίλ ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας της ημέρας για σύστημα με παρακολούθηση του ήλιου και σύστημα με σταθερή κλίση συλλεκτών (β) Διάγραμμα της ημερήσιας ακτινοβολίας συναρτήσει του μήνα για διάφορες κλίσεις συλλέκτη [11]

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Μέγλερη κ.ά. [15] στη δημοσίευσή τους, η δυνατότητα μεταβολής της γωνίας κλίσης και του προσανατολισμού της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μεταξύ των ψυχρών και θερμών εποχών είναι ικανή να βελτιώσει την ποιότητα και ανομοιομορφία της παραγόμενης ισχύος από το σύστημα. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μεταβολές αυτές θα αντισταθμίσουν την εποχιακή διακύμανση της θέσης του Ήλιου σε σχέση με τη Γη. Τα ποσοστά βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κυμαίνονται από 3.5% έως 26% αναλόγως του επιπέδου ωριαίας ομοιομορφίας ισχύος που απαιτείται.

Οι Mondol κ.ά. [20] μελέτησαν την επίδραση του προσανατολισμού (γωνία αζιμουθίου) και της κλίσης της επιφάνειας Φ/Β πάνελ, συνδεδεμένων στο δίκτυο, σε θαλάσσια κλίματα στην Βόρεια Ιρλανδία. Μέσω προσομοιώσεων TRNSYS, προσεγγίστηκε η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορες γωνίες κλίσεις και αζιμουθία. Τα αποτελέσματα των Mondol κ.ά. έδειξαν ότι η μέγιστη ετήσια ενεργειακή απόδοση των Φ/Β ήταν στις  $30^\circ$  κλίση με νότιο προσανατολισμό. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το πόρισμα των ερευνητών όσον αφορά την επίδραση της κλίσης και του προσανατολισμού της επιφάνειας των πλαισίων. Η μεταβολή της γωνίας κλίσης της επιφάνειας έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην ενεργειακή αποδοτικότητα του πλαισίου σε σύγκριση με τον προσανατολισμό, λόγω της μεγαλύτερης μεταβολής που προκαλείται στην προσπίπτουσα ακτινοβολία.

### Κλίση και σκιάσεις

Η επιλογή της απόστασης βήματος-pitch (βλ. Εικόνα 1.7) σχετίζεται άμεσα με την κλίση των πλαισίων και το ηλιακό ύψος. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα γεωμετρικά μεγέθη που καθορίζουν την ελάχιστη απόσταση βήματος μεταξύ δύο συνεχόμενων Φ/Β συστοιχιών. Τα μεγέθη που συμβολίζονται είναι το πλάτος  $s$  των πλαισίων, η γωνία κλίσης  $\theta$  και η απόσταση βήματος  $\beta$ .



Εικόνα 1.7 Γωνία κλίσης πλαισίων και απόσταση βήματος για αποφυγή σκιάσεων

Η κρίσιμη τιμή απόστασης βήματος, στην οποία δεν προκύπτει σκίαση μεταξύ των πλαισίων, υπολογίζεται μέσω γεωμετρίας και αναλύεται στην Εξίσωση 1.18.

$$\beta_{critical} = \frac{s \cdot (\sin \theta + \cos \theta \cdot \tan \varphi)}{\tan \varphi} \quad \text{Εξίσωση 1.18}$$

#### 1.3.4.2. Γωνία κλίσης πλωτών φωτοβολταϊκών συλλεκτών

Στις μέχρι τώρα εγκαταστάσεις πλωτών φωτοβολταϊκών πάρκων επιλέχθηκε σταθερή κλίση των πλαισίων. Οι μέθοδοι επιλογής της βέλτιστης γωνίας κλίσης των πάνελ τείνουν να διαφοροποιούνται στην περίπτωση των πλωτών φωτοβολταϊκών. Η επιλογή της κλίσης αποτελεί πολυκριτηριακό θέμα, διότι παράγοντες όπως η θέση του ήλιου στην περιοχή, γεωγραφικό πλάτος, τοπικά γεωγραφικά χαρακτηριστικά και τοπικές κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν την καθ' όλο τον χρόνο απόδοση των πλαισίων [21]. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις, η βέλτιστη γωνία πρέπει επίσης να επιλέγεται, βάσει αισθητικών παραγόντων, των φορτίων ανέμου και του διαθέσιμου χώρου της εγκατάστασης και όχι της βέλτιστης παραγωγής ενέργειας [14]. Τέλος, σημαντική είναι η επίδραση και των επικαθίσεων σκόνης, των σκιάσεων και των εποχιακών κατανομών της ακτινοβολίας στην περιοχή, αφού μεγαλύτερες γωνίες κλίσης έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερες απώλειες λόγω επικαθίσεων αλλά μεγαλύτερες απώλειες λόγω σκίασης των πάνελ [21].

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η επιλογή για γωνία κλίσης ίση με μόλις 1.3° με νότιο προσανατολισμό στην πόλη Aichi της Ιαπωνίας, από το Εθνικό Ινστιτούτο Προηγμένης Βιομηχανικής Επιστήμης και Τεχνολογίας της χώρας [22]. Στην διάταξη αυτή σκοπός ήταν η σύγκριση της εξαγόμενης ενέργειας από υδρόψυκτα και αερόψυκτα πλαίσια, τοποθετημένα σε πλωτές σανίδες από πολυστερίνη. Μια άλλη επίσης εγκατάσταση στην Negret της Ισπανίας, με γωνία κλίσης 10° με νότιο προσανατολισμό και ισχύ ίση με 300 kWp, η οποία το 2009 απέδωσε ετήσια παραγόμενη ενέργεια ίση με περίπου 30 GWh και CF 13.5%. Τέλος, μια διάταξη πλωτών φωτοβολταϊκών στην Ιταλία έχει κλίση 8° με σκοπό την μεγιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος ως προς την κατειλημμένη επιφάνεια της συστοιχίας πλαισίων.

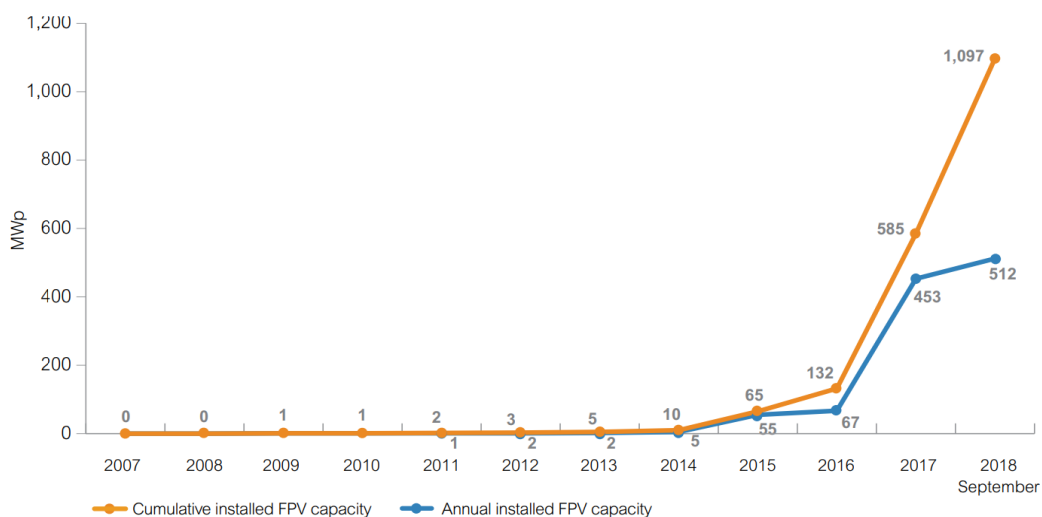
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΛΩΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

### 2.1. Γενικά

Η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β αναμένεται να συνεχιστεί για τις επόμενες δεκαετίες. Η εύρεση κατάλληλης γης για την ανάπτυξη μεγάλων χωρητικότητας εγκατεστημένης ισχύος, για τα χερσαία φωτοβολταϊκά, είναι δύσκολη λόγω τους υψηλού κόστους και μικρής διαθεσιμότητας γης. Αυτό εντοπίζεται ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες χώρες όπως η Ολλανδία και η Σιγκαπούρη [23]. Έτσι λοιπόν, η αναζήτηση νέων τοποθεσιών για εγκατάσταση Φ/Β συλλεκτών είναι ένας τρόπος για να μετριαστεί μερικώς το πρόβλημα. Τέτοιες τοποθεσίες για εγκατάσταση αποτελούν δρόμοι, υδάτινα σώματα (λίμνες, φράγματα, θάλασσα), αναχώματα, σκίαστρα και προσόψεις κτηρίων.

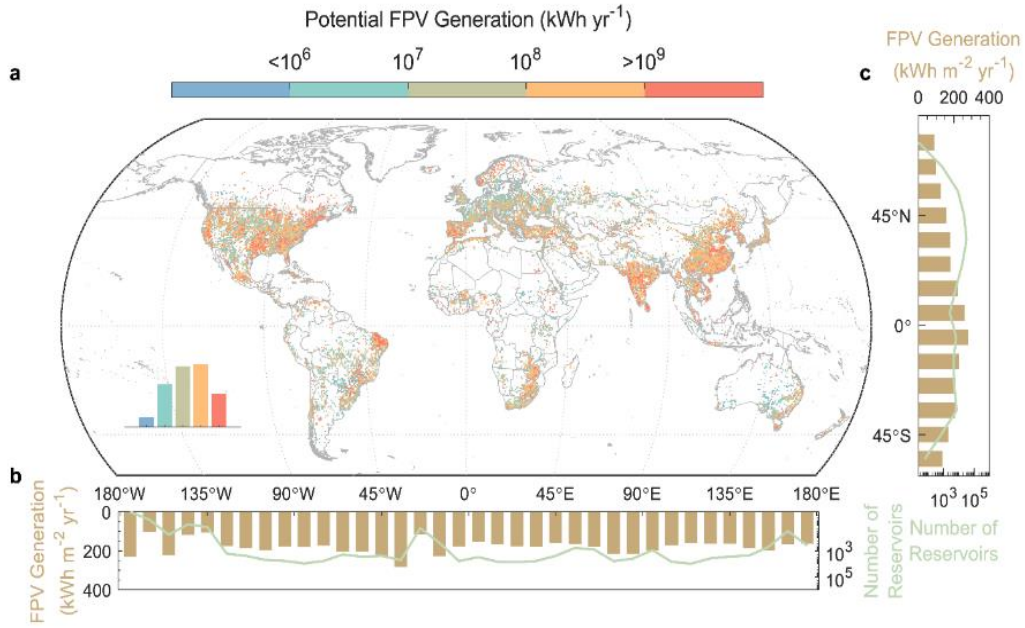
Το πρώτο πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα κατασκευάστηκε το 2007 στο Aichi της Ιαπωνίας, με πολλές χώρες όπως τη Γαλλία, την Ιταλία, την Κορέα, την Ισπανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες, να ακολουθούν. Η πρώτη εμπορική εγκατάσταση ήταν ένα σύστημα στην Καλιφόρνια το 2008, ισχύος 175 kWp που κατασκευάστηκε στο οινοποιείο Far Niente. Το πλωτό αυτό σύστημα, επιπλέει σε μια δεξαμενή νερού αφού η γη χρησιμοποιείται για καλλιέργεια σταφυλιών. Γύρω στο 2013, κατασκευάζονται τα πρώτα πλωτά πάρκα μεσαίων έως μεγάλων τάξεων ισχύος (πάνω από 1 MWp). Χώρες με πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη των πλωτών συστημάτων ήταν κυρίως η Ιαπωνία, η Κορέα και οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Κίνα η οποία τώρα είναι η πρώτη σε εγκατεστημένη ισχύ FPV. Ακολουθώντας και άλλες χώρες υιοθέτησαν αυτή την τεχνολογία όπως την Αυστραλία, τη Βραζιλία, τον Καναδά, η Ινδία, το Ισραήλ, οι Μαλδίδες, η Ολλανδία, η Νορβηγία κ.α. [24].

Η ανάπτυξη των πλωτών Φ/Β γνωρίζει ισχυρή αύξηση εντός των τελευταίων ετών. Η παγκόσμια αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς πλωτής ηλιακής ενέργειας έχει ξεπεράσει το ορόσημο των 1 GWp το 2018 (βλ. Διάγραμμα 2.1). Για το 2022 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς πλωτών Φ/Β ήταν ίση με 4 TWp και αναμένει θα φτάσει τα 10 GWp παγκοσμίως έως το 2025, με σημαντική αύξηση από το 2023 και έπειτα [25].

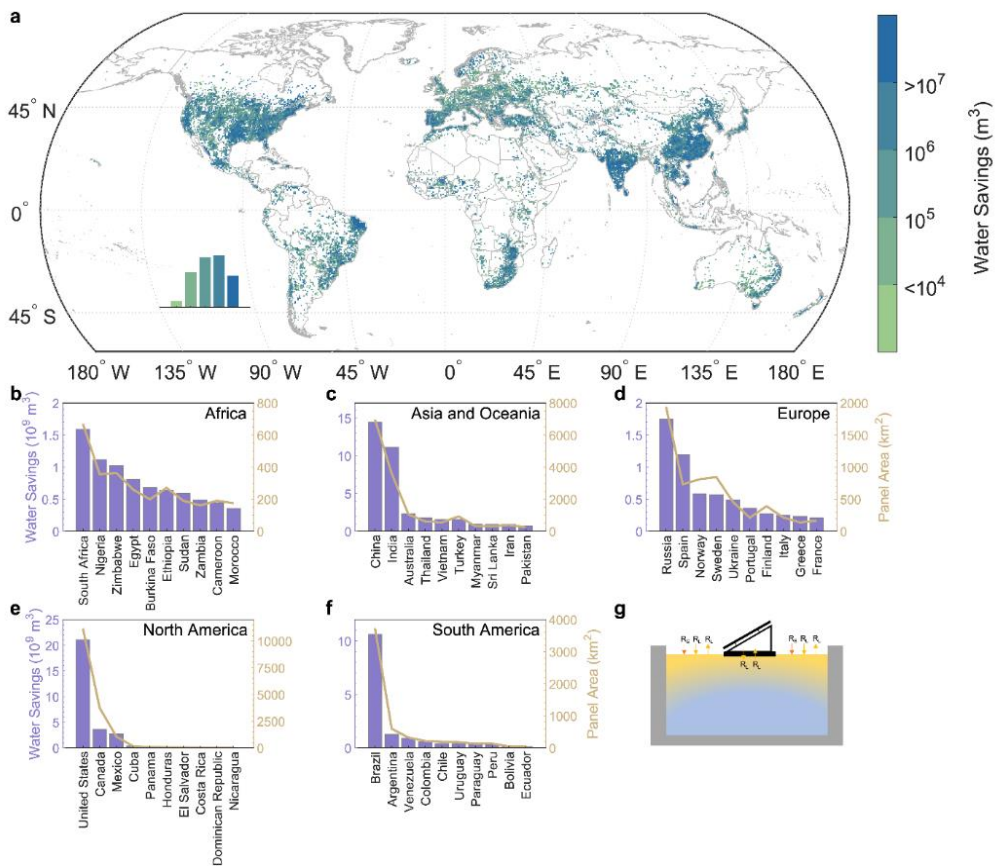


Διάγραμμα 2.1 Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς πλωτών Φ/Β [24]

Το παγκόσμιο δυναμικό πλωτών Φ/Β παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1, ενώ στην Εικόνα 2.2 περιγράφεται η εκτιμώμενη εξοικονόμηση νερού λόγω εγκατεστημένων πλωτών Φ/Β συστημάτων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται στη βιβλιογραφία πως σχετικά με τη χρήση γης, το γεωγραφικό δυναμικό χερσαίων Φ/Β είναι 0.5–0.7 MWp/ha ενώ των πλωτών Φ/Β είναι περισσότερο από 1 MWp/ha [10].



Εικόνα 2.1 Παγκόσμια δυνατή ετήσια παραγωγή πλωτών φωτοβολταϊκών με κάλυψη δεξαμενής 30% (μικρότερη από 30 km<sup>2</sup>) [26]



Εικόνα 2.2 Εκτιμώμενη παγκόσμια εξοικονόμηση νερού από την ανάπτυξη πλωτών φωτοβολταϊκών με κάλυψη ταμιευτήρα 30% (μικρότερη από 30 km<sup>2</sup>) [26]

## **2.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πλωτών Φ/Β**

Στο εξής εδάφιο αναλύονται συγκριτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πλωτών και των χερσαίων Φ/Β. Τα σημεία αναλύονται με τυχαία σειρά.

### **2.2.1. Πλεονεκτήματα**

#### **1) Εξοικονόμηση και καλύτερη ποιότητα νερού**

Η κάλυψη υδάτινων επιφανειών με φωτοβολταϊκά αποδεδειγμένα προκαλεί σημαντική μείωση της ποσότητας εξατμιζόμενου νερού και ταυτόχρονη θωράκιση του νερού από την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της φωτοσύνθεσης και της ανάπτυξης υδρόβιας πανίδας, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του νερού. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα επιθυμητό σε λίμνες άρδευσης όπου σκοπός είναι η εξοικονόμηση και η καλή ποιότητα του νερού. Επίσης αυτές οι εφαρμογές χαρακτηρίζονται από μεγάλες ενεργειακές ανάγκες. Δεδομένου ότι οι δεξαμενές νερού είναι πλήρως ενσωματωμένες στο δίκτυο άρδευσης και ύδρευσης γεωγραφικών περιοχών με σημαντική γεωργική δραστηριότητα, η γη θεωρείται ότι χρησιμοποιείται για παραγωγή τροφίμων [27].

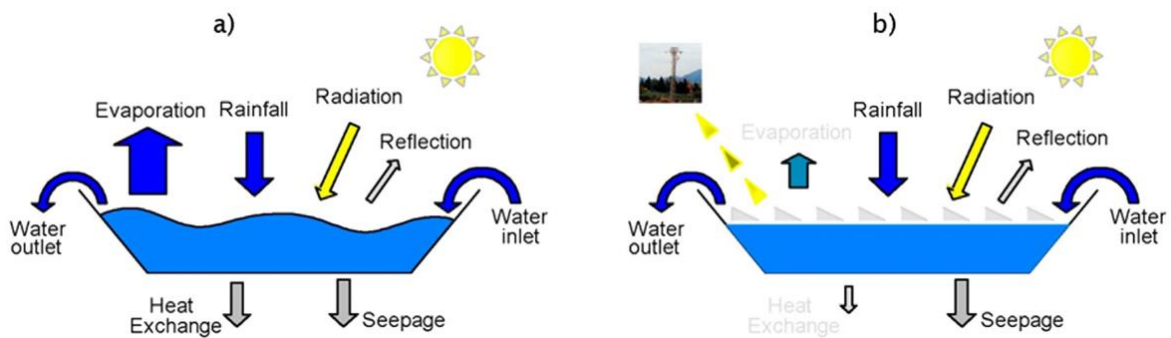
Η μείωση της εξάτμισης του νερού εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν και το ποσοστό της καλυμμένης επιφάνειας. Έτσι, τα FPV αποτελούν εξαιρετική εφαρμογή για τοποθεσίες με ξηρό κλίμα (π.χ. Αυστραλία), όπου είναι δυνατή η εξοικονόμηση πάνω από 80% της εξάτμισης της καλυμμένης επιφάνειας, άρα περισσότερα από 20.000 m<sup>3</sup>/στρέμμα ετησίως.

Οι σημερινές μέθοδοι άρδευσης απαιτούν αυξημένες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των νέων σχεδίων εκσυγχρονισμού, με αποτέλεσμα το κόστος ενέργειας να αποτελεί υψηλό ποσοστό του κόστους λειτουργίας των καλλιεργειών [27]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο γεωργικός τομέας στην Ισπανία, όπου η μετάβαση από τις παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης σε συστήματα υπό πίεση, έχει μειώσει την κατανάλωση νερού κατά 23% ανά 10 στρέμματα, ενώ η κατανάλωση ρεύματος αυξήθηκε κατά 670% [28]. Δεδομένου ότι οι υδάτινοι πόροι μειώνονται με το πέρασμα του χρόνου, όλες οι χώρες καταφεύγουν σε μη παραδοσιακές πηγές όπως το αφαλατωμένο και ανακυκλωμένο νερό. Αυτοί οι όγκοι νερού αποθηκεύονται σταδιακά σε ταμιευτήρες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, καθώς η παραγωγή είναι συνήθως συνεχής και ανεξάρτητη από τις ανάγκες των καλλιεργειών. Αυξάνεται λοιπόν όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών μείωσης της εξάτμισης, με σκοπό την καλύτερη διατήρηση και αξιοποίηση των υπαρχόντων υδάτινων πόρων. Υπό αυτό το πρίσμα, η εγκατάσταση πλωτών Φ/Β σε λίμνες άρδευσης έχει δυνητικά πολλαπλά οφέλη.

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζονται δύο διαγράμματα ροών για καλυμμένη ή ακάλυπτη δεξαμενή νερού. Λόγω της ύπαρξης των Φ/Β πλαισίων στην καλυμμένη με φωτοβολταϊκά δεξαμενή, η ροή λόγω εξάτμισης είναι αρκετά μικρότερη συγκριτικά με την ακάλυπτη δεξαμενή.

Σε μια ερευνητική διάταξη στην Ιορδανία, σε μια περίοδο 30 ημερών, σε μια καλυμμένη λεκάνη με ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας 30% εξοικονομήθηκε το 31.2% του νερού (36 mm), ενώ σε λεκάνη με ποσοστό κάλυψης 50% εξοικονομήθηκε το 54.5% του νερού (63 mm) ταυτόχρονα την ίδια περίοδο με την ακάλυπτη λεκάνη [29]. Στην ίδια διάταξη, παρατηρήθηκε επίσης μείωση του pH, βελτίωση της διαφάνειας του νερού και αύξηση του συνολικού οργανικού άνθρακα. Το τελευταίο εύρημα δηλώνει τη βελτίωση της ποιότητας του νερού και τη μείωση της παραγόμενης βιομάζας από τα φύκια. Ωστόσο, το διαλυμένο οξυγόνο μειώθηκε σημαντικά λόγω της αναπνοής των φυκιών και η απελευθέρωση φωσφορικών αλάτων αυξήθηκε λόγω της αποσύνθεσης τους.

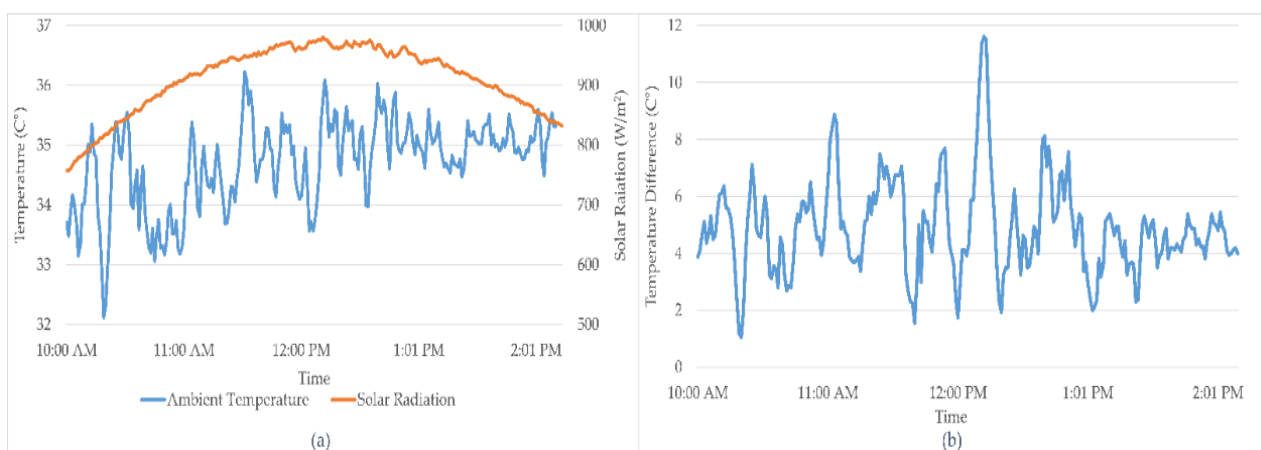




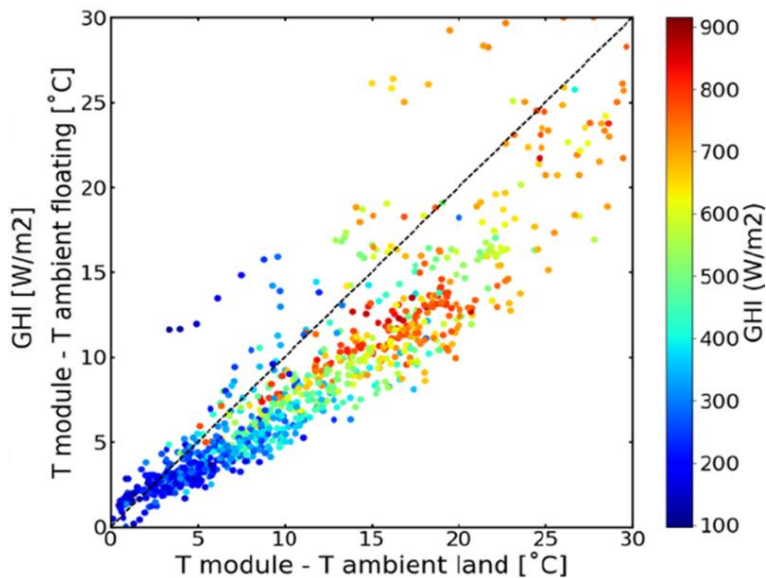
Εικόνα 2.3 Ισορροπία ροών σε α) ακάλυπτη δεξαμενή β) πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα κάλυψης [27]

## 2) Ψύξη των πλαισίων

Τα πλαίσια των πλωτών Φ/Β εγκαταστάσεων αναπτύσσουν χαμηλότερες θερμοκρασίες από τα χερσαία. Αυτό οφείλεται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες που επικρατούν στο περιβάλλον γύρω τους, μιας και τα υδάτινα σώματα όπου και τοποθετούνται είναι ψυχρότερα από τη γη και έτσι, μέσω συναγωγής, τα πλαίσια ψύχονται περισσότερο σε σύγκριση με τα χερσαία. Στην έρευνα των Al-Widyan κ.ά. [29], μετρήθηκαν πλωτά Φ/Β στις 24 Αυγούστου του 2020, στην Ιορδανία, όπου η θερμοκρασία του αέρα κυμαινόταν από 16°C έως 36°C και η μέγιστη και ελάχιστη τιμή ακτινοβολίας ήταν 0 και 976 W/m<sup>2</sup> αντίστοιχα. Η ψυκτική επίδραση του νερού είχε ως αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλωτών Φ/Β πάνελ, κάτι που τεκμηριώνεται και από τις μέγιστες θερμοκρασίες οι οποίες όπως αναφέρονται στη δημοσίευση ήταν για τα πλωτά Φ/Β ίση με 48.7°C (το μεσημέρι) και 54.5°C για τα χερσαία. Στο Διάγραμμα 2.2 παρουσιάζεται η διαφορά των θερμοκρασιών λειτουργίας χερσαίων και πλωτών Φ/Β και παρατηρείται πως η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας ήταν ίση με 11.5°C στις 12:17 μ.μ., όταν και η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν η μέγιστη. Επιπρόσθετα, στη δημοσίευση των Dörenkämper κ.ά. παρατηρείται πως η θερμοκρασία του συστήματος πλωτών Φ/Β είναι ως επί το πλείστον χαμηλότερη σε σύγκριση με τη θερμοκρασία των πλαισίων του επίγειου συστήματος αναφοράς στη στεριά (βλ. Διάγραμμα 2.3) [23]. Τέλος, λόγω της εντονότερης πνοής ανέμων στις υδάτινες επιφάνειες (π.χ. ανοικτή θάλασσα) σε σχέση με τη στεριά, η ψύξη των πλωτών πλαισίων ευνοείται και από αυτό το φαινόμενο.



Διάγραμμα 2.2 (α) Θερμοκρασία περιβάλλοντος και ηλιακή ακτινοβολία την ημέρα της δοκιμής (β) Διαφορά θερμοκρασίας λειτουργίας μεταξύ επίγειων και πλωτών φωτοβολταϊκών πάνελ [29]

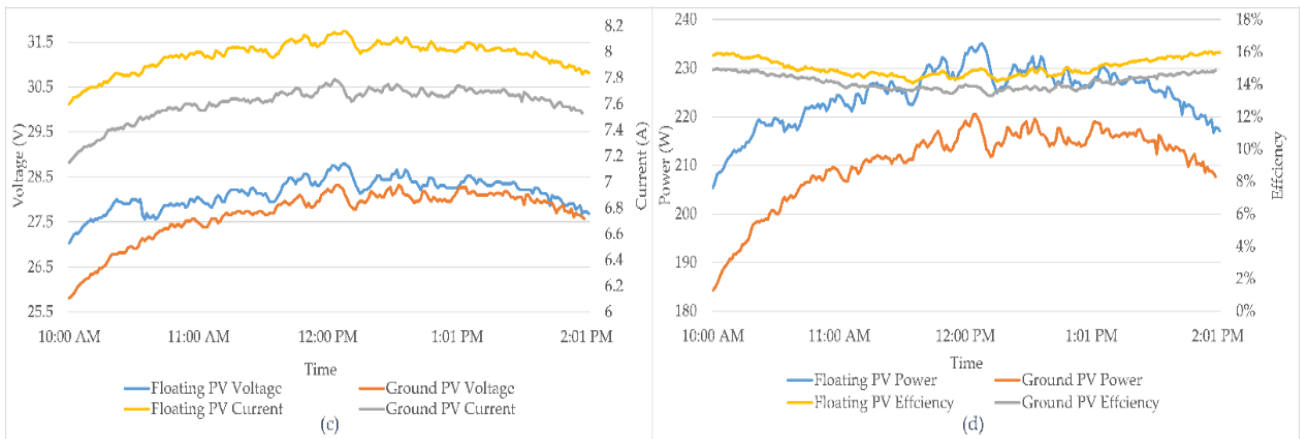


Διάγραμμα 2.3 Διάγραμμα χερσαίου Φ/Β συστήματος συγκρινόμενο με τις θερμοκρασίες του πλωτού συστήματος Φ/Β [23]

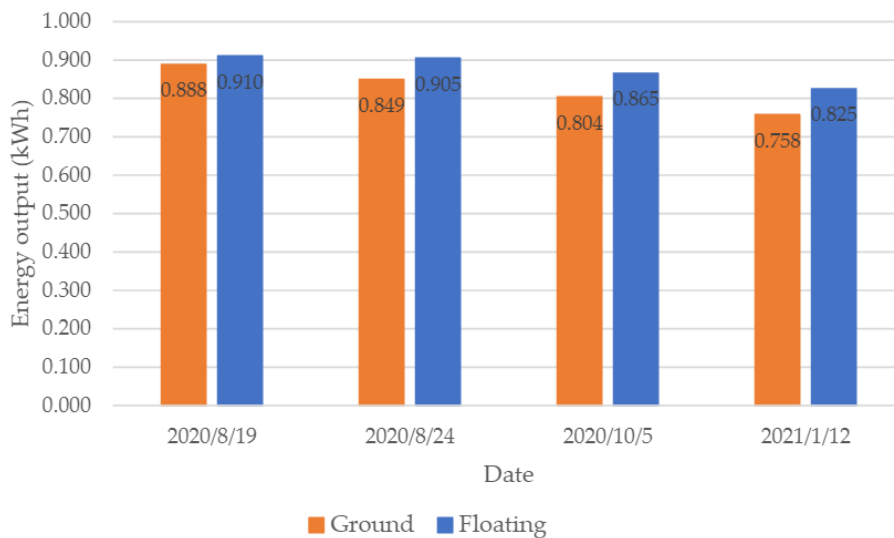
### 3) Καλύτερη ενεργειακή απόδοση

Λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στα πλωτά πλαίσια σε σύγκριση με τα χερσαία παρατηρείται αύξηση της ενεργειακής παραγωγής τους. Στην πειραματική διάταξη των Al- Widyan κ.ά. [29], σημειώθηκε αύξηση στην τάση και στο ρεύμα εξόδου των πλωτών Φ/Β σε σύγκριση με τα επίγεια και αντίστοιχα αύξηση της παραγόμενης ενέργειας. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τάση κατά τη διάρκεια της πειραματικής ημέρας παρουσίασε αύξηση κατά 1.66% στο πλωτό σύστημα (28.79 V) συγκριτικά με το χερσαίο (28.32 V). Αναφέρεται επίσης πως η διαφορά αυτή μειώνεται μέσα στη διάρκεια της ημέρας (βλ. Διάγραμμα 2.4 (c)). Αξιοσημείωτη ήταν και η αύξηση του ρεύματος εξόδου κατά 4.75%. Πιο συγκεκριμένα το ρεύμα εξόδου στα πλωτά και χερσαία Φ/Β ήταν 8.16 A και 7.79 A αντίστοιχα. Όπως ήταν αναμενόμενο, η υψηλότερη τάση και ρεύμα εξόδου για τις πλωτές συστοιχίες είχαν ως αποτέλεσμα και την υψηλότερη παραγωγή ισχύος εξόδου (Διάγραμμα 2.4 (d)) ίση με 6.6 %. Ως επακόλουθο, αυξήθηκε και η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος κατά 7.86%. Στο Διάγραμμα 2.4 (d) παρουσιάζεται η διακύμανση της απόδοσης των πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας του πειράματος και παρατηρείται πως η μέγιστη απόδοση για τα πλωτά πλαίσια ήταν 16.46%, ενώ στα χερσαία ίση με 15.26%. Αντιστοίχως, και ο συντελεστής πλήρωσης αυξήθηκε κατά 5.51%.

Το Διάγραμμα 2.5 συμπεριλαμβάνει την παραγωγή ενέργειας χερσαίων και πλωτών Φ/Β για διάρκεια 4 ωρών (από 10 π.μ. έως τις 2 μ.μ.) για διαφορετικές ημέρες δοκιμών. Προκύπτει το συμπέρασμα πως η ενέργεια του πλωτού συστήματος ήταν υψηλότερη από το επίγειο καθ' όλες τις ημέρες δοκιμών και η αύξηση η οποία σημειώθηκε κυμαίνεται από 2.46% έως 8.81%.



Διάγραμμα 2.4 (c) Διακύμανση τάσης και ρεύματος για τα χερσαία και πλωτά Φ/Β (d) Διακύμανση ισχύος και απόδοσης χερσαίων και πλωτών Φ/Β [29]



Διάγραμμα 2.5 Παραγωγή ενέργειας για διαφορετικές ημέρες δοκιμών μεταξύ 10 π.μ. και 2 μ.μ [29]

#### 4) Αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας

Στόχος της εγκατάστασης πλωτών Φ/Β είναι να τοποθετούνται πλησίον κατοικημένων περιοχών και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμα και σε ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς. Μια πολύ διαδεδομένη εφαρμογή αποτελεί η ενσωμάτωση τους σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, όπου είναι επίσης σημαντική η εξοικονόμηση νερού στους ταμιευτήρες (πλεονέκτημα 1<sup>ο</sup>) και μπορεί να επιτευχθεί η απευθείας σύνδεση των Φ/Β με το ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης εξαιρετική εφαρμογή, λόγω της μηδενικής δέσμευσης γης, είναι σε περιοχές μη συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο σαν τους απομονωμένους οικισμούς και αγροτικές περιοχές. Ειδικότερα για τις νησιωτικές περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλές ενεργειακές ανάγκες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, μια πλωτή εγκατάσταση μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες κατά ένα πολύ μεγάλο βαθμό.

#### 5) Ελάχιστες γειτονικές σκιάσεις

Λόγω των μεγάλων εκτάσεων εγκατάστασης των πλωτών συστημάτων, οι σκιάσεις από γύρω όγκους (π.χ. βουνά, κτήρια) είναι μηδαμινές. Ειδικά στην ανοικτή θάλασσα αυτές είναι μηδενικές, ενώ σε εγκαταστάσεις

σε λίμνες ή φράγματα οι ορεινοί όγκοι είναι οι μόνες πιθανές αιτίες για σκιάσεις. Οι γειτονικές σκιάσεις αποτελούν σοβαρό πρόβλημα για την εγκατάσταση χερσαίων Φ/Β [30].

## **6) Μηδενική δέσμευση γης**

Το μόνο μέρος μιας πλωτής Φ/Β εγκατάστασης το οποίο απαιτεί δεσμευμένη γη είναι τα ηλεκτρικά μέρη, έτσι δεν απαιτείται ούτε δέσμευση μεγάλων εκτάσεων γης, ούτε εκσκαφές στην τοποθεσία εγκατάστασης. Η επιφάνεια πάνω στην οποία δομείται το σύστημα είναι ιδιαίτερα ευρύχωρη και επίπεδη, οπότε δεν χρειάζεται η ανθρώπινη παρέμβαση για την διαμόρφωσή της. Επιπρόσθετα, τα πλωτά Φ/Β αποτελούν τρόπο αποφυγής του ανταγωνισμού μεταξύ γεωργικών ή πράσινων ζωνών. Σε αντίθεση με τα χερσαία Φ/Β, οι πλωτές εγκαταστάσεις έχουν περιορισμένο αντίκτυπο στο περιβάλλον τοπίο και η πληρότητα της επιφάνειας μειώνεται [10]. Στα χερσαία Φ/Β, η αγορά της γης αποτελεί σημαντικό μέρος των εξόδων κεφαλαίου [31].

## **7) Απλή εγκατάσταση και παροπλισμός**

Οι κατασκευές των μονάδων FPV είναι πιο συμπαγείς από τις επίγειες και ως εκ τούτου η διαχείρισή, η κατασκευή και ο παροπλισμός τους είναι απλούστεροι. Επιπρόσθετα, αποτελούνται από κινούμενα μέρη για τη πρόσδεση τους, τα οποία εγκαθίστανται με αναστρέψιμο τρόπο, σε αντίθεση με τα σταθερά και αμετάβλητα θεμέλια στις χερσαίες εγκαταστάσεις Φ/Β [10].

### **2.2.2. Μειονεκτήματα**

#### **1) Καταπόνηση κατασκευής**

Η επίδραση των κυμάτων και του ανέμου στην κατασκευή προκαλούν τη δυναμική κίνηση της και ως αποτέλεσμα αυξάνονται και οι καταπονήσεις στο σύστημα. Στο εδάφιο 2.1 αναλύονται λεπτομερώς οι καταπονήσεις στις πλωτές κατασκευές λόγω των καιρικών συνθηκών.

#### **2) Δυναμική λειτουργία**

Το πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα είναι εκτεθειμένο, περισσότερο από το χερσαίο, στις συνεχώς μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, με αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου του συστήματος να χαρακτηρίζεται από αστάθεια [30]. Στο εδάφιο 2.1 επίσης αναλύονται οι μεταβολές στην ισχύ εξόδου λόγω των κυμάτων, τα οποία προκαλούν την κίνηση των πλαισίων γύρω από τρεις άξονες (3 βαθμοί ελευθερίας). Λόγω της δυναμικής τους λειτουργίας ενδέχεται δυσκολία πρόβλεψης της παραγόμενης ενέργειας. Κατά συνέπεια, η διεύθυνση τους στο δίκτυο αποτελεί μια πρόκληση. Αντιθέτως, όσον αφορά τα χερσαία Φ/Β που δεν υφίστανται κυματισμούς και ταλαντώσεις, είναι πιο εύκολη η πρόβλεψη της παραγωγής τους [31].

#### **3) Διάβρωση και οξείδωση της κατασκευής**

Η επαφή με το υδάτινο περιβάλλον προκαλεί κινδύνους για τη διάβρωση, οξείδωση και τη μείωση της διάρκειας ζωής των μεταλλικών εξαρτημάτων της διάταξης. Κατ' επέκταση, το κόστος των συλλεκτών αυξάνεται αφού η χρήση επιπλέον ανθεκτικού υλικού για την ειδική προστασία τους είναι απαραίτητη [30].

#### **4) Μικρή ποσότητα ανακλώμενης διάχυτης ακτινοβολίας λόγω του νερού**

Το νερό, συγκριτικά με το έδαφος, έχει μικρότερο δείκτη λευκαύγειας-albedo, οπότε η ανακλώμενη διάχυτη ακτινοβολία η οποία προσπίπτει στα πλωτά πλαίσια από το νερό είναι μικρότερη σε σχέση με τα χερσαία λόγω του εδάφους (το μέγεθος του Albedo αναλύεται στο Κεφάλαιο 7).

## **5) Πολυκριτηριακή επιλογή τοποθεσίας**

Η επιλογή τοποθεσίας αποτελεί πολυκριτηριακό ζήτημα μιας και πολλοί παράγοντες, όπως το βάθος του πυθμένα, το αιολικό δυναμικό, η αποφυγή των δραστηριοτήτων ψαρέματος και οι διαδρομές στο ακτοπλοϊκό δίκτυο πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν [30]. Τα κριτήρια της επιλογής αναλύονται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 4.

## **6) Ζητήματα ασφάλειας**

Η συνεχής κίνηση του συστήματος πιθανώς να προκαλέσει κινδύνους κατά τη συντήρηση, ή ακόμα και πτώση στο νερό ή ανατροπή (Εικόνα 2.4). Αυτός ο κίνδυνος δεν υφίσταται στα χερσαία συστήματα, μιας και οι βάσεις και τα πλαίσια είναι σταθερά και ακίνητα.



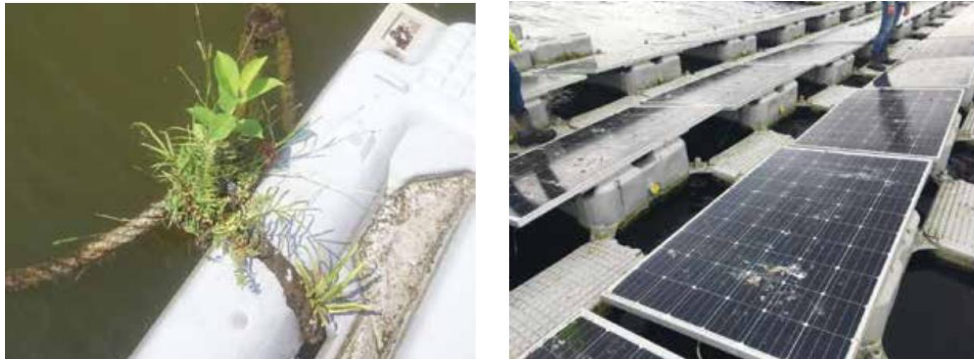
*Εικόνα 2.4 Παράδειγμα ανατροπής πλωτής πλατφόρμας σε πλωτό Φ/Β πάρκο στην Ιαπωνία [10]*

## **7) Ακαθαρσίες από υδρόβια ζωή και υψηλό κόστος συντήρησης**

Η σκόνη και οι διάφορες πιθανές κατακαθίσεις στα πλαίσια αποτελούν το μεγαλύτερο πρόβλημα για τις εργασίες συντήρησης και λειτουργίας τους. Ειδικά τα περιττώματα πτηνών προκαλούν σημαντική ρύπανση στα συστήματα FPV, καθώς οι πλωτές κατασκευές προσελκύουν την άγρια ζωή των πτηνών, τα οποία τα χρησιμοποιούν ως σημεία προσγείωσης και ανάπαυσης [31]. Τα περιττώματα πτηνών (Εικόνα 2.5 (B)) μειώνουν την απόδοση λόγω μερικής σκίασης που προκαλείται και των καυτών σημείων τα οποία αναπτύσσονται και μπορούν να προκαλέσουν σημαντική απώλεια παραγωγής. Η Εικόνα 2.6 απεικονίζει μια θερμική εικόνα ενός ανεπτυγμένου θερμού σημείου, λόγω περιττωμάτων των πουλιών, από φορητή υπέρυθρη κάμερα. Το σημείο ξεχωρίζει αφού εκεί αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες συγκριτικά με το υπόλοιπο μέρος του πλαισίου. Μακροπρόθεσμα, τα περιττώματα πτηνών μπορεί να προκαλέσουν ακόμη και μόνιμη φθορά και υποβάθμιση της ενεργειακής απόδοσης των ηλιακών κυψελών και ολόκληρων των μονάδων, ειδικά σε συστήματα κοντά σε υδάτινα σώματα που επισκέπτονται τακτικά τα θαλασσοπούλια. Η ανάπτυξη βλάστησης στα πλωτά μέρη (πλατφόρμες, πλωτήρες και αρμοί γραμμών πρόσδεσης) των εγκαταστάσεων είναι επίσης συχνό φαινόμενο και πηγάζει από τους σπόρους που ανευρίσκονται στα περιττώματα των πτηνών. Μέσα στις εργασίες συντήρησης θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται και ο καθαρισμός από τα διάφορα φυτά σε τακτική βάση. Ως εκ τούτου, απαιτούνται συχνοί γενικοί καθαρισμοί, που αυξάνουν το κόστος συντήρησης και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν σοβαρά κατά τη φάση σχεδιασμού. Είναι εξίσου

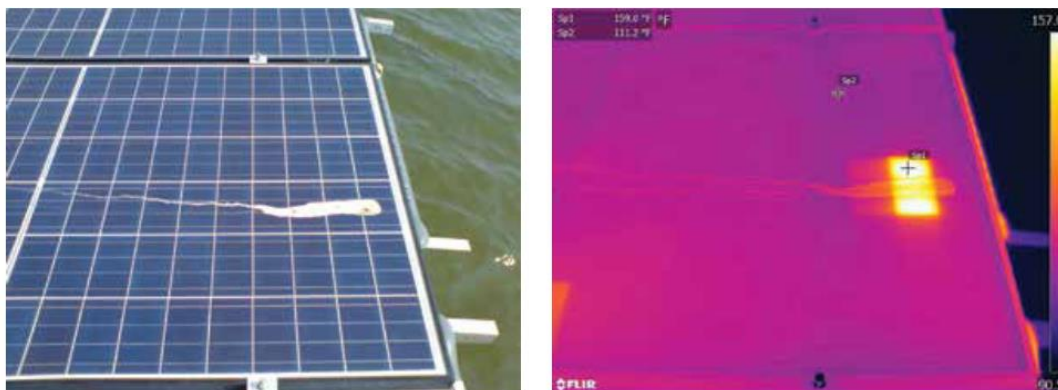
σημαντικό και για την περίοδο λειτουργίας του έργου, ώστε να αποφευχθούν πιθανές ενεργειακές απώλειες και μείωση επίσης παραγωγικότητας.

Σημαντική είναι η ανάπτυξη συστημάτων αποτροπής πτηνών και φραγμού. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι χωρίς φραγμούς, όπως συσκευές υπερήχων, απωθητικά ήχου ή συσκευές οπτικού φόβου. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι η χρήση συστημάτων λέιζερ είναι ικανή να μειώσει τις εκφορτώσεις πτηνών κατά 75% [31]. Τέλος, οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις των προαναφερθέντων λύσεων οφείλουν να διερευνώνται και να τεκμηριώνονται κατά τη φάση σχεδιασμού ενός έργου.



(A) (B)

Εικόνα 2.5 (A) Ανάπτυξη βλάστησης στις πλωτές κατασκευές (B) Περιττώματα πουλιών σε πλωτά πλαίσια [31]



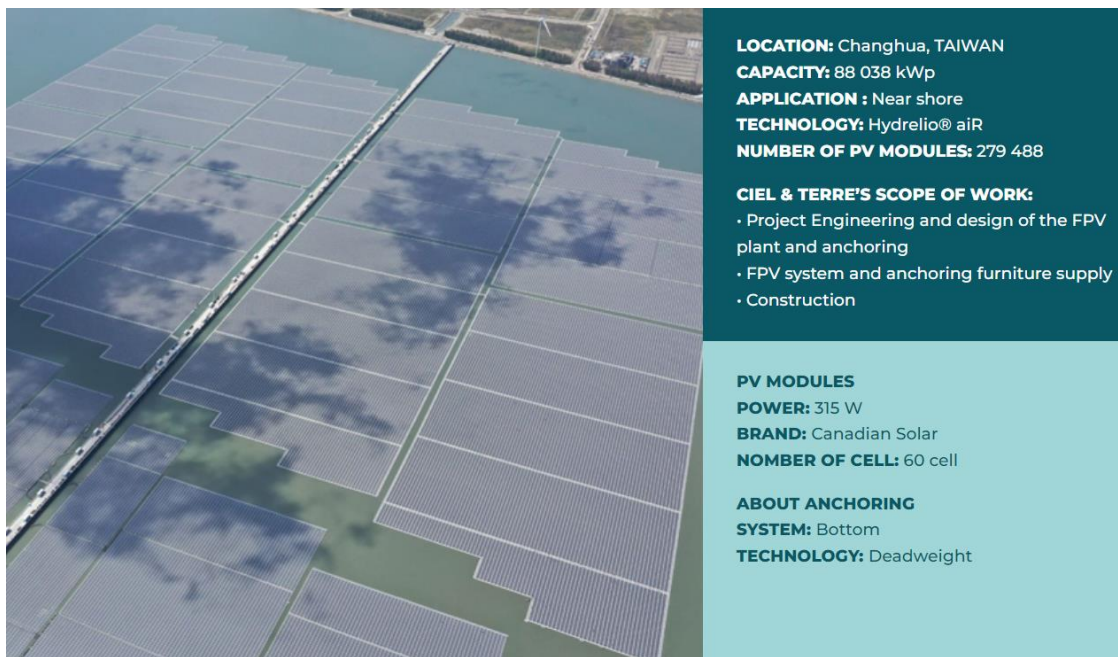
Εικόνα 2.6 Θερμό σημείο από περιττώματα πουλιών [31]

### 2.3. Εφαρμογές πλωτών φωτοβολταϊκών

Τα πλωτά Φ/Β συναντώνται σε πληθώρα εφαρμογών και διατάξεων και επίσης σε διάφορες τάξεις ισχύος. Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται έργα τάξεως από 1.23 MWp έως και 88 MWp. Οι υδάτινοι όγκοι, όπου τοποθετούνται τα συστήματα, είναι φράγματα, λίμνες άρδευσης, παλιά λατομεία και μεταλλουργεία και ακτές σε ανοικτή θάλασσα. Τέλος στην Εικόνα 2.13 παρουσιάζεται μια σύγχρονη εφαρμογή, όπου συνδυαστικά τοποθετούνται υπεράκτια αιολικά και Φ/Β πάρκα. Τέτοιες εφαρμογές συνδυασμού των δύο τεχνολογιών αναπτύσσονται στη βιομηχανία και σε ερευνητικό επίπεδο.



Εικόνα 2.7 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β σε λίμνη άρδευσης στην Ιαπωνία ισχύος 1.23 MWp [32]



Εικόνα 2.8 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β σε θάλασσα στην Ταϊβάν ισχύος 88 MWp [32]



**LOCATION:** Anhui, CHINA  
**CAPACITY:** 70 005 kWp  
**APPLICATION:** Quarry and mining  
**TECHNOLOGY:** Hydrelío® Classic  
**NUMBER OF PV MODULES:** 194 731

**CIEL & TERRE'S SCOPE OF WORK:**

- Project Engineering and design of the FPV plant and anchoring
- FPV system and anchoring furniture supply
- Construction

**ABOUT PV MODULES**  
**POWER:** 335/360 W  
**BRAND:** Lerri Solar  
**NUMBER OF CELL:** 72 cell

**ABOUT ANCHORING**  
**SYSTEM:** Bottom  
**TECHNOLOGY:** Screw

Εικόνα 2.9 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β σε υδάτινα σώματα παλιών λατομείων και μεταλλουργείων στην Κίνα ισχύος 70 MWp [33]



**LOCATION:** Changhua, Taiwan  
**CAPACITY:** 22 752 kWp  
**APPLICATION:** Water storage  
**TECHNOLOGY:** Hydrelío® aiR  
**NUMBER OF PV MODULES:** 57 600

**CIEL & TERRE'S SCOPE OF WORK:**

- Project Engineering and design of the FPV plant and anchoring
- FPV system and anchoring furniture supply
- Construction

**ABOUT PV MODULES**  
**POWER:** 395 W  
**BRAND:** TSEC  
**NUMBER OF CELL:** 72 cell

**ABOUT ANCHORING**  
**SYSTEM:** Hybrid  
**TECHNOLOGY:** Screw anchors

Εικόνα 2.10 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β σε φράγμα στην Ταϊβάν ισχύος 22.75 MWp [34]





Εικόνα 2.11 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β στη θάλασσα στα ανοικτά της δυτικής ακτής της Νορβηγίας [24]



Εικόνα 2.12 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β στη θάλασσα στα ανοικτά των Μαλβίδων [10]



Εικόνα 2.13 Υπεράκτιο αιολικό και Φ/Β πάρκο [35]

## 2.4. Πλωτές κατασκευές και διατάξεις

Στο παρόν εδάφιο αναλύονται πλωτές κατασκευές οι οποίες ήδη χρησιμοποιούνται σε υπεράκτιες πλωτές εγκαταστάσεις και πλωτά πάρκα σε λίμνες/φράγματα ή μελετήθηκαν σε ερευνητικό επίπεδο.

### 2.4.1. Έρευνα των Grech κ.ά.

Το 2016, στο 32<sup>ο</sup> Ευρωπαϊκό Συνέδριο και Έκθεση Φωτοβολταϊκής Ηλιακής Ενέργειας, οι Grech M. κ.ά. [36] από το Πανεπιστήμιο της Μάλτας παρουσίασαν την μελέτη τους για την κατασκευή και εξέταση διάφορων πρωτότυπων εγκαταστάσεων πλωτών φωτοβολταϊκών, με σκοπό την ανάπτυξη τους στο θαλάσσιο περιβάλλον της Μάλτας.

Δεδομένης της υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας, υψηλού κόστους αγοράς γης και χαμηλού αιολικού δυναμικού της χώρας, η εγκατάσταση FPV παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Στην έρευνα αυτή μελετώνται διάφορες πλωτές συσκευές, τεχνικές πρόσδεσης, φωτοβολταϊκές τεχνολογίες και οι μακροχρόνιες μετρήσεις συγκρίνονται με αντίστοιχες χερσαίες εγκαταστάσεις.

#### Υλικά πλωτής δομής:

Σε αρχικό στάδιο η πρώτη επιλογή υλικού ήταν διάφορα είδη ξύλου, όμως λόγω του μεσογειακού κλίματος θεωρήθηκε πως οι απαιτούμενες συντηρήσεις θα ήταν πολυπληθείς κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Σε επόμενο στάδιο, μελετήθηκαν κοίλα κυβοειδή σχήματα σκυροδέματος, με εσωτερικά γεμίσματα διογκωμένης πολυστερίνης (ESP) για αποφυγή διαρροής νερού στο εσωτερικό. Τοποθετήθηκαν επιπρόσθετες ράβδοι πλαστικού (υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο) ώστε να μειωθεί το ολικό κόστος και επιλέχθηκε αεριζόμενο σκυρόδεμα για μείωση του βάρους της κατασκευής. Ένας άλλος σχεδιασμός αφορούσε μια δομή από διογκωμένη πολυστερίνη (ESP), με επίστρωση ειδική για αντοχή σε θαλάσσιες συνθήκες, πάνω σε μεταλλικό πλαίσιο. Τέλος, ένας επίσης φθηνός κατασκευαστικά σχεδιασμός ήταν ένα μεταλλικό κουτί αναρτημένο από συσκευές επίπλευσης, δηλαδή μια δομή μεταλλικού σωλήνα στηριζόμενη σε πλαστικούς πλωτήρες τύμπανων. Τα υλικά της κατασκευής αυτής είναι εύκολα προσβάσιμα αφού είναι πλήρως διαδεδομένα στο εμπόριο και η συναρμολόγηση είναι εύκολη. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει το κόστος ανά m<sup>2</sup> για διάφορα υλικά πλωτών πλατφόρμων.

Πίνακας 2.1 Κόστος ανά m<sup>2</sup> για διάφορα είδη πλωτών πλατφόρμων [36]

Type of floating platform	Cost €/m <sup>2</sup>
Steel cuboid	€35.91
Steel platform with HDP drums	€19.59
Steel pipes with drums	€7.31
Wood mahogany	€17.50
Wood Scotts pine	€8.00
Concrete with EPS	€80.40
Concrete with HDP drums	€21.24
Concrete platform with drums	€17.24

#### Κατασκευές της εργασίας:

Σε όλες τις εγκαταστάσεις που μελετήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά πλαίσια, μη συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο, αγκυρώθηκαν και τοποθετήθηκαν με νότιο προσανατολισμό. Επίσης προσδέθηκαν σε 12 μπλοκ σκυροδέματος τοποθετημένα στον βυθό της θάλασσας, με σχηματισμό μητρώου 4 επί 3. Οι αγκυρώσεις της κατασκευής σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να έχουν τόσο μεγάλο αποτόπωμα, ώστε να είναι λιγότερο επιρρεπείς σε κινήσεις εξαιτίας θαλασσιών ρευμάτων και κινήσεων θεμελίωσης.

## Διατάξεις και κατασκευές οι οποίες μελετήθηκαν:

### **1) Ενισχυμένο διογκωμένο πολυστυρένιο**

Κατασκευάστηκαν δύο σχεδίες διαστάσεων 7.5 m επί 1.2 m καλυμμένες με φύλλο θερμοπλαστικής πολυολεφίνης (TPO) για λόγους αντοχής (βλ. Εικόνα 2.14). Κάθε σχεδία φέρει τρεις φωτοβολταϊκές μονάδες λεπτού φιλμ (thin film PV modules) ισχύος 144 Wp, αποτελούμενες από 22 άμορφα ηλιακά κύτταρα πυριτίου τριπλής διασταύρωσης, εγκλεισμένα σε διαφανές πολυμερές ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία και τις καιρικές συνθήκες. Η αντίστοιχη εγκατάσταση στη στεριά τοποθετήθηκε σε απόσταση 500 m από την πλωτή, έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία και η αιθριότητα να είναι όμοιες και άρα συγκρίσιμες στις δύο τοποθεσίες.



Εικόνα 2.14 Πλωτή πλατφόρμα από διογκωμένο πολυστυρένιο [36]

Η ηλεκτρική αποδοτικότητα των πλωτών Φ/Β ήταν 4.2% μεγαλύτερη από τα χερσαία και σημαντικό γεγονός αποτελεί το ότι οι Φ/Β μονάδες ήταν επισυναπτόμενες πάνω σε επίπεδη στερεά επιφάνεια, με αποτέλεσμα οι σχεδίες να μην επωφελούνται καθόλου από την ψύξη λόγω της θάλασσας. Ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει την ενεργειακή απόδοση των δύο εγκαταστάσεων, όπου αναδεικνύεται η μεγαλύτερη απόδοση των πλωτών Φ/Β σε σχέση με τα χερσαία.

Πίνακας 2.2 Τριμηνιαία μέση ισχύς ανά εγκατεστημένο Wp της φωτοβολταϊκής μονάδας λεπτού φιλμ για την πλωτή και χερσαία εγκατάσταση [36]

**Table III:** Quarterly average output per Wp installed of the thin film PV module

Quarter	Raft Module	Land Module
2015 Q2	409	408
2015 Q3	378	332
2015 Q4	134	137
2016 Q1	199	203
2016 Q2*	321	304
<b>Total</b>	<b>1441</b>	<b>1384</b>

\* Till 16 June 2016

Στο τέλος της δοκιμής, οι δύο σχεδίες είχαν πολύ καλή συμπεριφορά στο θαλασσινό περιβάλλον, με καλή αντοχή σε θυελλώδεις ανέμους και σε κύματα με μέγιστο ύψος 2 m. Μετά την πάροδο 18 μηνών, τα υλικά κατασκευής της πλατφόρμας, καθώς και τα Φ/Β στοιχεία, δεν παρουσίασαν κανένα ίχνος διάβρωσης ή φθοράς λόγω των καιρικών συνθηκών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι επικαθίσεις αλατιού στα πλαίσια ήταν αμελητέες και πολύ λιγότερη σκόνη βρέθηκε στην επιφάνεια στις, σε σύγκριση με τη χερσαία εγκατάσταση. Έτσι, θεωρείται πως η εξής κατασκευή παρουσιάζει καλά ενεργειακά χαρακτηριστικά και ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες και το θαλασσινό περιβάλλον.

## 2) Πλέονσα φωτοβολταϊκή μονάδα

Η δεύτερη κατασκευή, αποτελείται από πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, ημιάκαμπα και πλαισιωμένα με πλάκα στήριξης αλουμινίου (κατάλληλα για θαλάσσιο περιβάλλον) τοποθετημένα πάνω σε πλωτό πολυστυρένιο. Η εγκατάσταση αποτελείται από δύο ηλεκτρικά διαχωρισμένα Φ/Β στοιχεία ισχύος 40 Wp και παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.15. Συγκρίνοντας με την αντίστοιχη εγκατάσταση στη στεριά, η ενεργειακή απόδοση της πλωτής κατασκευής είναι φανερά υψηλότερη, περίπου κατά 11% (Πίνακας 2.3).



Εικόνα 2.15 Πλέονσα Φ/Β μονάδα [36]

Πίνακας 2.3 Ημερήσια μέση παραγόμενη ισχύς και ενέργεια πλωτών Φ/Β μονάδων ανά Wp εγκατεστημένο [36]

Module	Watt hour	Total Wh
Float Module 1	3.70	7.48
Float Module 2	3.78	
Land Module 1	3.30	6.73
Land Module 2	3.43	

Οι μετρήσεις έγιναν κατά την περίοδο Αυγούστου με Σεπτεμβρίου του 2015, όταν η θερμοκρασία του αέρα ήταν 33°C. Οι μελετητές αναφέρουν ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β στην στεριά ήταν μεγαλύτερη από του αέρα, ενώ η θερμοκρασία της θάλασσας ήταν 24°C, προκαλώντας την ψύξη των πλωτών μονάδων. Η επιφάνεια των πλωτών πλαισίων ήταν πολύ κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας και ως εκ τούτου η ψύξη λόγω της θάλασσας ήταν ο κύριος παράγοντας βελτίωσης της ενεργειακής τους απόδοσης. Εν τέλει, χαρακτηριστικά αναφέρεται πως παρόλο που τα Φ/Β στοιχεία θεωρούνταν κατάλληλα για θαλασσινό περιβάλλον, τα πλαίσια αλουμινίου ανέπτυξαν διάβρωση που οδήγησε στην ολική βλάβη και κατάρρευση

τους μετά από μερικές εβδομάδες. Ως μέτρο βελτίωσης προτείνεται η καλύτερη ενθυλάκωση των μονάδων ώστε να βελτιωθεί η αντοχή σε διάβρωση.

### 3) Αυτοπλωτή φωτοβολταϊκή συσκευή με θόλο

Η κατασκευή αυτή αποτελείται από διαφανές ακρυλικό αυτοπλωτό ημισφαίριο, όπου εντός του «θόλου» τοποθετούνται δύο είδη μικρών φωτοβολταϊκών κελιών συνδεδεμένα σε ανεξάρτητα ηλεκτρικά συστήματα (βλ. Εικόνα 2.16). Συγκεκριμένα, το ένα είδος αποτελούν 20 εποξικές μονάδες πυριτίου είναι συνδεδεμένες σε σειρά, ενώ το δεύτερο αποτελείται από πέντε ελαστικές λωρίδες πυριτίου επίσης σε σειρά. Οι θόλοι ενώθηκαν μεταξύ τους μέσω καλωδίου στην κυρίως σχεδία.



Εικόνα 2.16 Φωτοβολταϊκή συσκευή με πλωτό θόλο [36]

Εκ φύσεως του, ο ημισφαιρικός σχεδιασμός δεν προσφέρει τη βέλτιστη έκθεση των Φ/Β στην ηλιακή ακτινοβολία, έτσι η απόδοση των λωρίδων πυριτίου ήταν ιδιαίτερα χαμηλή, ενώ τα στοιχεία άμορφου πυριτίου απέδωσαν 4 Wh. Επίσης παρατηρήθηκαν συμπυκνώματα στο εσωτερικό μέρος του θόλου όμως αυτά μειώθηκαν σχεδόν ολικώς με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για εξαγωγή περισσότερης ενέργειας, πρέπει το κόστος διασύνδεσης κάθε θόλου και συστήματος πρόσδεσης να αντισταθμίζουν την ενεργειακή παραγωγή. Λόγω της χαμηλής ενεργειακής απόδοσης του εξής μοντέλου, προτείνεται η χρήση του σε εφαρμογές με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις ή η εγκατάσταση του σε υδάτινες επιφάνειες με μικρά βάθη ώστε το κόστος πρόσδεσης να μειωθεί αρκετά λόγω της απουσίας πλατφόρμας. Επίσης, σημαντική είναι η πρόνοια για επαρκή απόσταση μεταξύ των θόλων η οποία ως αποτέλεσμα απαιτεί μεγάλη επιφάνεια τοποθέτησης.

#### 2.4.2. Πλωτή εγκατάσταση της SolarinBlue

Στην Εικόνα 2.17 παρουσιάζεται μια πλωτή εγκατάσταση της εταιρείας SolarinBlue στη Γαλλία. Το εξής έργο αποτελεί την πρώτη υπεράκτια πλωτή Φ/Β διάταξη στη Γαλλία και τη Μεσόγειο Θάλασσα. Εγκαινιάστηκε στις 17 Μαρτίου 2023 και αναμένεται το συνολικό πλήθος των μονάδων να φτάσει τις 25, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 300 kWp και επιφάνεια 5 στρεμμάτων. Η κατασκευαστική εταιρεία εκτιμά ότι η ετήσια παραγωγή θα είναι 400 MWh και θα συνδεθεί μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου στο λιμάνι του Sète για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας [37].



Εικόνα 2.17 Υπεράκτια κατασκευή της εταιρείας SolarinBlue [37]

### **2.4.3. Πλωτή εγκατάσταση της Tractebel**

Στην Εικόνα 2.18 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της διάταξης υπεράκτιας εγκατάστασης της εταιρείας Tractebel με τεχνολογία πλωτών φωτοβολταϊκών SEAVOLT. Η τεχνολογία αυτή έχει μεγάλη αντοχή σε έντονες και σκληρές συνθήκες ανοικτής θάλασσας, αφού δημιουργεί μεγάλες επιφάνειες προστατευόμενες από τα κύματα. Μέσω του αρθρωτού σχεδιασμού της, χαρακτηρίζεται από εύκολη προσαρμογή σε διαφορετικές τοποθεσίες και απαιτήσεις όπως για παράδειγμα η ενσωμάτωση σε υπεράκτια αιολικά πάρκα. Μετά από εργαστηριακές δοκιμές, αναπτύσσεται μια υπεράκτια δοκιμαστική εγκατάσταση στα ανοιχτά των βελγικών ακτών της οποίας η λειτουργία θα ξεκινήσει το καλοκαίρι του 2023.



Εικόνα 2.18 Υπεράκτια κατασκευή της εταιρείας Tractebel [38]

### **2.4.4. Πλωτή εγκατάσταση της Oceans of Energy**

Στην Εικόνα 2.19 παρουσιάζεται η υπεράκτια διάταξη πλωτών Φ/Β ισχύος 17 kW στην ολλανδική Βόρεια Θάλασσα, η οποία απέχει 15 km από την ακτή. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση αντιμετωπίζει έντονες συνθήκες (κύματα έως 13 m, ισχυρές καταιγίδες, ταχύτητα ανέμου έως 62 κόμβους και παλιρροιακά ρεύματα μέχρι και 4 κόμβους) [39].



Εικόνα 2.19 Υπεράκτια εγκατάσταση της Oceans of Energy [39]

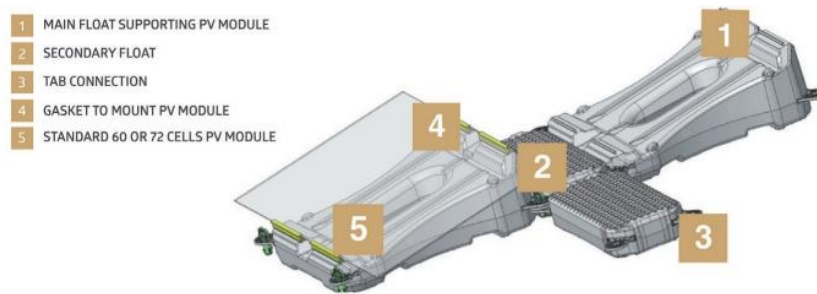
#### **2.4.5. Πλωτή εγκατάσταση της Ciel&Terre**

Στην Εικόνα 2.20 απεικονίζεται η διάταξη της εταιρείας Ciel&Terre. Αφορά διάταξη πλωτών μονοανακλινόμενων πάνελ, τα οποία στηρίζονται το κάθε ένα στον δικό του ξεχωριστό πλωτήρα σε διαμόρφωση μιας σειράς. Τα πάνελ τοποθετούνται ώστε το μήκος τους να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος και σε κλίση  $10^\circ$ , ώστε η εκτιθέμενη επιφάνεια στον άνεμο να είναι μικρότερη. Όσον αφορά το συνολικό βάρος της κατασκευής, το βάρος της γραμμής πρόσδεσης είναι αμελητέο συγκριτικά με το βάρος του ηλιακού πάνελ [40]. Το κύριο πλεονέκτημά του έγκειται στην ελαφρότητα της σχεδίας, η οποία ζυγίζει λιγότερο από 10 kg και στην απλότητα που χαρακτηρίζει τη συναρμολόγηση της διάταξης. Η τελευταία δεν απαιτεί χρήση γερανών ή μηχανημάτων, αλλά κάθε συνδεδεμένη γραμμή πλαισίων σπρώχνεται πάνω στην επιφάνεια του νερού και επιπλέει. Οι πλωτήρες Hydrelio αυτής της κατασκευής, είναι κατασκευασμένοι από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο HDPE με την διαδικασία της χύτευσης με χτύπημα [41]. Αυτός ο σχεδιασμός της Ciel&Terre έχει ευρέως διαδοθεί στη βιομηχανία και δεκάδες MW έχουν ήδη εγκατασταθεί.

Στον αντίποδα, η ελαφρότητα της δομής την καθιστά ευαίσθητη στην καταπόνηση λόγω των κλιματικών συνθηκών. Μια ισχυρή καταιγίδα μπορεί να βλάψει τις σχεδίες ή ακόμα και την πλήρη δομή. Ένα επιπρόσθετο μειονέκτημα είναι η δυσκολία τροποποίησης της πλωτής δομής δηλαδή η ενσωμάτωση μηχανισμού παρακολούθησης του ήλιου (tracking) και συστήματος ψύξης. Τέλος, η πλατφόρμα χαρακτηρίζεται ως αρκετά ασταθής με αποτέλεσμα η συντήρηση και η πρόσδεση να καθίστανται περίπλοκες διαδικασίες [10].

#### **Πρόσδεση της διάταξης:**

Για την κατασκευή αυτή είναι σημαντικό οι πλωτήρες να παραμένουν παράλληλοι μεταξύ τους, έτσι οι γραμμές πρόσδεσης πρέπει να εκτείνονται ομοιογενώς κατά μήκος όλης της πλωτής διάταξης [40]. Η έρευνα των Ikhennicheu κ.ά. [40] τονίζει πως οι γραμμές πρόσδεσης επιλέγονται λεπτές σε διάμετρο, λόγω του περιορισμού στην αντοχή των οδηγών (fairleads). Για μείωση του βάρους και κόστους του συστήματος πρόσδεσης προτείνεται ατσάλινο σύρμα (steel wire) ως υλικό των γραμμών πρόσδεσης. Η παρουσία της αλυσίδας είναι απαραίτητη στο πάνω μέρος για την ευχέρεια προσαρμογής του μήκους της γραμμής πρόσδεσης και στο κάτω μέρος (το οποίο έρχεται σε επαφή με τον βυθό) για την εξασφάλιση τριβής και συγκράτησης με το έδαφος. Οι προκλήσεις για τον σχεδιασμό του συστήματος πρόσδεσης διαφέρουν ανάλογα με το εκάστοτε περιβάλλον και τον αριθμό των σειρών των Φ/Β.



Εικόνα 2.20 Διάταξη πλωτών Φ/Β της Ciel&Terre [10]

## 2.5. Συστήματα πρόσδεσης και αγκύρωσης

### 2.5.1. Γενικά

Η πρόσδεση μιας μονάδας FPV εξαρτάται άμεσα από το εάν η εγκατάσταση είναι σταθερή ή με παρακολούθηση του ήλιου και σημαντικό ρόλο παίζει η μορφολογία της τοποθεσίας. Ο σχεδιασμός του συστήματος πρόσδεσης και αγκύρωσης προϋποθέτει γνώση του μέσου βάθους τους υδάτινου σώματος, τα φορτία λόγω του περιβάλλοντος, το μέγεθος της διάταξης [42], την αλλαγή στάθμης νερού, τη δομή του πυθμένα και των άκρων της υδάτινης λεκάνης [10]. Η πλωτή κατασκευή μεταφέρει φορτία στο σύστημα πρόσδεσης, το οποίο με τη σειρά του ασκεί τα φορτία στο έδαφος. Γι αυτό τον λόγο, η επιλογή και ο σχεδιασμός του συστήματος πρόσδεσης συνδέεται στενά με το σχεδιασμό της πλωτής δομής [42].

Στη δομή του πλωτού συστήματος επιτρέπεται ένα εύρος κινήσεων ελευθερίας ώστε η εγκατάσταση να μην παρουσιάζει απειλές για ζημιά στην ίδια την κατασκευή ή σε άλλες εγκαταστάσεις στο νερό. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό μιας μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι τα συστήματα πρόσδεσης και αγκύρωσης πρέπει να εμποδίζουν την πρόκληση ζημιάς στην ηλεκτρική σύνδεση της εγκατάστασης και να επιδιώκουν τη διατήρηση της σταθερότητας της δομής σε περιπτώσεις αυξομειώσης της στάθμης του νερού. Σε περιπτώσεις ειδικά όταν η εγκατάσταση βρίσκεται μέσα σε μια δεξαμενή με σημαντικές αλλαγές στον όγκο του νερού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, αυτό πιθανώς να οδηγήσει σε μεγάλη κατακόρυφη μετατόπιση της [42].

#### Σημαντική παρατήρηση:

Το μέγεθος της πλωτής διάταξης και κατ' επέκτασιν η ονομαστική ισχύς του συστήματος διαστασιοποιείται βάσει της βέλτιστης ικανοποίησης των κριτηρίων για την αντοχή του συστήματος πρόσδεσης και αγκύρωσης, του πλήθους των διαθέσιμων οδηγών και των καιρικών συνθηκών. Βάσει του μέγιστου ολικού φορτίου σε κάθε πλευρά της πλωτής κατασκευής, καθορίζεται ο αριθμός και το μήκος των γραμμών πρόσδεσης (μήκος γραμμών και αλυσίδας), που εν συνεχεία χρησιμοποιείται για εκτίμηση τους κόστους του έργου και του τελικού σχεδιασμού του συστήματος πρόσδεσης [40].

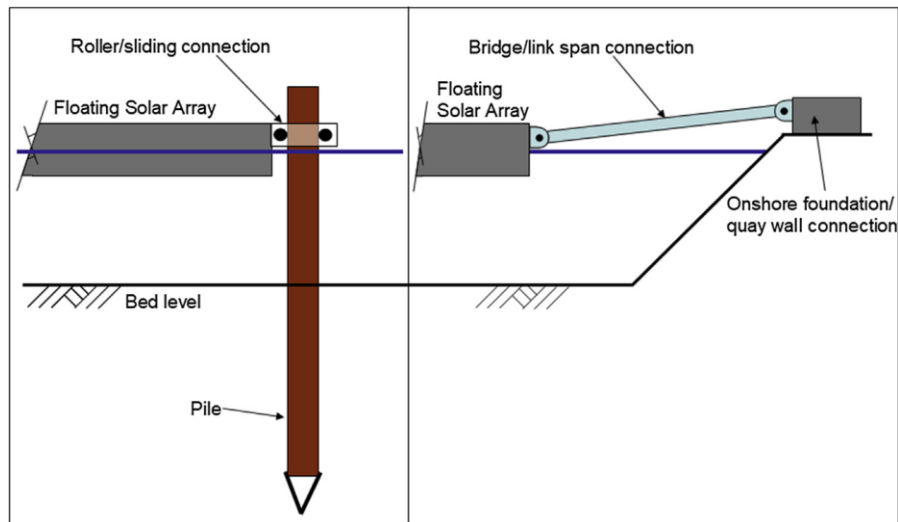
### 2.5.2. Άκαμπτα συστήματα πρόσδεσης

Τα άκαμπτα συστήματα πρόσδεσης επιτρέπουν την κίνηση της πλωτής εγκατάστασης κατά τον κάθετο άξονα, έτσι ώστε να περιορίζονται οι κινήσεις σε ταλάντωση λόγω κυματισμών από τη μεταβολή της στάθμης του νερού. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων πρόσδεσης παρουσιάζει η Εικόνα 2.21. Ο σχεδιασμός τους συμπεριλαμβάνει την περιστροφή ενός ή περισσότερων συνδετικών βραχιόνων γύρω από μια σταθερή βάση στη στεριά ή τη μετατόπιση καθ' ύψος μιας κατακόρυφης στήλης-πασσάλου. Συμπληρωματικά, σε περιπτώσεις όπου η διακύμανση της στάθμης του νερού είναι σχετικά μικρή, είναι δυνατή η εφαρμογή άκαμπτου και σταθερού συστήματος αγκύρωσης στην ακτή το οποίο μπορεί ταυτόχρονα να λειτουργήσει για



παροχή πρόσβασης στη μονάδα για λειτουργίες συντήρησης. Μια άκαμπτη πρόσδεση σε ένα σημείο μέσα στο σώμα του νερού μπορεί να επιτευχθεί με την εγκατάσταση ενός ή περισσότερων πασσάλων[42].

Η Εικόνα 2.22 παρουσιάζει μια εφαρμογή FPV η οποία συγκρατείται κεντρικά από έναν ενιαίο πάσσαλο ο οποίος αγκυρώνεται σε ένα μεγάλο μπλοκ σκυροδέματος στον πυθμένα, βάθους 4 m. Η ισχύς της εγκατάστασης είναι 200 kWp και είναι εξοπλισμένη με σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.



Εικόνα 2.21 Άκαμπτα συστήματα πρόσδεσης [42]

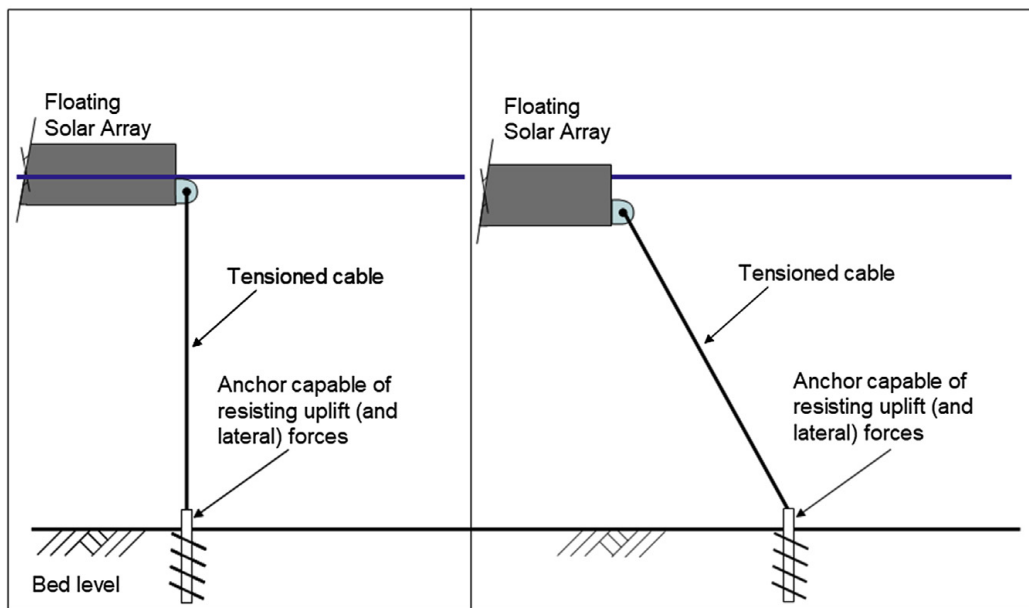


Εικόνα 2.22 Εφαρμογή συστήματος πρόσδεσης μονού πασσάλου [42]

### **2.5.3. Τεταμένα συστήματα πρόσδεσης**

Ένα τεταμένο σύστημα πρόσδεσης αποτελείται από πλήθος καλωδίων που διατηρούνται σε τάση χρησιμοποιώντας την περίσσεια της άνωσης των πλωτών σωμάτων (βλ. Εικόνα 2.23). Τα καλώδια συνδέονται με το έδαφος χρησιμοποιώντας πασσάλους ή βαρίδια. Στο αριστερό μισό στην Εικόνα 2.23 παρουσιάζονται καλώδια σε τεντωμένες βάσεις τα οποία είναι συνήθως ευθυγραμμισμένα κατακόρυφα, έτσι ώστε να

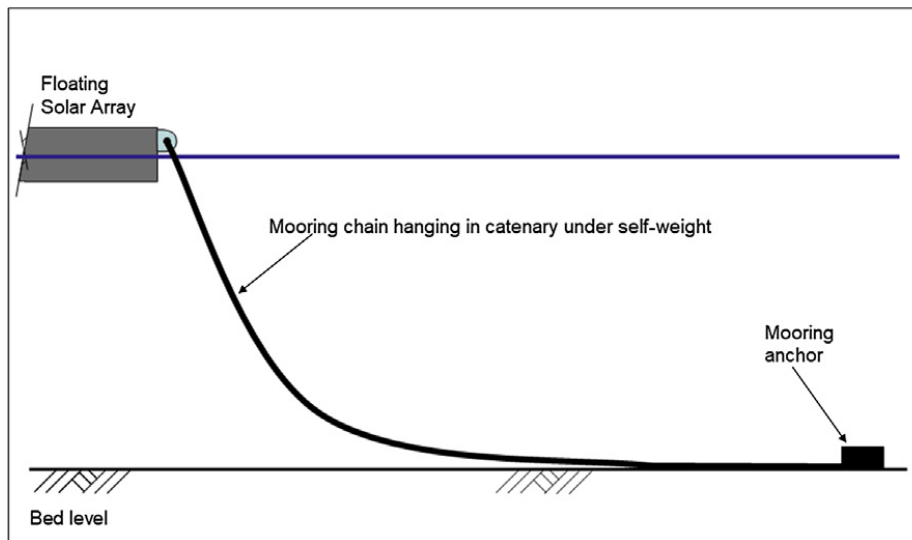
επιτρέπουν κάποια ελευθερία στο πλωτό σύστημα για κίνηση κατά το οριζόντιο επίπεδο. Η κίνησή τους όμως κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση είναι περιορισμένη. Στα εξής συστήματα η πλωτή επιφάνεια επιλέγεται να είναι σχετικά μικρή, με στόχο να αποφευχθούν οι υπερβολικές διακυμάνσεις στην τάση του καλωδίου λόγω αλλαγής στο βάθος -κατακόρυφο ύψος- της επιφάνειας (λόγω κυμάτων ή παλίρροιας). Γενικότερα, ένα τεταμένο σύστημα πρόσδεσης είναι κατάλληλο μόνο για περιπτώσεις μικρής κατακόρυφης διακύμανσης της στάθμης του νερού. Η εξής τεχνολογία μπορεί να εφαρμοστεί και σε βαθιά νερά λόγω του χαμηλού κόστους του καλωδίου. Αν και χρησιμοποιούνται συνήθως κάθετα καλώδια, άλλες κλίσεις τους είναι επίσης δυνατές, οι οποίες επιτρέπουν τη διαφοροποίηση του περιορισμού των κινήσεων μεταξύ των κάθετων και οριζόντιων κατευθύνσεων. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και σε σχετικά μικρά υδάτινα σώματα ώστε οι οριζόντιες τεταμένες γραμμές πρόσδεσης να περιορίζουν την κίνηση στο οριζόντιο επίπεδο και ταυτοχρόνως να επιτρέπουν μεγάλες αποστάσεις κίνησης στην κατακόρυφη κατεύθυνση [42].



Εικόνα 2.23 Τεταμένο σύστημα πρόσδεσης [42]

#### 2.5.4. Μη τεταμένα/αλυσοειδή συστήματα πρόσδεσης

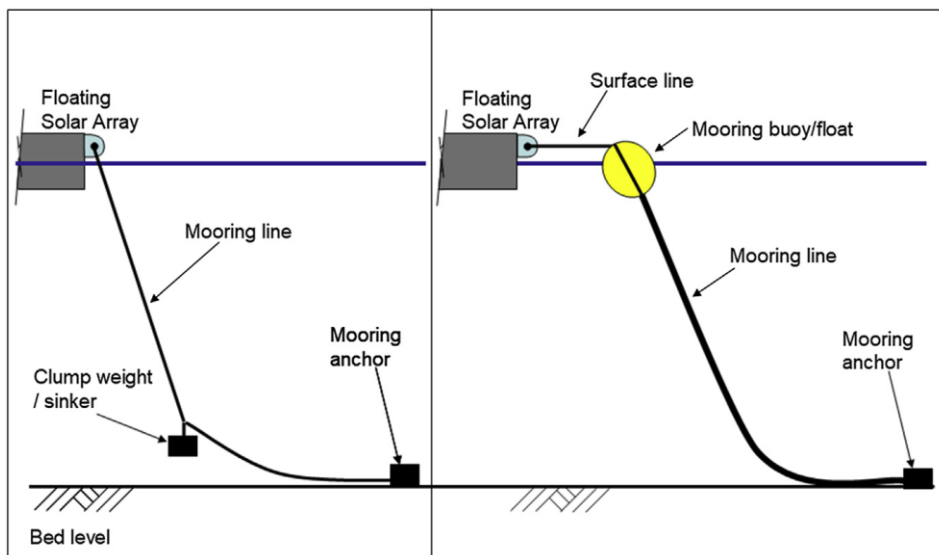
Ένα σύστημα αλυσοειδούς πρόσδεσης χρησιμοποιεί το βάρος της ίδιας της γραμμής πρόσδεσης για να επιτρέψει μια μεταβλητή κατακόρυφη και οριζόντια κίνηση στον αγκυροβολημένο πλωτήρα (βλ. Εικόνα 2.24). Συνήθως, οι γραμμές πρόσδεσης είναι αλυσίδες, με το μέγεθος των κρίκων να καθορίζει το ίδιο βάρος. Η ακαμψία της πρόσδεσης αυξάνεται καθώς ο πλωτήρας απομακρύνεται από το σημείο αγκύρωσης και λόγω του ότι η πρόσδεση φορτίζει τον πλωτήρα με οριζόντια φορτία, οι γραμμές πρόσδεσης εκτείνονται σε τουλάχιστον τρεις διαφορετικές και αντίθετες κατευθύνσεις. Οι γραμμές πρόσδεσης τοποθετούνται κατά μήκος του πυθμένα σε μια απόσταση, προτού συνδεθούν με την άγκυρα και ως αποτέλεσμα, το φορτίο πρόσδεσης το οποίο μεταφέρεται και ασκείται στην άγκυρα είναι οριζόντιο. Τα ασκούμενα φορτία της αγκύρωσης αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κριτήριο επιλογής των αγκυρών για χρήση σε αυτούς τους τύπους συστημάτων πρόσδεσης. Το απαιτούμενο μήκος μιας γραμμής πρόσδεσης εξαρτάται από το βάθος του νερού και το απαιτούμενο εύρος κίνησης του πλωτού συστήματος. Η γρήγορη αύξηση της ακαμψίας πρόσδεσης (όταν δηλαδή η γραμμή πρόσδεσης γίνεται σχεδόν ευθεία) αποτελεί σημαντικό στοιχείο του σχεδιασμού αυτών των συστημάτων πρόσδεσης, διότι μπορεί να οδηγήσει σε απότομα μεγάλα φορτία (snatch loads). Τέλος, οι εφαρμογές σε υδάτινα σώματα με σημαντικές διακυμάνσεις στο βάθος απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό των αλυσοειδών συστημάτων πρόσδεσης, μιας και τα χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων αλλάζουν αναλόγως της στάθμης του νερού [42].



Εικόνα 2.24 Αλυσοειδές σύστημα πρόσδεσης [42]

### 2.5.5. Συμβατά συστήματα πρόσδεσης

Ένα συμβατό σύστημα πρόσδεσης αποτελείται από έναν ή περισσότερους πλωτήρες ή/και βάρη συνδεδεμένα με το αγκυροβολημένο καλώδιο/σχοινί μεταξύ της μονάδας FPV και του εδάφους (βλ. Εικόνα 2.25). Τα εξής συστήματα είναι παρόμοια με τα συστήματα αλυσοειδών, με τη διαφορά όμως πως απαιτούν μικρότερη επιφάνεια και προκαλούν λιγότερη διατάραξη στον πυθμένα του υδάτινου σώματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γραμμές πρόσδεσης δεν ανυψώνονται ούτε κινούνται συνεχώς πάνω στην επιφάνεια του πυθμένα, το οποίο είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου η διασφάλιση της ποιότητας του νερού είναι σημαντική [42].

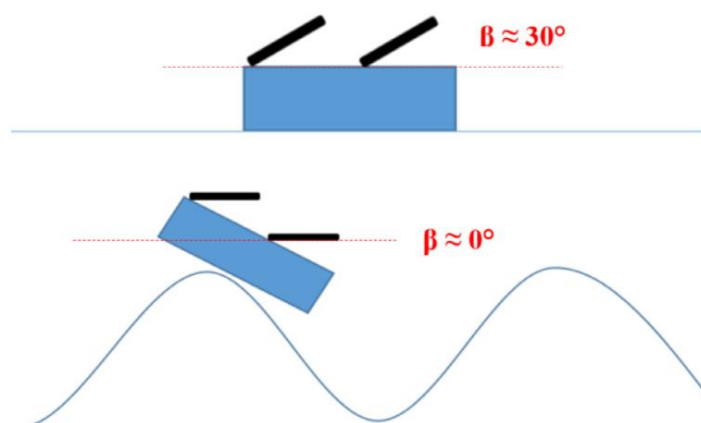


Εικόνα 2.25 Συμβατό σύστημα πρόσδεσης [42]

## 2.1. Επίδραση των καιρικών συνθηκών

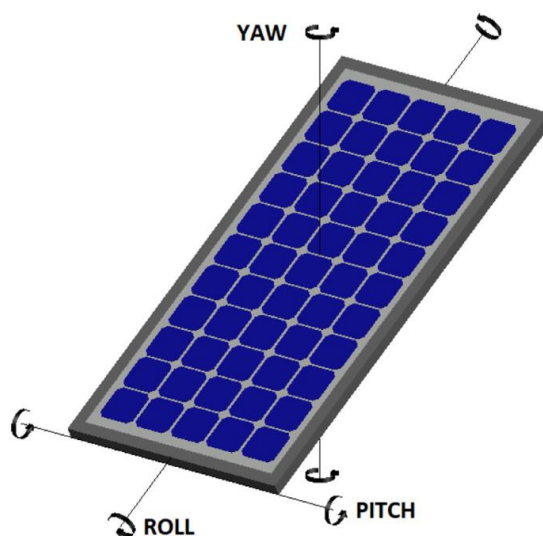
### 2.1.1. Κύματα

Στην δημοσίευση των Bugeja κ.ά. [14], εξετάζεται η μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της μεταβαλλόμενης κίνησης των φωτοβολταϊκών πάνελ, υπό την επήρεια των κυμάτων στην ανοικτή θάλασσα. Χρησιμοποιώντας μια πειραματική διάταξη, οι μελετητές προσομοίωσαν τρεις διαφορετικές κινήσεις βαθμών ελευθερίας ενός φωτοβολταϊκού πάνελ ανάλογα κυματισμό της θάλασσας και συνέκριναν με πραγματικά δεδομένα. Εν τέλει, οι διαφορές στην προσπίπτουσα ηλιοφάνεια ήταν εμφανείς. Η επιρροή των κυματικών κινήσεων στην πλατφόρμα και στα Φ/Β πλαίσια παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.26, όπου η κλίση γωνίας  $\beta$  των πλαισίων μεταβάλλεται σημαντικά.



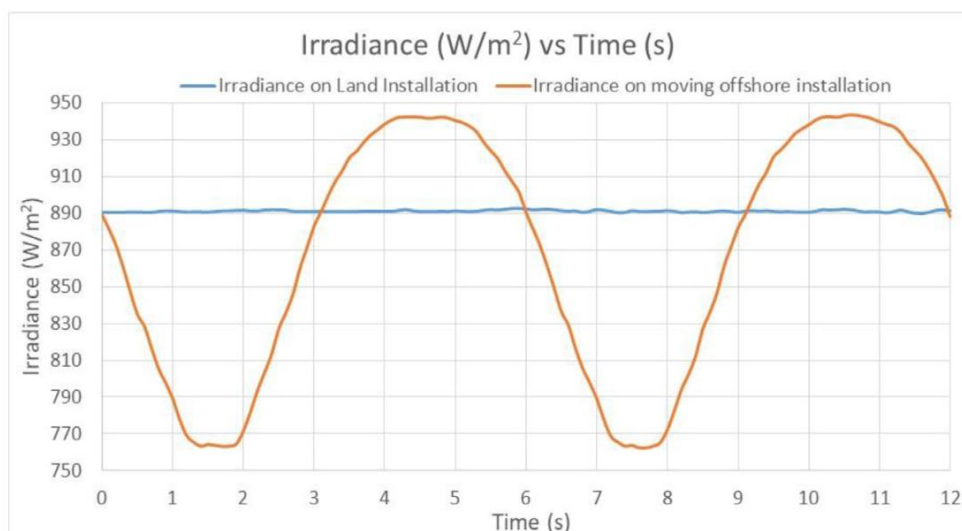
Εικόνα 2.26 Μεταβολή της γωνίας κλίσης των πλαισίων Φ/Β λόγω των κυμάτων [14]

Η πιθανή κίνηση των Φ/Β αναλύεται σε τρεις βαθμούς ελευθερίας, στροφές δηλαδή γύρω από τρεις άξονες (βλ. Εικόνα 2.27). Οι τρεις αυτές κινήσεις περί των αξόνων, μεταφράζονται εν τέλει σε μεταβολή της γωνίας κλίσης και γωνίας αζιμούθιου του πλαισίου.



Εικόνα 2.27 Κινήσεις Pitch, Yaw και Roll σε ένα Φ/Β πλαίσιο [14]

Η πειραματική διάταξη της εξής μελέτης αποτελείται από δύο, ελαφριές σε βάρος, βάσεις πολυμεθακρυλικού μεθυλεστέρα όπου τοποθετήθηκαν πυρανόμετρα (τύπου Matrix Solar Sol-A-Meter MK 1-G) για τη συλλογή δεδομένων για την ηλιακή ακτινοβολία (πρόκειται για πυρανόμετρα πυριτίου με φασματική απόκριση από 0.35 έως 1.15μm με ευαισθησία κορυφής στα 0.85μm και ακρίβεια τάξεως  $\pm 5\%$ ). Οι βάσεις αυτές περιστρέφονται σε δύο άξονες με τη βοήθεια σερβοκινητήρων υψηλής ροπής, βήματος κίνησης  $1^\circ$ , και μικροελεγκτή. Η πλατφόρμα κινείται με ημιτονοειδή συνάρτηση πλάτους  $20^\circ$ . Στο Διάγραμμα 2.6 παρουσιάζεται ένα δείγμα των δεδομένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις της ακτινοβολίας, όσον αφορά τη μεταβολή της κλίσης του επιπέδου (κίνηση pitch- γωνία κλίσης  $\beta$ ) με την πάροδο του χρόνου σε σύγκριση με μια σταθερή πλατφόρμα.



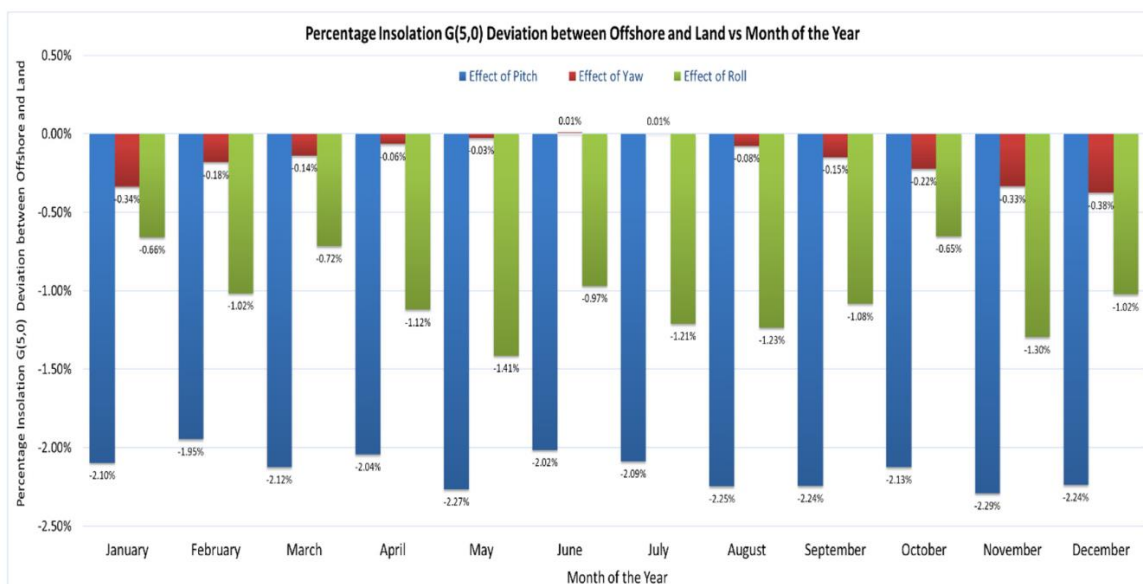
Διάγραμμα 2.6 Πειραματικά δεδομένα της ακτινοβολίας ως αποτέλεσμα των κινήσεων του βήματος [14]

Στην εξής εργασία μελετήθηκαν δύο κλίσεις πλαισίων ίσες με  $30^\circ$  και  $5^\circ$  αντίστοιχα. Η μικρή κλίση των  $5^\circ$  επιλέχθηκε σκοπίμως, μιας και σε πολλές εγκαταστάσεις πλωτών Φ/Β επιλέγονται μικρές κλίσεις των πλαισίων για λόγους μείωσης των δυνάμεων καταπόνησης από τον άνεμο και αύξησης της πυκνότητας εγκατεστημένης ισχύος. Για κάθε κίνηση στους τρεις άξονες λήφθηκαν μετρήσεις για το εύρος γωνιών  $20^\circ, 15^\circ, 10^\circ$  και  $5^\circ$ . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το 2019 με αρχικές κλίσεις πλαισίου ίσες με  $5^\circ$  και  $30^\circ$  και προσανατολισμό ίσο με  $0^\circ$ . Τέλος, η τιμή της ανακλαστικότητας (albedo) λήφθηκε ίδια για τις πλωτές και χερσαίες εγκαταστάσεις.

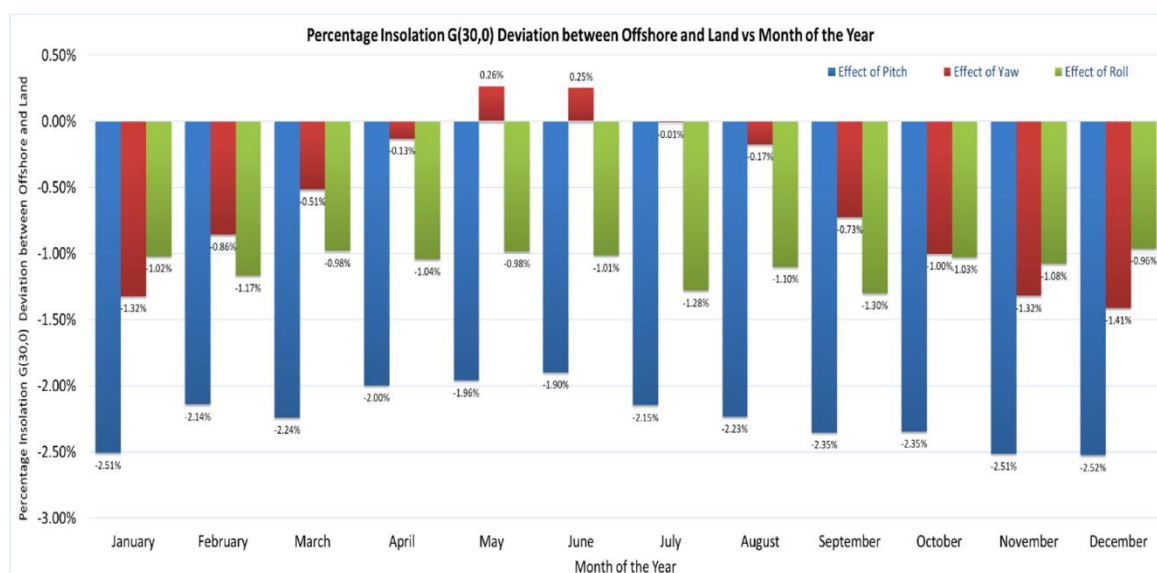
### Αποτελέσματα:

Τα ετήσια αποτελέσματα (Διάγραμμα 2.7 και Διάγραμμα 2.8) δείχνουν μεγαλύτερη μείωση της παραγόμενης ενέργειας από κινήσεις κατά τον οριζόντιο άξονα (Pitch), μιας και αυτές επηρεάζουν άμεσα την κλίση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στα πλαίσια. Η επίδραση στην παραγόμενη ενέργεια των πλαισίων κατά αυτήν την κίνηση, είχε τη μέγιστη αρνητική τιμή κατά τον μήνα Δεκέμβριο ίση με  $-2.52\%$  και την ελάχιστη τον Ιούνιο ίση με  $-1.90\%$ .

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί η μεγαλύτερη αρνητική επιρροή που έχουν οι περιστροφές στον κάθετο άξονα (Yaw) τον Δεκέμβριο σε σχέση με τον Μάιο, με τιμές  $-1.41\%$  και  $0.26\%$  αντίστοιχα, και αυτό οφείλεται στο συνημιτονοειδές προφίλ της κατανομής της ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο. Η κίνηση κατά τον διαγώνιο άξονα (Roll) είχε τη μεγαλύτερη επίδραση στην παραγόμενη ενέργεια κατά τον Μάιο, περίπου  $-1.41\%$  και την ελάχιστη τον Οκτώβριο,  $-0.65\%$ .



Διάγραμμα 2.7 Επί τοις εκατόν μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ πλωτών και χερσαίων Φ/Β κατά τη διάρκεια ενός έτους για κλίση  $\beta=5^\circ$  και  $\alpha=0^\circ$  [14]



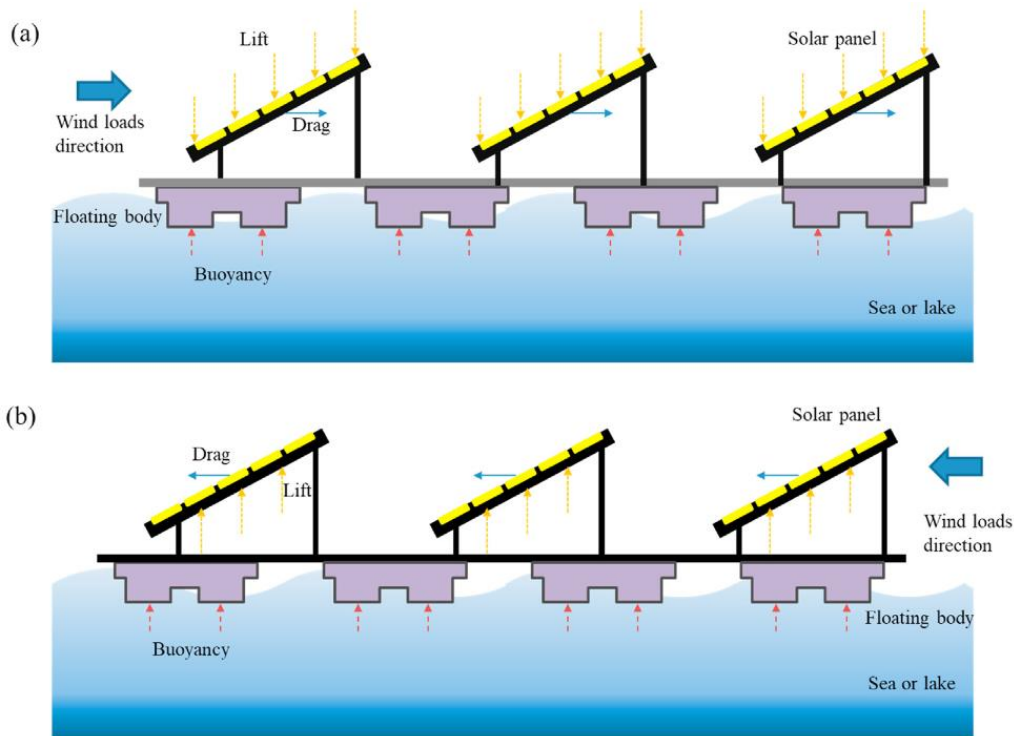
Διάγραμμα 2.8 Επί τοις εκατό μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ πλωτών και χερσαίων Φ/Β κατά τη διάρκεια ενός έτους για κλίση  $\beta=30^\circ$  και  $\alpha=0^\circ$  [14]

## 2.1.2. Άνεμος

Η μελέτη της επίδρασης των φορτίων ανέμου στα φωτοβολταϊκά αποτελεί σύνηθες αντικείμενο έρευνας κυρίως για τα χερσαία πάνελ και αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά σε στέγες ή βουνοπλαγιές.

Η δυνάμεις λόγω του ανέμου στην πλωτή κατασκευή και τα πλαίσια αναλύονται σε δύο συνιστώσες, οριζόντια-αντίσταση (drag) και κατακόρυφη-άνωση/οπισθέλκουσα (lift). Αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.28 όπου απεικονίζεται και η δύναμη άνωσης από το νερό. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι τα φορτία ανέμου σε μια συστοιχία ηλιακών πλαισίων επηρεάζονται σημαντικά από τη διαμήκη απόσταση και όχι από την απόσταση του πλάτους της διάταξης [43]. Σημαντικό ρόλο λοιπόν, έχει η γεωμετρία και η απόσταση των

συστοιχιών των ηλιακών συλλεκτών αφού οι αεροδυναμικοί συντελεστές πίεσης διαφέρουν ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος [44]. Η δύναμη άωσης λόγω νερού στην κατασκευή εξισορροπείται από τα βαρίδια στο σύστημα πρόσδεσης. Όταν η ροή του ανέμου πνέει από το μπροστινό μέρος του συστήματος, η δύναμη άωσης δρα προς τα κάτω στο ηλιακό πάνελ. Η δύναμη λόγω άωσης από το νερό στο πλωτό σώμα πρέπει να υπερνικά τη δύναμη άωσης λόγω ανέμου, για να αποτρέψει τη βύθιση του συστήματος. Αντιθέτως όταν η ροή του ανέμου είναι από το πίσω μέρος του συστήματος, η δύναμη άωσης λόγω ανέμου δρα κατά την προς τα άνω κατεύθυνση του ηλιακού πλαισίου. Ως εκ τούτου, το βάρος των πλωτών σωμάτων πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τη δύναμη άωσης λόγω ανέμου, ώστε να αποτραπεί η ανατροπή ή η ανύψωση του συστήματος. [44].



Εικόνα 2.28 Επίδραση δυνάμεων ανέμου στα πλωτά πλαίσια (a) στην μπροστινή όψη (b) στην οπίσθια όψη [44]

Υπενθυμίζεται πως οι συντελεστές αντίστασης και άωσης ορίζονται από την Εξίσωση 2.1 και Εξίσωση 2.2 αντίστοιχα, όπου  $A_x$  είναι η προβαλλόμενη επιφάνεια στην κατεύθυνση ροής,  $A_z$  η προβαλλόμενη επιφάνεια στην κατακόρυφη διεύθυνση και  $V_{mid}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στο μέσο άνοιγμα του ηλιακού πάνελ. Τέλος, οι συνιστώσες  $F_x$  και  $F_z$  είναι οι δυνάμεις στην κατεύθυνση ροής και στην κατακόρυφη διεύθυνση και υπολογίζονται από τη μέτρηση της πίεσης [44].

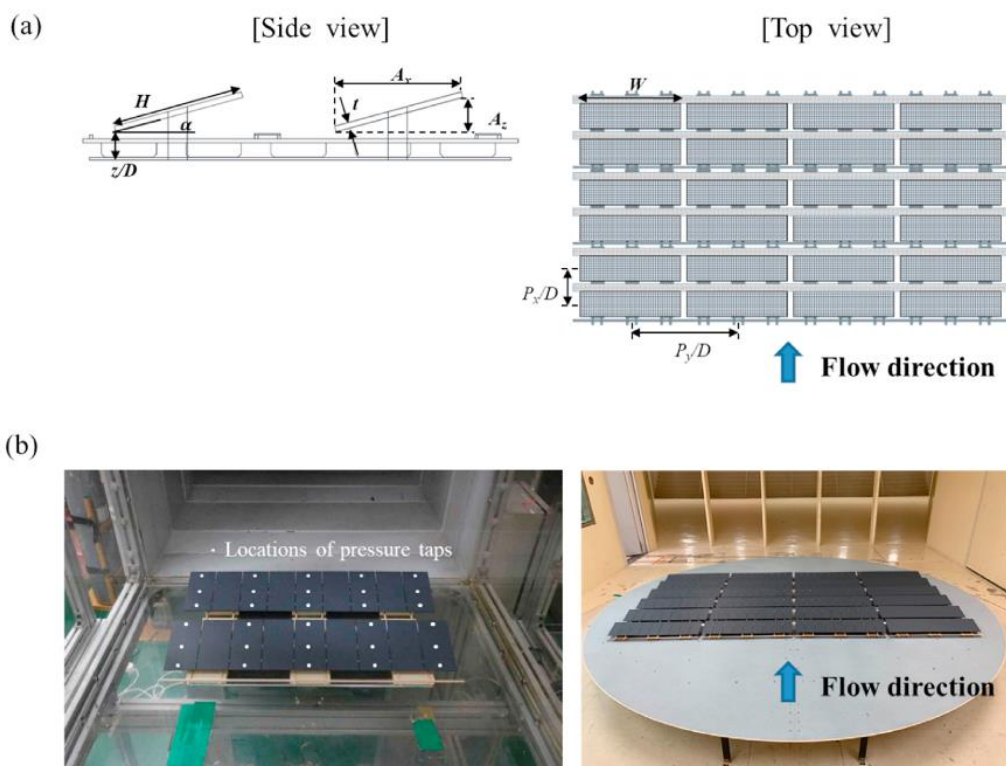
$$C_D = \frac{F_x}{0.5\rho V_{mid}^2 A_x} \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

$$C_L = \frac{F_z}{0.5\rho V_{mid}^2 A_z} \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

### 2.1.2.1. Έρευνα των Choi κ.ά.

Οι ερευνητές Choi κ.ά. [44] μελέτησαν την επίδραση των δυνάμεων λόγω ανέμου σε πλωτή κατασκευή, μέσω προσομοιώσεων ενός μοντέλου υπό κλίμακα εντός μιας αεροδυναμικής σήραγγας (βλ. Εικόνα 2.29). Στη μελέτη εκτελούνται μετρήσεις των τοπικών κατανομών πίεσης στη διάταξη ηλιακών συλλεκτών και διακρίνονται οι περιοχές κατανομής μειωμένης πίεσης. Από τα αποτελέσματα, προτείνεται μια διαμόρφωση του πλωτού Φ/Β συστήματος αλλάζοντας τα υλικά των πλωτών μερών. Καινοτομία της μελέτης αποτελεί η οικονομική ανάλυση του πλωτού Φ/Β συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τα φορτία ανέμου στους συλλέκτες, το οποίο ευνοεί τον οικονομικότερο και ασφαλέστερο σχεδιασμό αυτών των συστημάτων.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε εκτίθηκε σε τυρβώδεις συνθήκες εντός της αεροδυναμικής σήραγγας με κύρια ταχύτητα ροής ίση με 13.4 m/s. Το μοντέλο τοποθετήθηκε πάνω σε ένα περιστρεφόμενο στρογγυλό τραπέζι (βλ. Εικόνα 2.29 (b)) ώστε να προσομοιωθούν διαφορετικές γωνίες προσβολής και κατευθύνσεις του ανέμου. Τέλος, αναφέρεται πως οι κατανομές πίεσης της συστοιχίας ηλιακών πλαισίων μετρήθηκαν σε 10 διαστήματα για τη γωνία εισόδου [44].



Εικόνα 2.29 (α) Σχέδιο πειραματικού μοντέλου (β) Πειραματικό μοντέλο στο τούνελ [44]

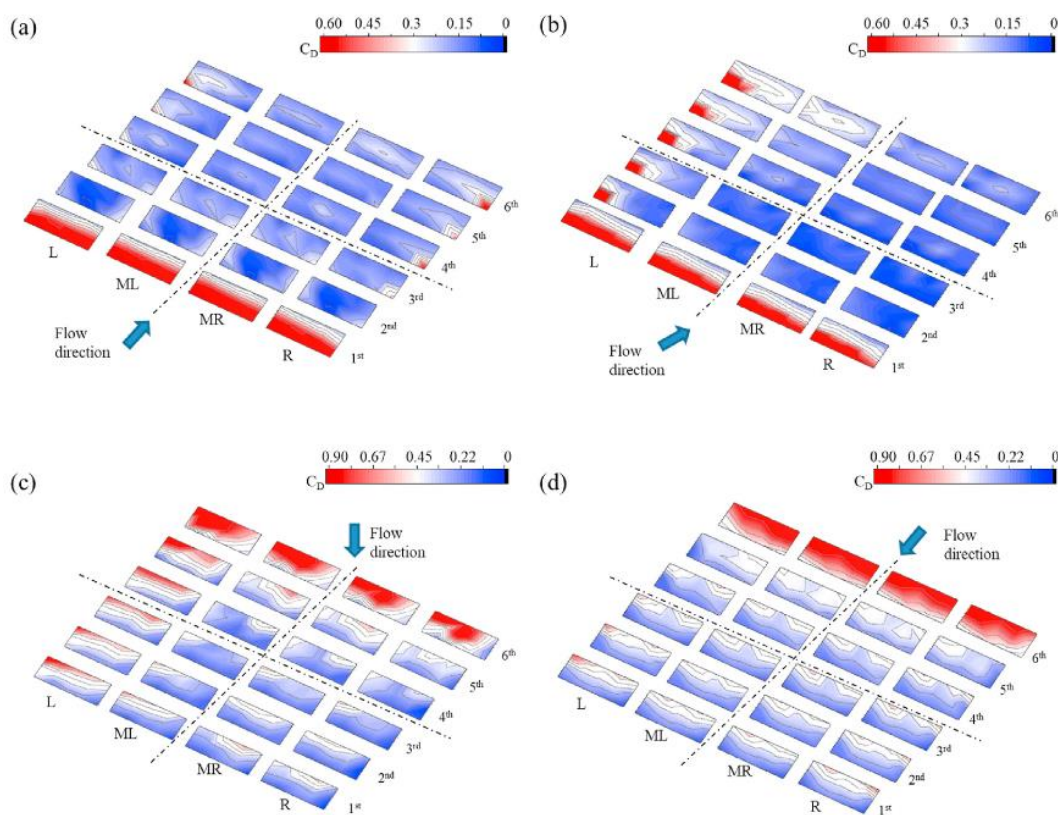
Τα πειραματικά αποτελέσματα των κατανομών των συντελεστών αντίστασης και άνωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.30 και Εικόνα 2.31 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις 2.1 και 2.2, οι συντελεστές αντίστασης και άνωσης είναι ευθέως ανάλογοι με τις συνιστώσες των δυνάμεων λόγω ανέμου. Έτσι, περιοχές με υψηλές τιμές συντελεστών  $C_D$  και  $C_L$  αντικατοπτρίζουν ουσιαστικά περιοχές οι οποίες λαμβάνουν μεγάλα φορτία λόγω ανέμου.

#### **Παρατηρήσεις:**

Όταν ο άνεμος πνέει στο μπροστινό μέρος της εγκατάστασης (Εικόνα 2.30 (a) και (b)), η πρώτη σειρά ηλιακών συλλεκτών εμφανίζει τον υψηλότερο συντελεστή αντίστασης, ενώ η δεύτερη σειρά τον χαμηλότερο. Ως εκ τούτου, η πρώτη σειρά παρέχει προστασία στις σειρές με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή αντίστασης

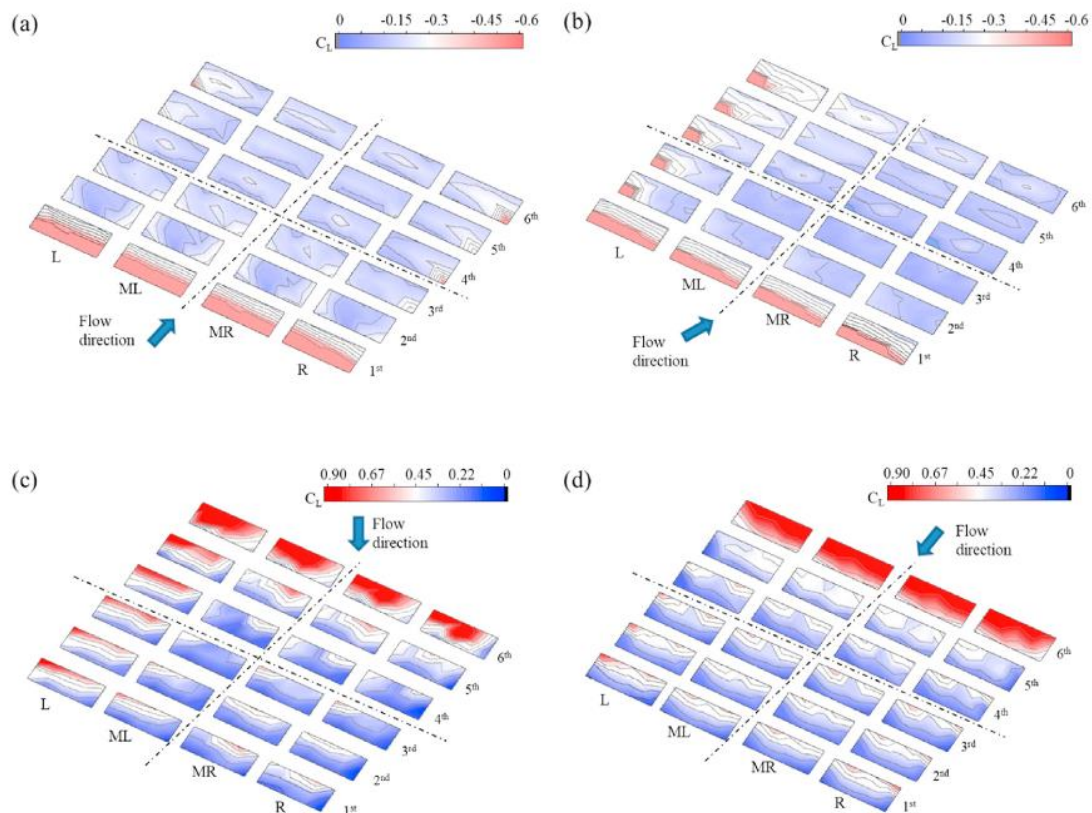


μέχρι την τελευταία σειρά όπου παρουσιάζεται αύξηση. Στην Εικόνα 2.30 (a) ο συντελεστής αντίστασης αυξάνεται στις γωνίες της συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών και στην (b) η αριστερή στήλη (L) παρουσιάζει υψηλότερες τιμές αφού παρέχει προστασία στις υπόλοιπες στήλες. Ο συντελεστής αντίστασης ήταν υψηλότερος στο κάτω μέρος των πλαισίων από ό,τι σε άλλες περιοχές, λόγω της πρόσκρουσης του ανέμου πρώτα στις κάτω περιοχές της συστοιχίας. Ωστόσο, όταν η είσοδος ανέμου γίνεται από το πίσω μέρος των ηλιακών συλλεκτών (βλ. Εικόνα 2.30 (c) και (d)), η τελευταία σειρά χαρακτηρίζεται από τους υψηλότερους συντελεστές αντίστασης και έχει προστατευτική δράση στις άλλες σειρές. Στην περίπτωση της γωνίας 150° (περίπτωση (c)) η στήλη L των συλλεκτών παρουσιάζει υψηλότερο συντελεστή  $C_D$  από τις υπόλοιπες στήλες, λόγω της αρχικής πρόσκρουσης του ανέμου στην κορυφή της συστοιχίας με αποτέλεσμα η στήλη να δρα ως προστατευτικός φραγμός για τις μετέπειτα στήλες. Στην περίπτωση (d) όπου ο άνεμος πνέει πίσω από τη διάταξη, η πίσω σειρά έχει έντονα αυξημένο συντελεστή αντίστασης και συγκεκριμένα η κορυφή του πλαισίου έχει υψηλότερη τιμή συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές. Σε αυτή την περίπτωση επίσης, ο μέγιστος συντελεστής οπισθέλκουσας είναι 0.9 δηλαδή υψηλότερος από την περίπτωση (a).



Εικόνα 2.30 Κατανομές τοπικών συντελεστών αντίστασης σε διάφορες γωνίες εισόδου: (a) 0°, (b) 30°, (c) 150° και (d) 180° [44]

Η Εικόνα 2.31 παρουσιάζει τις τοπικές κατανομές του συντελεστή άνωσης  $C_L$  των ηλιακών συλλεκτών σε διάφορες γωνίες εισόδου της ροής ανέμου. Οι αρνητικές τιμές του συντελεστή στις περιπτώσεις 0° και 30° δείχνουν την προς τα κάτω κατεύθυνση. Παρομοίως με τις κατανομές του συντελεστή  $C_D$ , η πρώτη σειρά της διάταξης ηλιακών πάνελ χαρακτηρίζεται από τους υψηλότερους συντελεστές άνωσης όταν η ροή του ανέμου έχει κατεύθυνση 0° και 30°, λόγω της προστασίας στις υπόλοιπες σειρές όπου εμφανίζονται χαμηλότεροι συντελεστές άνωσης. Και πάλι στην περίπτωση των 30° η στήλη L παρουσιάζει τους υψηλότερους συντελεστές άνωσης σε σχέση με τις υπόλοιπες στήλες. Όταν η κατεύθυνση ροής του ανέμου πνέει από το πίσω μέρος της συστοιχίας (περιπτώσεις (c) και (d)) η έκτη σειρά έχει τους υψηλότερους συντελεστές άνωσης. Γενικά, η κορυφή του ηλιακού πάνελ, εξαιτίας της αρχικής πρόσκρουσης του ανέμου, έχει υψηλότερο συντελεστή άνωσης από τις άλλες περιοχές του συλλέκτη.



Εικόνα 2.31 Κατανομές τοπικών συντελεστών άνωσης σε διάφορες γωνίες εισόδου: (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $150^\circ$  και (d)  $180^\circ$  [44]

### 2.1.2.2. Έρευνα των Ikhenlicheu κ.ά.

Στην έρευνα αυτή, μελετώνται τρεις περιπτώσεις FPV σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Η πρώτη αποτελεί μια εγκατάσταση ισχύος 2.5 MWp σε μικρή λίμνη, η δεύτερη 7.5 MWp σε μεγάλη λίμνη και η τρίτη σε ανοικτή θάλασσα ισχύος 2.5 MWp. Οι διαστάσεις των αντίστοιχων εγκαταστάσεων διαφέρουν με τη μεγαλύτερη να είναι αυτή στην μεγάλη λίμνη. Η έρευνα επικεντρώνεται στα φορτία ανέμου και κυμάτων τα οποία αναλύονται μέσω των οπισθελκουσών δυνάμεων και οι προσεγγίσεις των αντίστοιχων συντελεστών γίνονται μέσω ρευστομηχανικής μοντελοποίησης και πειραμάτων εντός αεροδυναμικών σηράγγων. Τα φορτία ανέμου, κυμάτων και ρευμάτων θεωρούνται ομόρροπα και για τον υπολογισμό των φορτίων στην κατασκευή μελετάται το χειρότερο σενάριο σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στη δημοσίευση επίσης γίνεται αναφορά στον διαμερισμό του πλήθους των ηλιακών σε μικρότερα «νησιά», δηλαδή υπομονάδες πλωτών συνδεδεμένες μεταξύ τους. Η διάταξη αυτή προκύπτει όταν η επιφάνεια των πλωτών πάρκων είναι μεγάλη και ως αποτέλεσμα τα φορτία από το περιβάλλον είναι μεγάλα. Τότε αυξάνεται αναγκαστικά και το μήκος των γραμμών πρόσδεσης (mooring lines) με περιοριστικό παράγοντα βέβαια το πλήθος και την αντοχή των οδηγών (fairleads). Σε μια τέτοια περίπτωση το κόστος και το αποτύπωμα του συστήματος πρόσδεσης αυξάνεται και η συνολική χωρητικότητα ισχύος μειώνεται όταν η υδάτινη επιφάνεια είναι περιορισμένη. Έτσι είναι υποχρεωτικός ο συμβιβασμός μεταξύ του αριθμού των οδηγών και του μεγέθους των «νησιών» και αυτό διαφοροποιείται στο εκάστοτε έργο [45].

#### ■ Φορτία λόγω κυμάτων

Τα φορτία λόγω των κυμάτων διαχωρίζονται σε αυτά που προέρχονται από κύματα πρώτης και δεύτερης τάξης. Τα κύματα δεύτερης τάξης οφείλονται στις οριζόντιες κινήσεις της πλατφόρμας (slow drift motions) και η μεθοδολογία υπολογισμού των κυματικών φορτίων στηρίζεται σε υποθέσεις. Αρχικά τα πλωτά πάνελ θεωρούνται μεγάλα σώματα σε βαθιά νερά και αντιμετωπίζονται ως ένα μεγάλο άκαμπτο σώμα (και όχι ως

ξεχωριστές ανεξάρτητες πλατφόρμες). Επίσης γίνεται η θεώρηση μηδενικής ενεργειακής απώλειας λόγω ιξώδους. Τέλος στη δημοσίευση επιλέγεται εμπειρικός συντελεστής ανάκλασης ίσος με 80%.

#### ■ Φορτία λόγω ανέμου

Σημαντική αναφορά στη δημοσίευση γίνεται στην παραλαβή των αιολικών φορτίων από τις σειρές των πλαισίων. Η πρώτη σειρά φωτοβολταϊκών πάνελ είναι αυτή η οποία αντιμετωπίζει τα υψηλότερα φορτία λόγω ανέμου, αφήνοντας χαμηλότερα φορτία στις πίσω σειρές. Έτσι προσαρμόζονται αναλόγως και οι αεροδυναμικοί συντελεστές αντίστασης για τις πρώτες και υπόλοιπες σειρές των πάνελ.

Για όλες τις περιπτώσεις που μελετώνται, τα φορτία του ανέμου είναι υψηλότερα στην πίσω πλευρά των πάνελ λόγω της γεωμετρίας τους, επηρεάζοντας άμεσα και την επιλογή των γραμμών πρόσδεσης που εξαρτώνται από την αντοχή των οδηγών. Ως αποτέλεσμα, οι γραμμές πρόσδεσης είναι περισσότερες στο πίσω μέρος της πλωτής κατασκευής. Τα φορτία λόγω ανέμου είναι τα επικρατέστερα στις περιπτώσεις των κατασκευών στις λίμνες, με ποσοστά ως προς το ολικό φορτίο πέραν των 95% και 65% για τη μικρή και μεγάλη λίμνη αντίστοιχα. Το μερίδιο των φορτίων ανέμου στην ανοικτή θάλασσα είναι χαμηλότερο (περίπου ίσο με 50%) λόγω της έντονης παρουσίας και των κυματικών φορτίων, τα οποία επικρατούν στις μπροστινές και πλάγιες όψεις της κατασκευής. Η εξάρτηση των φορτίων λόγω ανέμου από την εκτιθέμενη επιφάνεια είναι εμφανής και στα φορτία στην μικρή λίμνη σε σύγκριση με αυτά στην κατασκευή της μεγάλης λίμνης. Η επιφάνεια της πρώτης, είναι τρεις φορές μικρότερη και τα φορτία τους διαφέρουν αναλόγως τρεις τάξεις.

#### ■ Ολικό φορτίο στις κατασκευές

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το δυσανάλογο μεγάλο ολικό φορτίο στην κατασκευή της ανοικτής θάλασσας σε σχέση με αυτό της μεγάλης λίμνης. Παρόλο που η θαλάσσια κατασκευή είναι η ίδια (χωρητικά ως προς την ισχύ και το εμβαδόν) με την πρώτη, εν τούτοις δέχεται περισσότερα φορτία και οφείλεται στο γεγονός πως στην ανοικτή θάλασσα αναπτύσσονται έντονες καιρικές συνθήκες. Τα φορτία είναι συνδεδεμένα με το πλάτος και η ισχύς με την επιφάνεια της πλωτής κατασκευής. Έτσι η αναλογία των φορτίων από το περιβάλλον ως προς την ονομαστική ισχύ είναι υψηλότερα στην περίπτωση της ανοικτής θάλασσας παρά σε αυτήν στη μεγάλη λίμνη (2508 kN/kWp και 513 kN/kWp αντίστοιχα). Η διαφορά αυτή, αναμένεται να αντισταθμιστεί μέσω κατασκευών μεγαλύτερων σε εμβαδόν στην ανοικτή θάλασσα.

Ο Πίνακας 2.4 παρουσιάζει τα υπολογιζόμενα φορτία λόγω των καιρικών συνθηκών (φορτία λόγω ανέμου, κυμάτων και ρευμάτων) για κάθε πλευρά της εκάστοτε κατασκευής.

Πίνακας 2.4 Φορτία λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών στις 3 διατάξεις της έρευνας των *Ikhennicheu* κ.ά. [40]

Load cases	Wind loads		Wave loads		Current loads		Total
	Load [kN]	Contribution	Load [kN]	Contribution	Load [kN]	Contribution	Load [kN]
<b>SL – 2.5 MW</b>							
0° Front	371	96%	16	4%	–	0%	387
180° Back	572	97%	16	3%	–	0%	588
90° 270° Side	109	95%	6	5%	–	0%	115
Total Load [kN]							1205
Total Load per kW [kN/kWp]							482
<b>LL – 7.5 MW</b>							
0° Front	927	74%	318	26%	–	0%	1245
180° Back	1413	82%	318	18%	–	0%	1731
90° 270° Side	287	66%	148	34%	–	0%	435
Total Load [kN]							3846
Total Load per kW [kN/kWp]							513
<b>OS – 2.5 MW</b>							
0° Front	834	39%	1095	51%	206	10%	2135
180° Back	1286	50%	1095	42%	206	8%	2587
90° 270° Side	244	32%	412	53%	118	15%	775
Total Load [kN]							6271
Total Load per kW [kN/kWp]							2508

### **2.1.3. Θαλάσσια ρεύματα**

Στην προαναφερθείσα μελέτη των Ikhenicheu κ.ά. εξετάζονται επίσης τα θαλάσσια ρεύματα ως πηγή φορτίων για την πλωτή κατασκευή για την περίπτωση της εγκατάστασης στην ανοικτή θάλασσα. Παρά την μικρή συμμετοχή των φορτίων από τα θαλάσσια ρεύματα στην καταπόνηση της πλωτής κατασκευής στην ανοικτή θάλασσα, με ποσοστό μικρότερο του 15%, εν τούτοις οι ερευνητές υποστηρίζουν πως δεν μπορούν να αμεληθούν [40].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PVsyst

### **3.1. Γενικά**

Το PVsyst 7.3 είναι ένα πακέτο λογισμικού υπολογιστή για μελέτη και ανάλυση δεδομένων ολοκληρωμένων Φ/Β συστημάτων. Χρησιμοποιείται για προσομοίωση Φ/Β συστημάτων πολλών εφαρμογών, δηλαδή συνδεδεμένα στο δίκτυο, αυτόνομα, αντλητικά και συνδεδεμένα σε DC δίκτυο. Περιλαμβάνει εκτενείς βάσεις δεδομένων μετεωρολογικών πληροφοριών και φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς και γενικά εργαλεία ανάλυσης της ηλιακής ενέργειας.

### **3.2. Εργαλεία**

Τα διαθέσιμα εργαλεία που προσφέρονται στο λογισμικό είναι τα εξής:

- **Προμελέτη:**

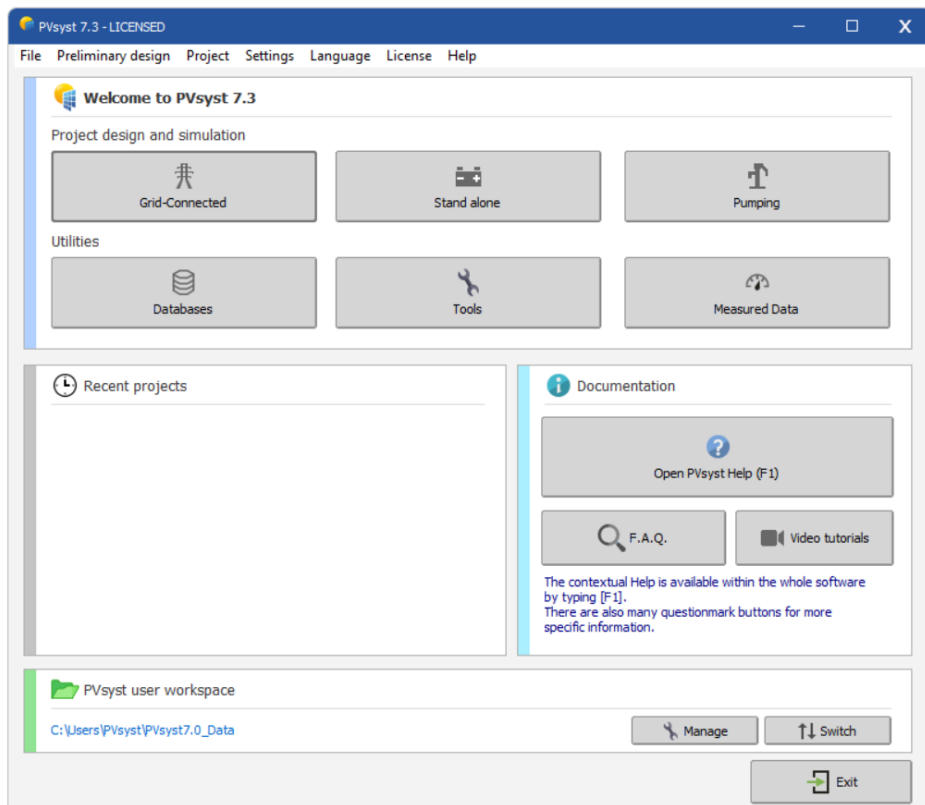
Σε πρώτο στάδιο, προκαθορίζονται ο τρόπος λειτουργίας, οι αξιολογήσεις απόδοσης και πραγματοποιείται μια προσεγγιστική εκτίμηση του κόστους του συστήματος. Για τον τρόπο λειτουργίας, η απόδοση υπολογίζεται σε μηνιαίες τιμές, βάσει γενικών χαρακτηριστικών ή παραμέτρων του συστήματος, χωρίς να προσδιορίζονται τα πραγματικά στοιχεία του. Για συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο απαιτούνται πληροφορίες σχετικά με τη διαθέσιμη περιοχή (προσανατολισμός, επιφάνεια, καιρός), την τεχνολογία των συλλεκτών, την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ και το κόστος της επιθυμητής επένδυσης. Για τα αυτόνομα συστήματα, υπολογίζεται η απαιτούμενη ισχύς των Φ/Β και η χωρητικότητα της μπαταρίας, βάσει του προφίλ του φορτίου και της πιθανότητας μη ικανοποίησης των ενεργειακών αναγκών. Για τα συστήματα άντλησης (pumping systems), βάσει των απαιτήσεων νερού και του βάθους για την άντληση και ορισμένων γενικών τεχνικών επιλογών, το εργαλείο διαστασιολογεί την απαιτούμενη ισχύ της αντλίας και το μέγεθος της συστοιχίας των Φ/Β.

- **Σχεδιασμός και προσομοίωση έργου:**

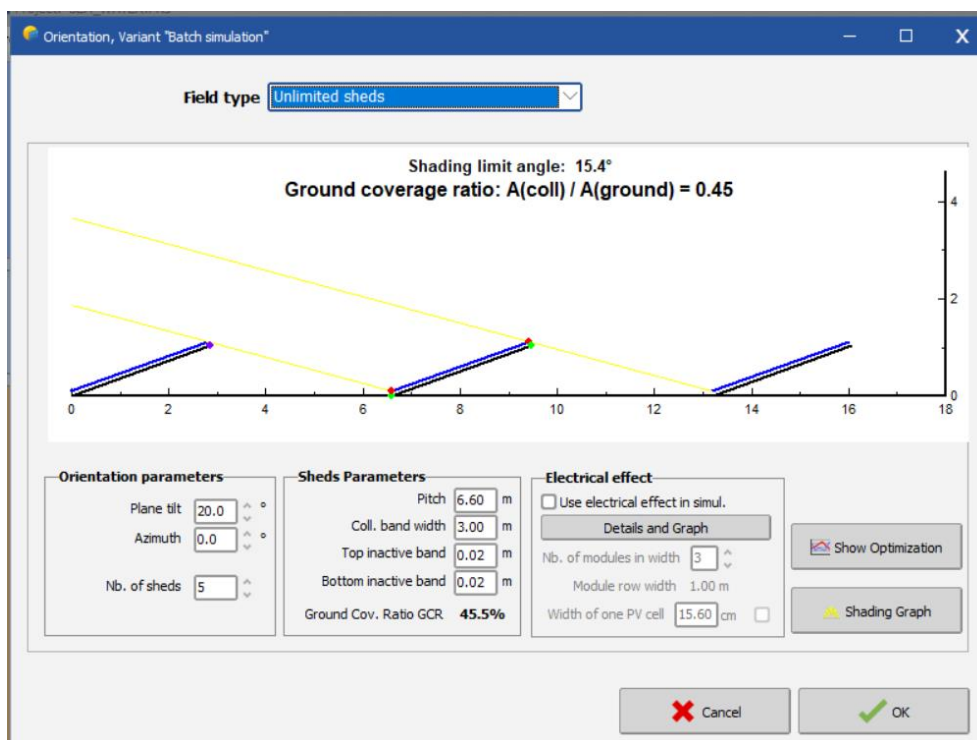
Στο εργαλείο αυτό πραγματοποιείται ο ενδεδειγμένος σχεδιασμός συστήματος με χρήση λεπτομερών ωριαίων προσομοιώσεων. Ο χρήστης δημιουργεί ένα «έργο» (βλ. Εικόνα 3.1) όπου μπορεί να εκτελεστούν και να συγκριθούν διαφορετικές προσομοιώσεις του συστήματος.

Σε πρώτο στάδιο, ορίζεται ο προσανατολισμός των επιπέδων των συλλεκτών (βλ. Εικόνα 3.2) όπου υπάρχουν δυνατότητες για σταθερή κλίση, περιστροφή κατά τους δύο άξονες για παρακολούθηση του ήλιου και μεταβλητή κλίση και καθορισμός βήματος.

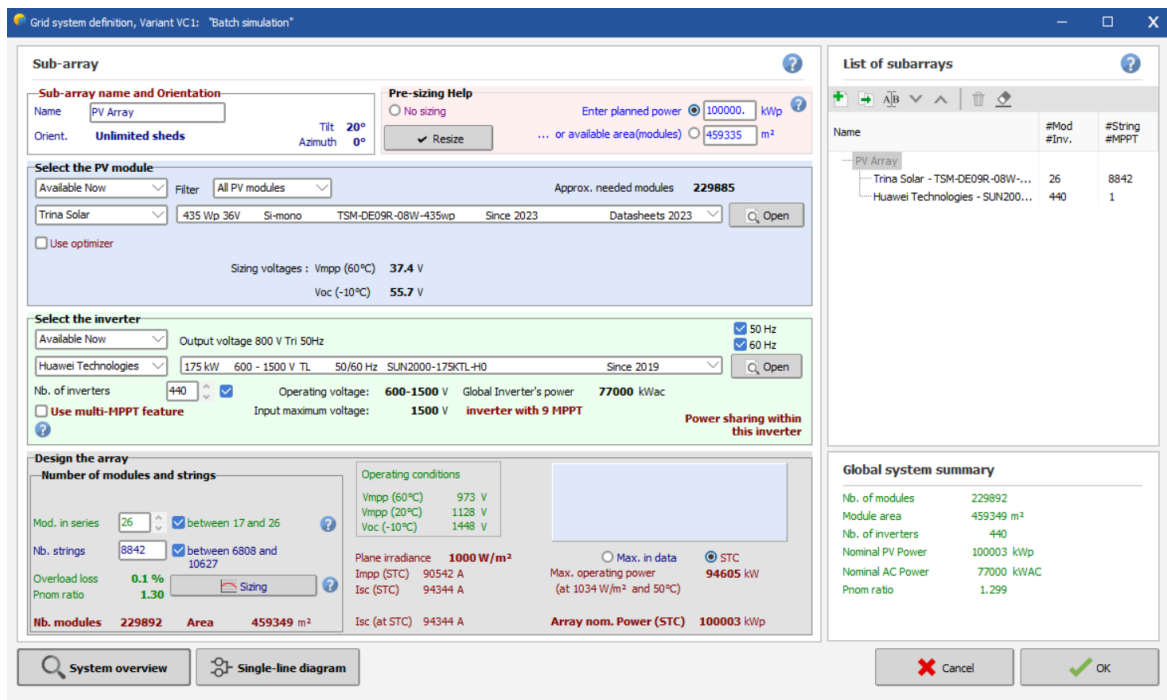
Έπειτα γίνεται η επιλογή και η διαστασιολόγηση του συστήματος με συγκεκριμένα εξαρτήματα όπως τα μοντέλα Φ/Β πλαισίων και αντιστροφών, μπαταριών ή αντλιών (Εικόνα 3.3). Σε αυτό το βήμα η επιλογή γίνεται είτε βάσει της ονομαστικής ισχύς του έργου είτε βάσει της διαθέσιμης επιφάνειας εγκατάστασης. Ο χρήστης ορίζει ένα από τα δύο μεγέθη και έπειτα γίνεται αυτόματα η διαστασιολόγηση του συστήματος. Ελεύθερα προς επιλογή είναι το μοντέλο και ισχύς των Φ/Β συλλεκτών και των αντιστροφών. Έπειτα, αυτομάτως το λογισμικό παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος όπως την επιφάνεια, την ισχύ και τον λόγο Pnom ratio το οποίο καλό είναι να κυμαίνεται από 1.25 έως 1.3.



Εικόνα 3.1 Αρχική σελίδα του λογισμικού

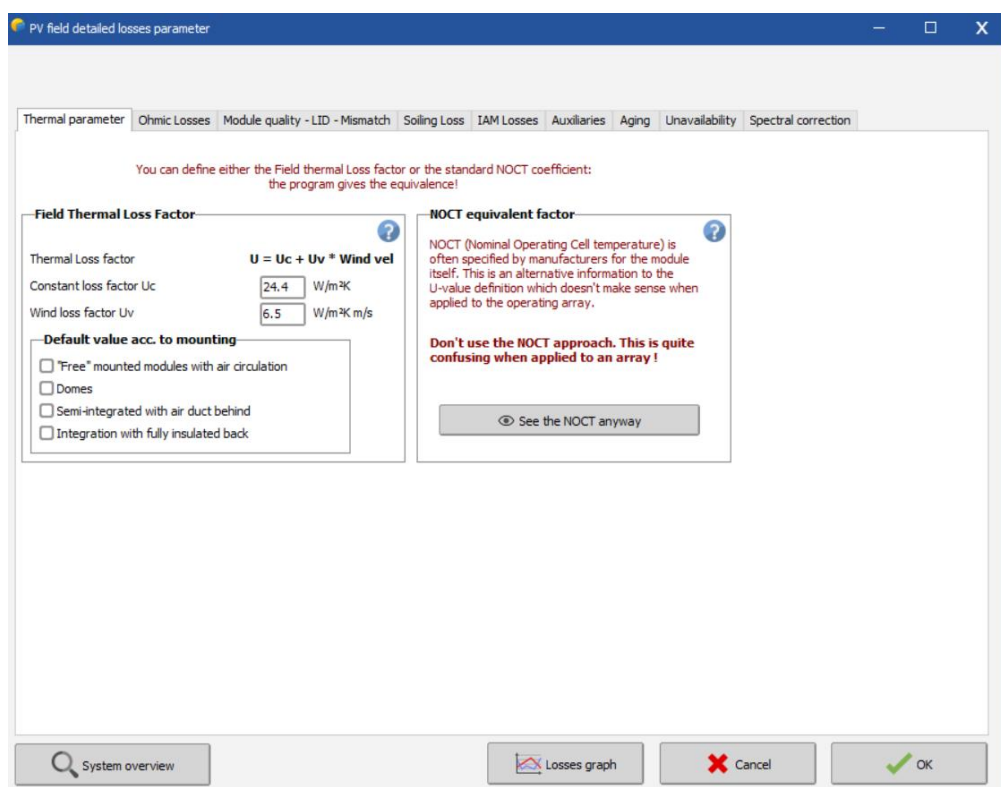


Εικόνα 3.2 Καθορισμός προσανατολισμού της εγκατάστασης του έργου

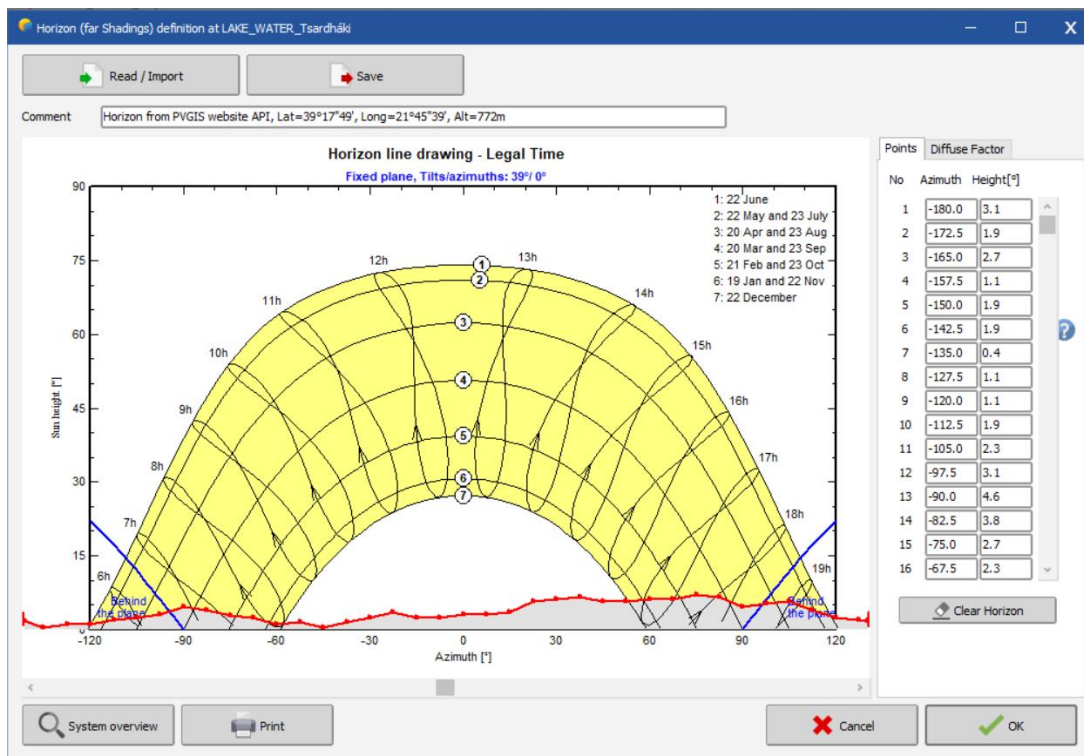


Εικόνα 3.3 Ορισμός του συστήματος

Σε δεύτερο βήμα, ο χρήστης καθορίζει πιο λεπτομερείς παραμέτρους όπως η θερμική συμπεριφορά, η καλωδίωση, η ποιότητα της μονάδας, η αναντιστοιχία και οι απώλειες γωνίας πρόσπτωσης (Εικόνα 3.4), ο ορίζοντας (μακρινή σκίαση) (Εικόνα 3.5) ή μερικές σκιάσεις κοντινών αντικειμένων στη συστοιχία.



Εικόνα 3.4 Καθορισμός απωλειών συστήματος



Εικόνα 3.5 Καθορισμός τροχιάς του ορίζοντα

Τέλος, είναι δυνατή η πραγματοποίηση μιας λεπτομερούς οικονομικής αξιολόγησης του έργου βάσει πραγματικών τιμών εξαρτημάτων και κοστών λειτουργίας, συντήρησης, πρόσθετων κοστών και συνθηκών της επένδυσης.

### 3.3. Βάσεις δεδομένων

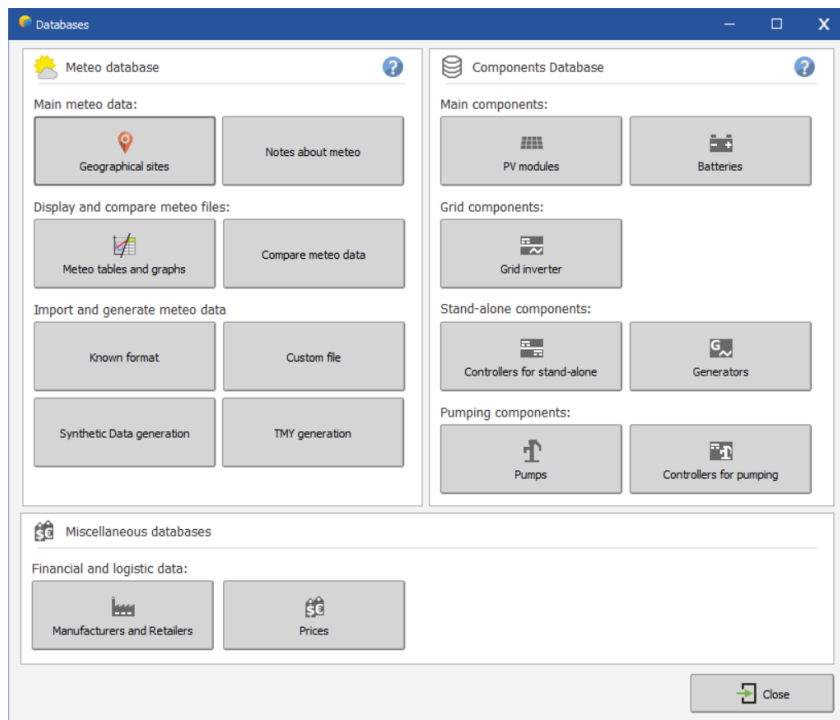
#### 1) Βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων Meteo

Στις βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων του λογισμικού μπορούν να δημιουργηθούν νέες και να διαφοροποιηθούν έτοιμες γεωγραφικές τοποθεσίες (βλ. Εικόνα 3.6). Το λογισμικό διαθέτει βάσεις δεδομένων για τοποθεσίες παγκοσμίως και δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθεί συνθετικό αρχείο ωριαίων δεδομένων, οπτικοποίηση ωριαίων μετεωρολογικών δεδομένων και σύγκριση μετεωρολογικών δεδομένων. Δυνατή είναι επίσης και η εισαγωγή καιρικών δεδομένων από πολλές προκαθορισμένες πηγές ή από προσαρμοσμένα αρχεία του χρήστη.

#### 2) Βάσεις δεδομένων στοιχείων

Στις βάσεις δεδομένων του λογισμικού περιλαμβάνονται αναλυτικά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά μεγέθη και οι προδιαγραφές πολλών κατασκευαστών και φωτοβολταϊκών εξαρτημάτων, συμπεριλαμβανομένων φωτοβολταϊκών μονάδων, μετατροπέων, ρυθμιστών, γεννητριών, αντλιών κ.λπ (Εικόνα 3.6).

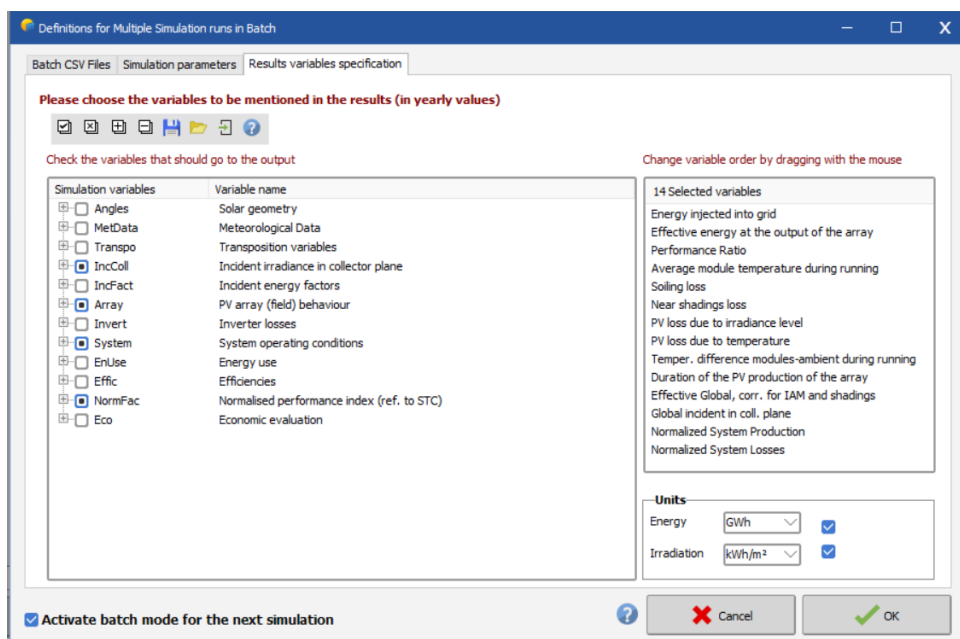




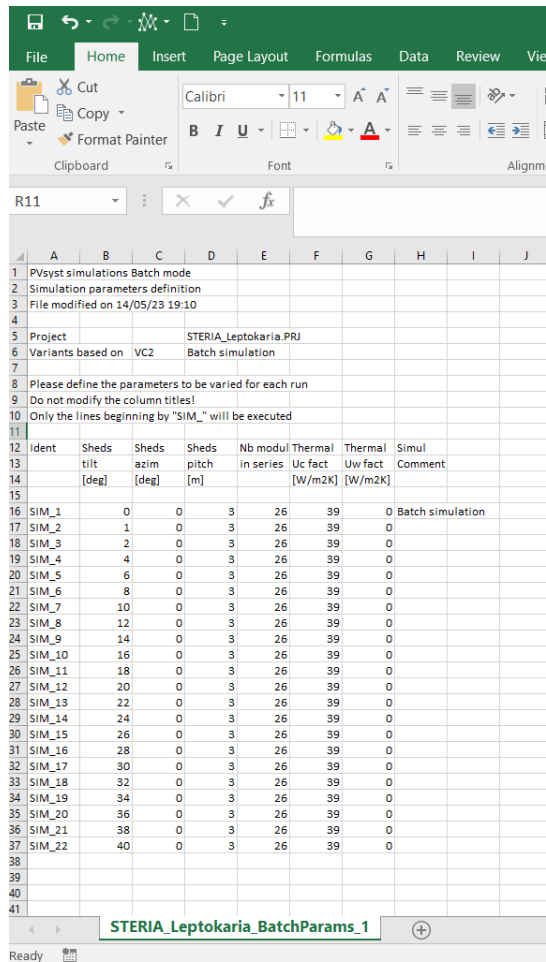
Εικόνα 3.6 Βάσεις δεδομένων του λογισμικού

### 3.4. Batch simulation

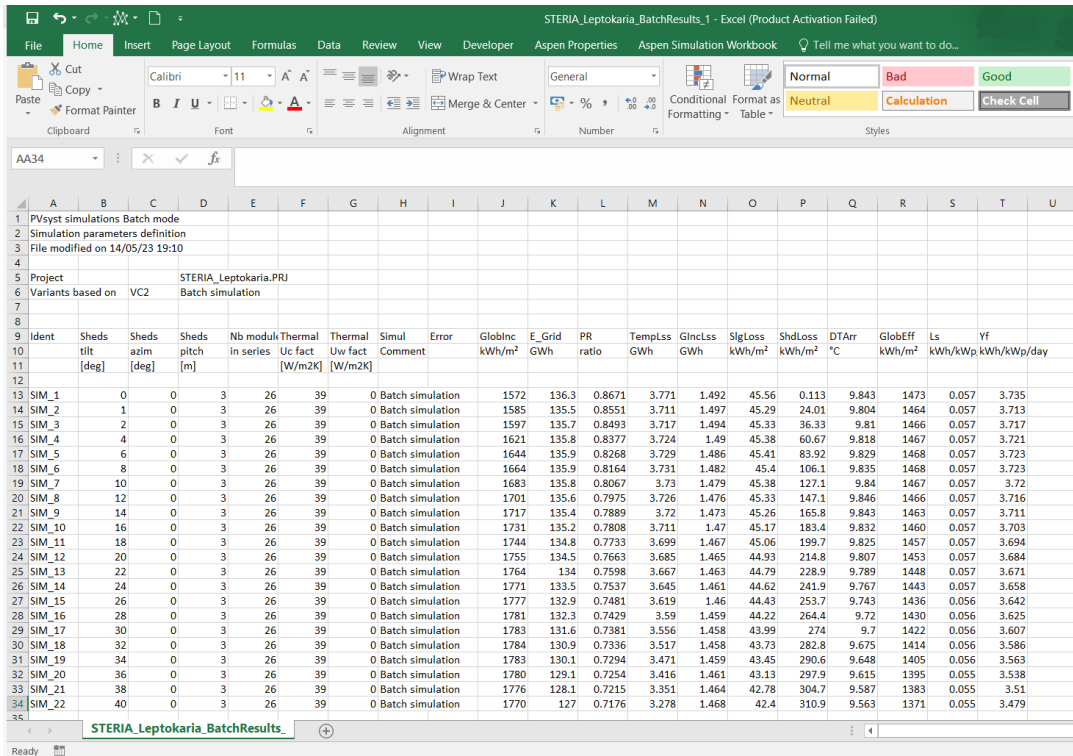
Μια από τις διαθέσιμες λειτουργίες στο λογισμικό είναι το Batch simulation δηλαδή η διαδοχική εκτέλεση πολλών προσομοιώσεων. Ο χρήστης επιλέγει από το λογισμικό και καθορίζει τα μεγέθη εισόδου κάθε προσομοίωσης εισάγοντας ένα αρχείο της μορφής .cvs (βλ. Εικόνα 3.8). Σε κάθε μέγεθος εισόδου δίνεται μια τιμή η οποία θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς κάθε προσομοίωσης. Επίσης ο χρήστης καθορίζει τα μεγέθη εξόδου που θέλει να υπολογιστούν στην έξοδο του Batch simulation. Μετά το πέρας των προσομοιώσεων τα αποτελέσματα καταγράφονται σε ένα νέο αρχείο .cvs (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.7 Επιλογή μεγεθών εξόδου από τους υπολογισμούς του Batch simulation



Εικόνα 3.8 Μορφή αρχείου εισόδου στο Batch simulation



Εικόνα 3.9 Μορφή αρχείου εξόδου στο Batch simulation

### 3.5. Μορφή ενός τυπικού Report

Πιο κάτω, παρατίθεται μια τυπική μορφή του report στην έξοδο κάθε προσομοίωσης στο λογισμικό. Στις πρώτες δύο σελίδες αναγράφονται τα βασικά στοιχεία του έργου δηλαδή το όνομα του, η ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς, η τοποθεσία (συντεταγμένες και albedo), ο αριθμός και η κλίση Φ/Β πλαισίων και το πλήθος των αντιστροφέων (inverters).

**PVsyst - Simulation report**  
Grid-Connected System  
Project: LAKE\_WATER  
Variant: New simulation variant  
No 3D scene defined, no shadings  
System power: 100.0 MWp  
LAKE\_WATER\_Tsardhaki - Greece

Version 7.3.4

Project: LAKE\_WATER  
Variant: New simulation variant  
CHRISTINA SAVVA (Greece)

**Project summary**

<b>Geographical Site</b> LAKE_WATER_Tsardhaki Greece	<b>Situation</b> Latitude: 39.35 °N Longitude: 21.76 °E Altitude: 772 m Time zone: UTC+2	<b>Project settings</b> Albedo: 0.05
--	--	---

**Meteo data**  
LAKE\_WATER\_Tsardhaki  
Meteonorm 8.1 (1992-2005), GHI=100% (Modified by user) - Synthetic

**System summary**

<b>Grid-Connected System</b> PV Field Orientation Fixed plane Tilt/Azimuth: 39 / 0 °	<b>No 3D scene defined, no shadings</b> Near Shadings: No Shadings	<b>User's needs</b> Unlimited load (grid)
<b>System information</b> PV Array No. of modules: 229592 units Pnom total: 100.0 MWp	<b>Inverters</b> Nb. of units: 440 units Pnom total: 77.00 MWac Pnom ratio: 1.299	

**Results summary**

Produced Energy: 160696595 kWh/year	Specific production: 1607 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR: 89.45 %
-------------------------------------	--	-------------------------

**Table of contents**

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Horizon definition	4
Main results	5
Loss diagram	6
Predet. graphs	7
Single-line diagram	8

Author: CHRISTINA SAVVA (Greece)

12/06/23 PVsyst Student License for CHRISTINA SAVVA (Greece) Page 2/8

Στην 3<sup>η</sup> σελίδα της αναφοράς περιλαμβάνονται οι γενικές παράμετροι του έργου σαν ο προσανατολισμός, το ύψος του ορίζοντα, το μοντέλο υπολογισμού της διάχυτης ακτινοβολίας και οι γειτονικές σκιάσεις. Στην ίδια σελίδα επίσης αναγράφονται τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (μοντέλο και χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας συλλέκτη και αναστροφέα, πλήθος συλλεκτών και αναστροφέων) και οι απώλειες συστοιχίας (array losses). Οι απώλειες συστοιχίας αποτελούνται από τις απώλειες λόγω σκόνης και κατακαθίσεων, ηλεκτρικές απώλειες συστήματος, απώλειες «αναντιστοιχίας» και θερμικές απώλειες.

Στην επόμενη σελίδα, αναλύεται το προφίλ του ορίζοντα (Horizon profile) στην τοποθεσία της εγκατάστασης καθώς μπορεί να προκληθούν σκιάσεις στους συλλέκτες. Υπάρχουν τέτοια έτοιμα προφίλ σε βάσεις δεδομένων σαν το PVGIS και το Meteonorm και μπορούν να εισαχθούν στο λογισμικό. Οι σκιάσεις λόγω του προφίλ του ορίζοντα συμπεριλαμβάνονται στα Shading losses του συστήματος και απεικονίζονται στο ηλιακό διάγραμμα.



Project: LAKE\_WATER  
 Variant: New simulation variant  
 CHRISTINA SAVVA (Greece)

PVsyst V7.3.4  
 VCS, simulation date:  
 12/06/23 01:56  
 with V7.3.4

**General parameters**

<b>Grid-Connected System</b>	No 3D scene defined, no shadings		
<b>PV Field Orientation</b>	Sheds configuration: No 3D scene defined		
Orientation	Models used	Perez	
Fixed plane	Transposition	Perez, Meteonorm	
Tilt/Azimuth	Diffuse	Circumsolar separate	
Horizon	<b>User's needs</b>		
Average Height	Near Shadings		Unlimited load (grid)

**PV Array Characteristics**

<b>PV module</b>	Generic	<b>Inverter</b>	Generic
Manufacturer	TSM-DE03R-08W-435wp	Manufacturer	SUN2000-175KTL-H0
Model	(Original PVsyst database)	Model	(Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	435 Wp	Unit Nom. Power	175 kWac
Number of PV modules	22952 units	Number of inverters	440 units
Nominal (STC)	100.0 MWp	Total power	77000 kWac
Modules	8842 Strings x 26 in series	Operating voltage	600-1500 V
At operating cond. (50°C)		Max. power (~25°C)	193 kWac
Pmpp	91.54 MWp	Pnom ratio (DC:AC)	1.30
Ump	1012 V	Power sharing within this inverter	
Imp	90480 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	100003 kWp	Total power	77000 kWac
Total	22952 modules	Max. power	84920 kWac
Module area	459349 m²	Number of inverters	440 units
		Pnom ratio	1.30

**Array losses**

<b>Array Soiling Losses</b>	Loss Fraction	2.0 %	<b>Thermal Loss factor</b>	Module temperature according to irradiance	Uc (constant)	24.4 W/m²K	<b>DC wiring losses</b>	Global array res.	0.16 mΩ
				Uv (wind)	6.5 W/m²km/s		Loss Fraction	1.5 % at STC	
<b>Module Quality Loss</b>	Loss Fraction	-0.4 %	<b>Module mismatch losses</b>	Loss Fraction	1.0 % at MPP	<b>Strings Mismatch loss</b>	Loss Fraction	0.2 %	
<b>IAM loss factor</b>	Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AI)=1.290								
	0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
	1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000



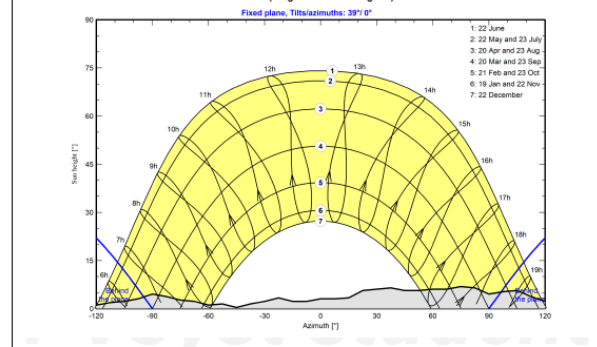
Project: LAKE\_WATER  
 Variant: New simulation variant  
 CHRISTINA SAVVA (Greece)

PVsyst V7.3.4  
 VCS, simulation date:  
 12/06/23 01:56  
 with V7.3.4

**Horizon definition**

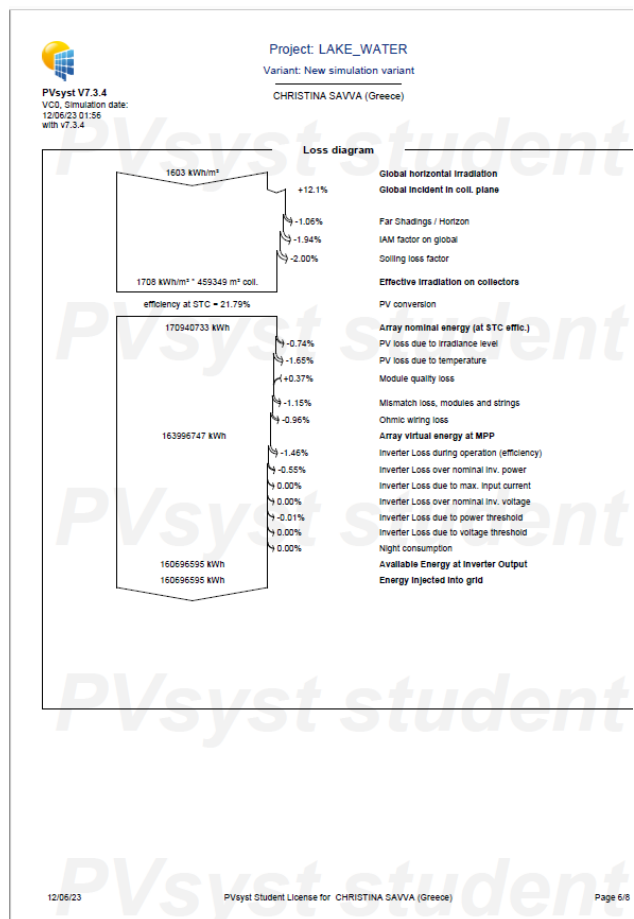
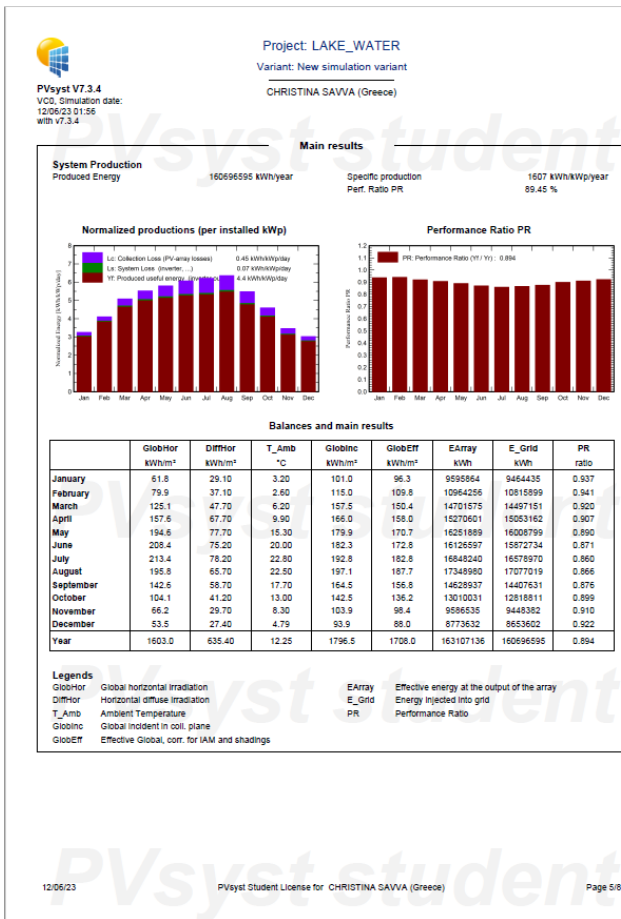
Horizon from PVGIS website API, Lat=39°17'49", Long=21°45'39", Alt=772m													
Average Height	3.1 °	Albedo Factor	0.82										
Diffuse Factor	0.97	Albedo Fracton	100 %										
<b>Horizon profile</b>													
Azimuth [°]	-150	-173	-165	-158	-150	-143	-135	-128	-120	-113	-105	-98	-90
Height [m]	3.1	1.9	2.7	1.1	1.9	1.9	0.4	1.1	1.1	1.9	2.3	3.1	4.6
Azimuth [°]	-83	-75	-66	-50	-53	-45	-38	-30	-23	-15	-8	0	8
Height [m]	3.8	2.7	2.3	1.1	1.5	0.4	1.5	2.3	3.4	2.3	2.3	3.1	3.1
Azimuth [°]	15	23	30	38	45	53	60	68	75	83	90	98	105
Height [m]	3.4	5.7	6.1	6.5	5.7	5.7	6.1	6.1	5.9	6.5	4.6	5.3	5.7
Azimuth [°]	113	120	128	135	143	150	158	165	173	180			
Height [m]	3.8	2.3	1.9	1.5	1.1	0.8	1.9	1.5	2.3	3.1			

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



Στην 5<sup>η</sup> σελίδα παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα, δηλαδή τα χαρακτηριστικά ενεργειακά μεγέθη της εγκατάστασης τα οποία έχουν καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία. Τα κύρια αποτελέσματα που ξεχωρίζουν είναι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια, η ειδική παραγωγή ενέργειας και ο συντελεστής απόδοσης. Τα σημαντικά ενεργειακά μεγέθη συνοψίζονται σε έναν πίνακα ολικώς ανά μήνα και συνολικά για ένα τυπικό έτος. Η παραγόμενη ενέργεια παρουσιάζεται ως ραβδόγραμμα και αναλύεται στις επιμέρους συνιστώσες της.

Στην 6<sup>η</sup> σελίδα της αναφοράς παρουσιάζεται το διάγραμμα απωλειών το οποίο παρέχει πληροφορίες για την ποιότητα του σχεδιασμού ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, προσδιορίζοντας τις κύριες πηγές απωλειών. Από το διάγραμμα, οι απώλειες συστοιχίας ξεκινούν από την αξιολόγηση της ονομαστικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας την παγκόσμια ενεργή ακτινοβολία και την ονομαστική απόδοση MPP της συστοιχίας στις συνθήκες STC. Στη συνέχεια, ακολουθούν οι λεπτομέρειες της συμπεριφοράς του μοντέλου του φωτοβολταϊκού συλλέκτη σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές μεταβλητές. Σημαντικό σημείο είναι πως κάθε απώλεια ορίζεται ως ποσοστό της προηγούμενης ποσότητας ενέργειας και δηλαδή οι ποσοστιαίες τιμές δεν είναι προστίθενται ώστε να βρεθεί το συνολικό ποσοστό των απωλειών.



Η 7<sup>η</sup> σελίδα της αναφοράς περιλαμβάνει δυο διαγράμματα. Το πρώτο είναι διάγραμμα ημερήσιων ροών εισόδου και εξόδου από το Φ/Β σύστημα. Απεικονίζονται δηλαδή σημεία με τετμημένη την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη και τεταγμένη την παραγόμενη ενέργεια στο δίκτυο (ημερήσιες τιμές για ένα τυπικό έτος προσομοίωσης). Το δεύτερο διάγραμμα είναι ιστόγραμμα το οποίο περιγράφει την κατανομή μιας προσπίπτουσας συσσωρευμένης μεταβλητής (της διαχεόμενης ενέργειας στο δίκτυο) ως συνάρτηση μιας μεταβλητής κατάστασης (της διαχεόμενης ισχύος στο δίκτυο). Η ισχύς χωρίζεται σε κλάσεις και ορίζεται ως τετμημένη. Το ύψος της κάθε κλάσης αντιπροσωπεύει τη συνολική ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια του έτους, όταν το σύστημα λειτουργούσε μεταξύ των δύο άκρων της κλάσης της ισχύος σε [kW].

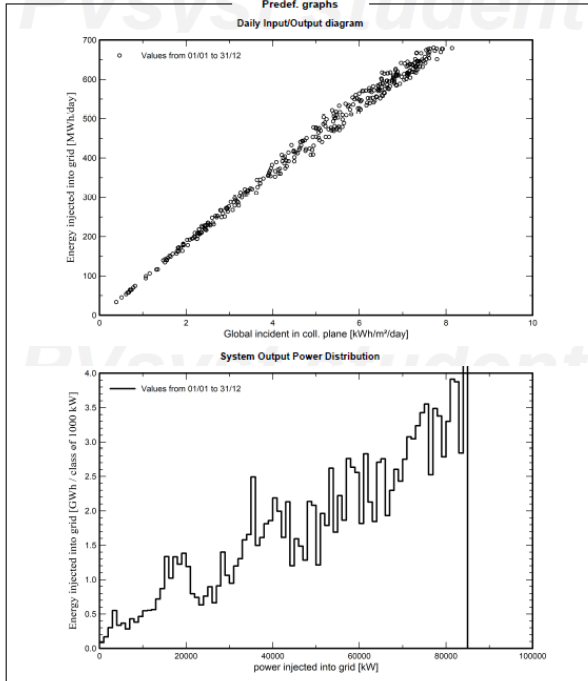
Στην τελευταία σελίδα του report απεικονίζεται το ηλεκτρονικό σχέδιο της εγκατάστασης (single-line diagram) το οποίο συμβολίζει τα Φ/Β πλαίσια, τους αντιστροφείς και το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο μιας και πρόκειται για έργο συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο.



PVsyst V7.3.4  
 VC0, Simulation date:  
 12/06/23 01:56  
 with v7.3.4

Project: LAKE\_WATER  
 Variant: New simulation variant  
 CHRISTINA SAVVA (Greece)

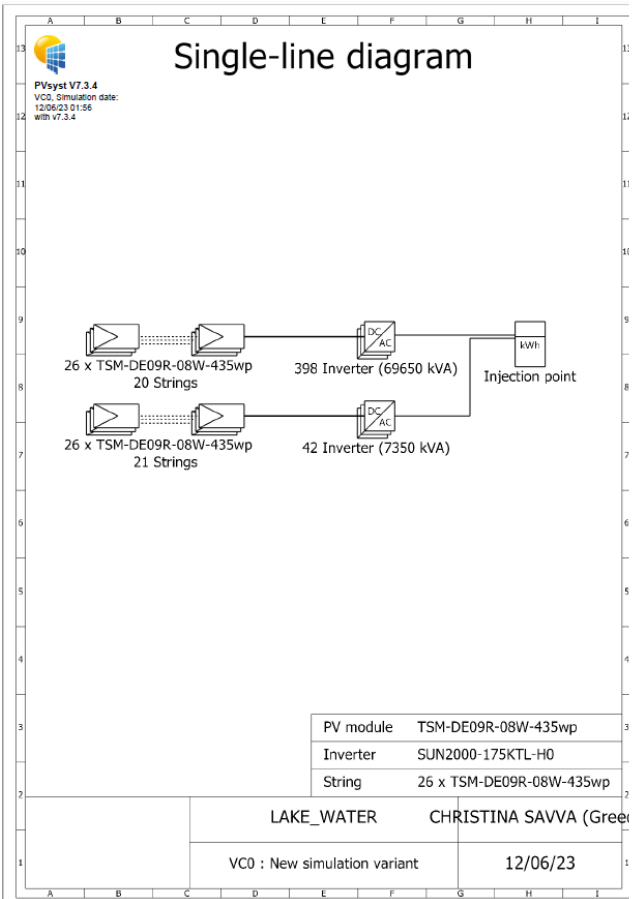
Predef. graphs



12/06/23

PVsyst Student License for CHRISTINA SAVVA (Greece)

Page 7/8



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΑΝΟΙΚΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ

### 4.1: Γενικά

Η επιλογή της τοποθεσίας των πλωτών φωτοβολταϊκών αποτελεί πολυκριτηριακό πρόβλημα. Περιβαλλοντικοί, τεχνικοί και κοινωνικοπολιτικοί περιορισμοί παίζουν ρόλο στην τελική επιλογή. Μερικά από τα κριτήρια αυτά αναλύονται στη συνέχεια. Η βέλτιστη επιλογή προκύπτει συνυπολογίζοντας τη βαρύτητα που αποδίδεται από τους μελετητές στο κάθε κριτήριο.

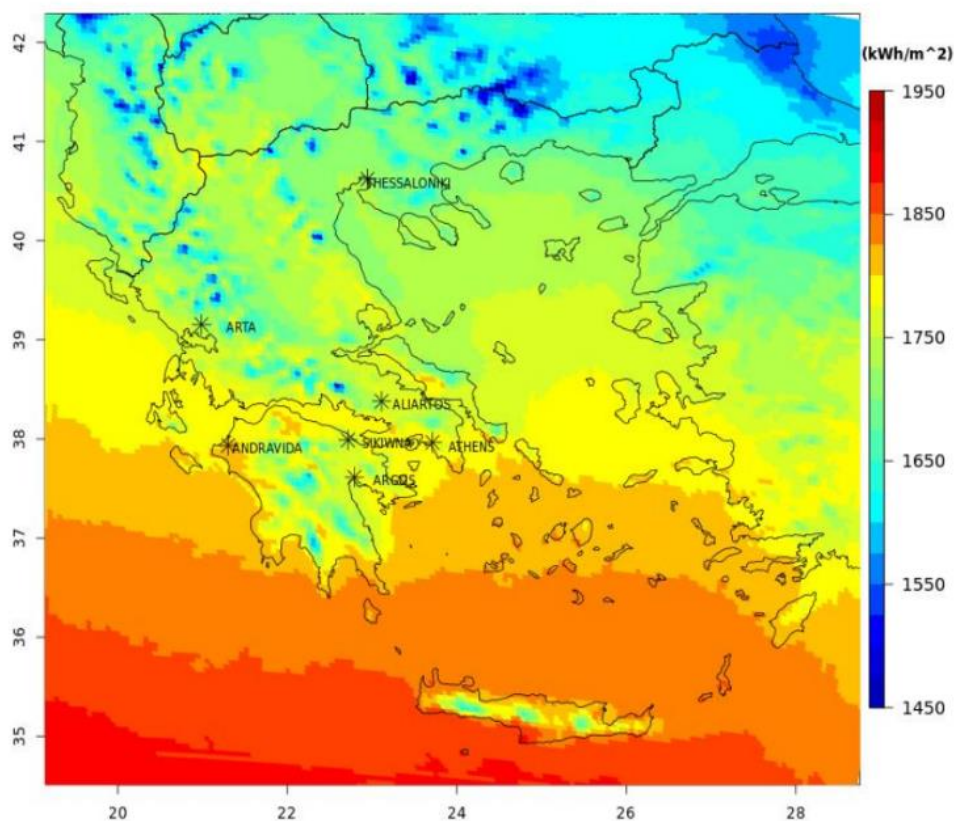
### 4.2: Κριτήρια

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται μελέτες για τοποθεσίες, ευνοϊκές για την εγκατάσταση πλωτών φωτοβολταϊκών στον θαλάσσιο χώρο πλησίον της Ελλάδας, συνηθέστερα σε ελλαδικές και τουρκικές θαλάσσιες περιοχές. Κύρια κριτήρια επιλογής αποτελούν τα εξής:

#### 4.2.1. Παγκόσμια Οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]

Όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως, η ηλιακή ακτινοβολία είναι ο κύριος παράγοντας στην ηλεκτρική απόδοση των φωτοβολταϊκών. Είναι το άθροισμα της διάχυτης οριζόντιας και άμεσης κάθετης ακτινοβολίας. Επομένως, προτιμώνται περιοχές με υψηλή τιμή ακτινοβολίας, αφού περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό συμβάλλουν σημαντικά στην αποδοτικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα του έργου [46]. Στην Εικόνα 4.1, παρουσιάζεται η ολική κατανομή και το αντίστοιχο εύρος τιμών της παγκόσμιας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας (GHI) σε  $\text{kWh}/\text{m}^2$  στην Ελλάδα για τα έτη 1980-2004. Οι πιο νότιες ζώνες είναι αυτές με τις υψηλότερες τιμές ακτινοβολίας και έτσι οι προτιμότερες για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών. Κατά κανόνα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτούν ελάχιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία, ίση με  $1300 \text{kWh}/\text{m}^2$  για τη βιώσιμη οικονομική τους λειτουργία, όριο το οποίο ικανοποιείται κατά πολύ περισσότερο στη χώρας της Ελλάδας [47].

### Global Horizontal Irradiation 1980-2004 Annual Sum

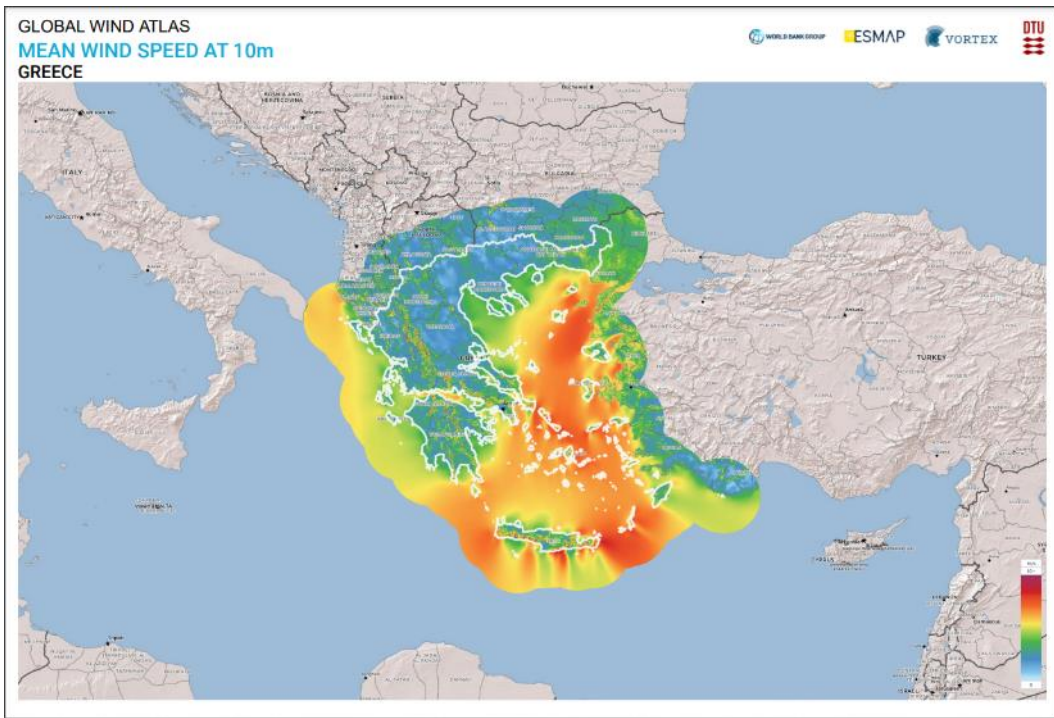


Εικόνα 4.1 Οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα [48]

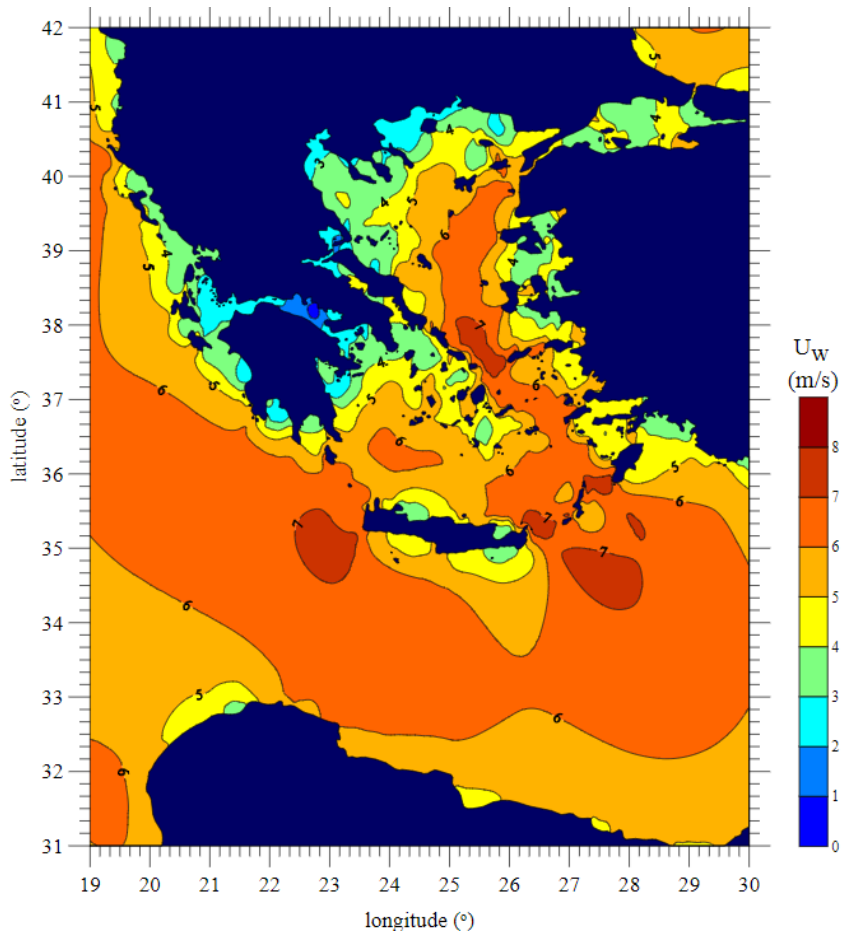
#### 4.2.2. Αιολικό δυναμικό-Ταχύτητα ανέμου [m/s]

Μεγάλες ταχύτητες ανέμου μπορούν να έχουν εξίσου θετικές και αρνητικές συνέπειες στην λειτουργία των πλωτών φωτοβολταϊκών. Αφενός, οι μεγάλες ταχύτητες ανέμου συνεισφέρουν στην ψύξη των πλαισίων άρα και στη βελτίωση της απόδοσης τους. Αφετέρου, προκαλούν άμεσα δυνάμεις καταπόνησης και είναι πηγές έντονων κυματικών φαινομένων που με τη σειρά τους καταπονούν σημαντικά την πλωτή κατασκευή (πλωτήρες και πλαίσια) [49]. Στην Εικόνα 4.2, αναπαρίσταται το αιολικό δυναμικό στην περιοχή της Ελλάδας και συγκεκριμένα η μέση ταχύτητα ανέμου στα 10 m, ενώ η Εικόνα 4.3 αφορά τις ισοσταθμικές καμπύλες των μέσων ταχυτήτων ανέμου. Πιο συγκεκριμένα απεικονίζονται οι γεωμετρικοί τόποι των σημείων όπου η εποχιακή μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου είναι σταθερή (σε m/s) [50].





Εικόνα 4.2 Αιολικό δυναμικό (σε ύψος 10 m) στην Ελλάδα [51]



Εικόνα 4.3 Χορική κατανομή μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου  $U_w$  στην Ελλάδα [50]

### 4.2.3. Σημαντικό ύψος κύματος [m]

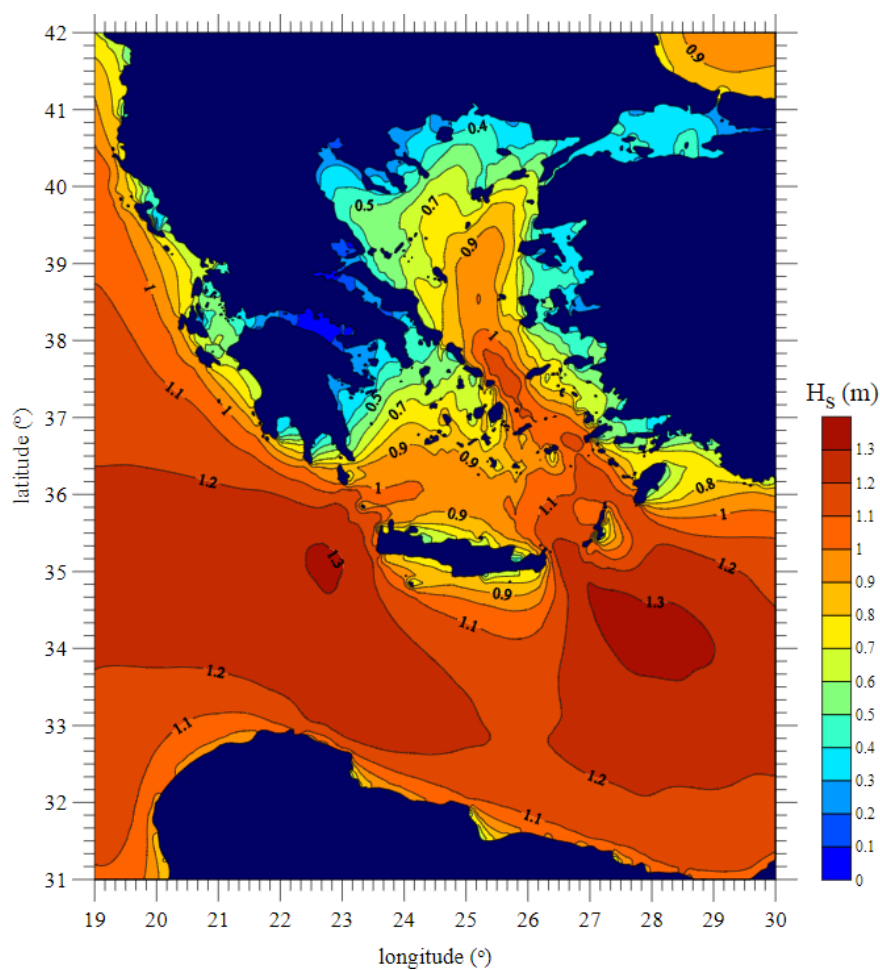
Έντονα κυματικά φαινόμενα προκαλούν μεγάλες καταπονήσεις στην πλωτή κατασκευή. Χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [m], δηλαδή η απόλυτη κατακόρυφη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και της επόμενης κοιλάδας το οποίο ορίζεται βάσει της Εξίσωσης 4.1 [50], όπου  $V$  η ταχύτητα ανέμου.

$$H_s = 0.2092 \frac{V^2}{g}$$

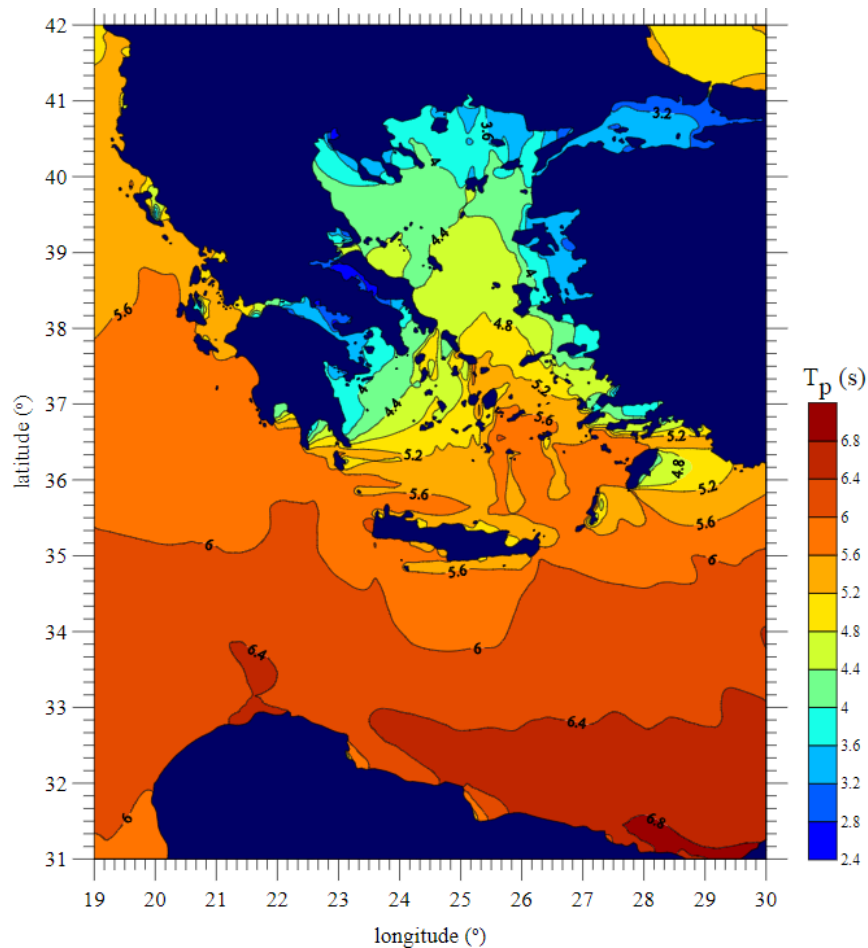
Εξίσωση 4.1

Στην Εικόνα 4.4 αναπαρίστανται οι ισοσταθμικές καμπύλες των μέσων τιμών του σημαντικού ύψους κύματος, δηλαδή ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου η εποχιακή μέση τιμή του σημαντικού ύψους έχει σταθερή τιμή (σε m).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της περιόδου των κυμάτων αφού αυτή καθορίζει άμεσα τις καταπονήσεις λόγω των κυμάτων. Οι ισοσταθμικές καμπύλες των μέσων τιμών της περιόδου κορυφής φάσματος παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5. Σε αυτές τις καμπύλες η εποχιακή μέση τιμή της περιόδου κορυφής φάσματος είναι σταθερή και μετριέται σε [s].



Εικόνα 4.4 Ισοσταθμικές καμπύλες σημαντικού ύψους κύματος στην Ελλάδα [50]

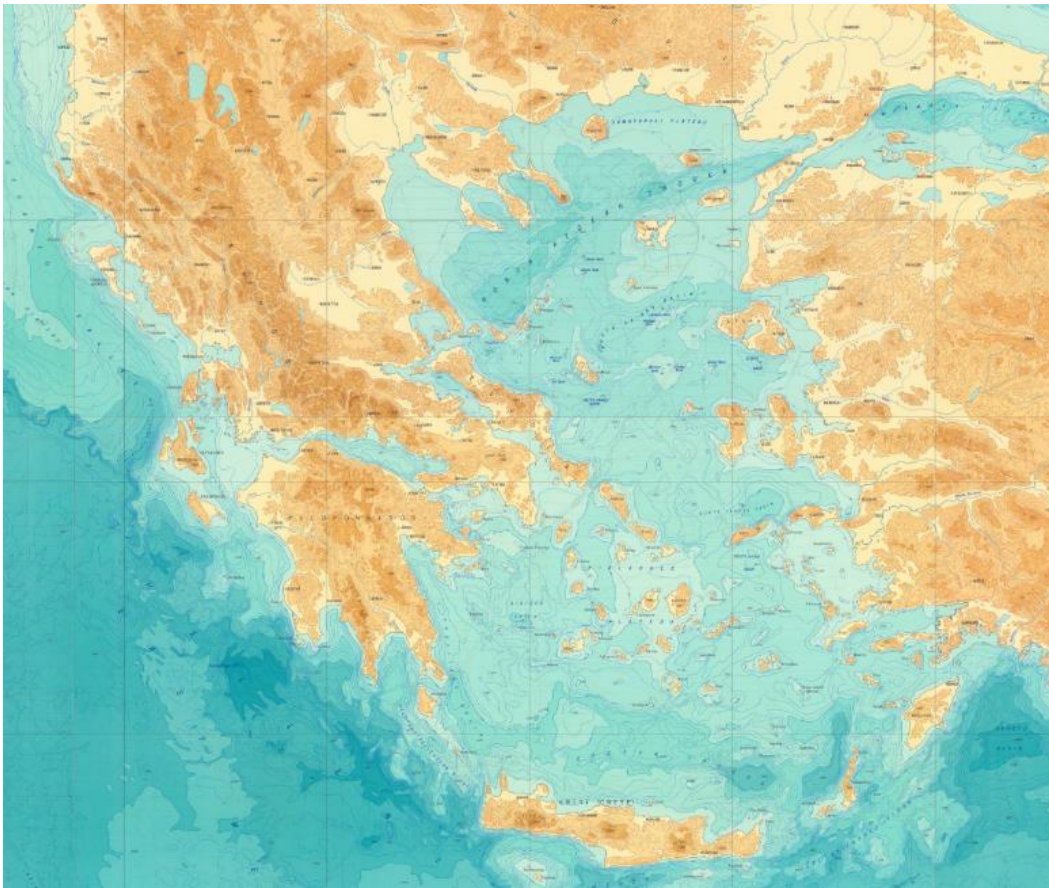


Εικόνα 4.5 Χωρική κατανομή μέσης τιμής της περιόδου κύματος στην Ελλάδα [50]

Παρατηρείται ότι οι περιοχές όπου το μέσο σημαντικό ύψος κύματος είναι υψηλότερο, ταυτόχρονα η περίοδος κύματος είναι υψηλή, άρα η συχνότητα εμφάνισης των κυμάτων χαμηλή. Έτσι κύματα με μεγαλύτερο ύψος εμφανίζονται αραιότερα, ενώ κύματα μικρότερου ύψους συχνότερα.

#### 4.2.4. Βάθος βυθού [m]

Το βάθος του βυθού παίζει σημαντικό ρόλο στο σύστημα πρόσδεσης, αγκύρωσης και καλωδίωσης και κατ' επέκταση το ολικό κόστος της εγκατάστασης. Σε μεγαλύτερο βάθος βυθού το κόστος και η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού για τα προαναφερθέντα συστήματα αυξάνεται σημαντικά, έτσι τοποθεσίες με μικρότερο βάθος είναι προτιμότερα λόγω μειωμένων εξόδων εγκατάστασης και συντήρησης [46]. Γενικά, τα πλωτά Φ/Β αναπτύσσονται καλύτερα σε τοποθεσίες με μέγιστο βάθος 15 m, με ελάχιστη διακύμανση [31]. Όμως αυτό δεν είναι αυστηρώς περιοριστικό, αφού στην δημοσίευση των Ikhennicheu κ.ά. η πλωτή κατασκευή στην ανοικτή θάλασσα τοποθετείται σε βάθος 40 m και αυτή στην μεγάλη λίμνη στα 90 m. Στην Εικόνα 4.6, απεικονίζονται οι ισοσταθμικές καμπύλες βάθους στις ελληνικές θάλασσες.

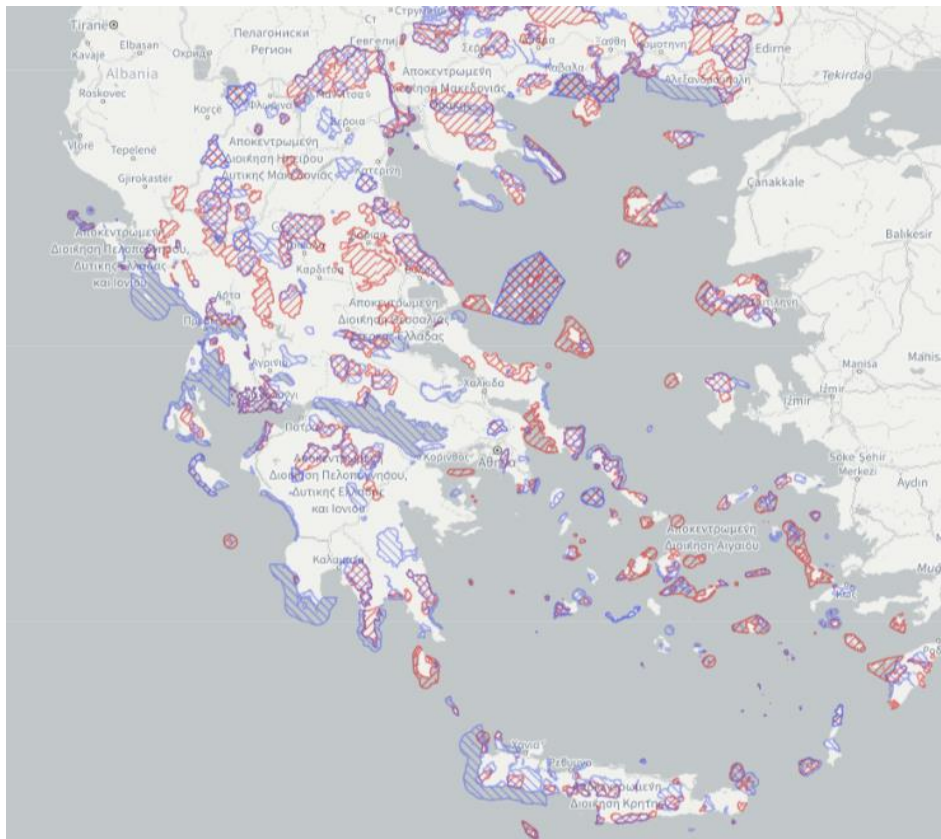


Εικόνα 4.6 Βαθυμετρικός χάρτης της Ελλάδας

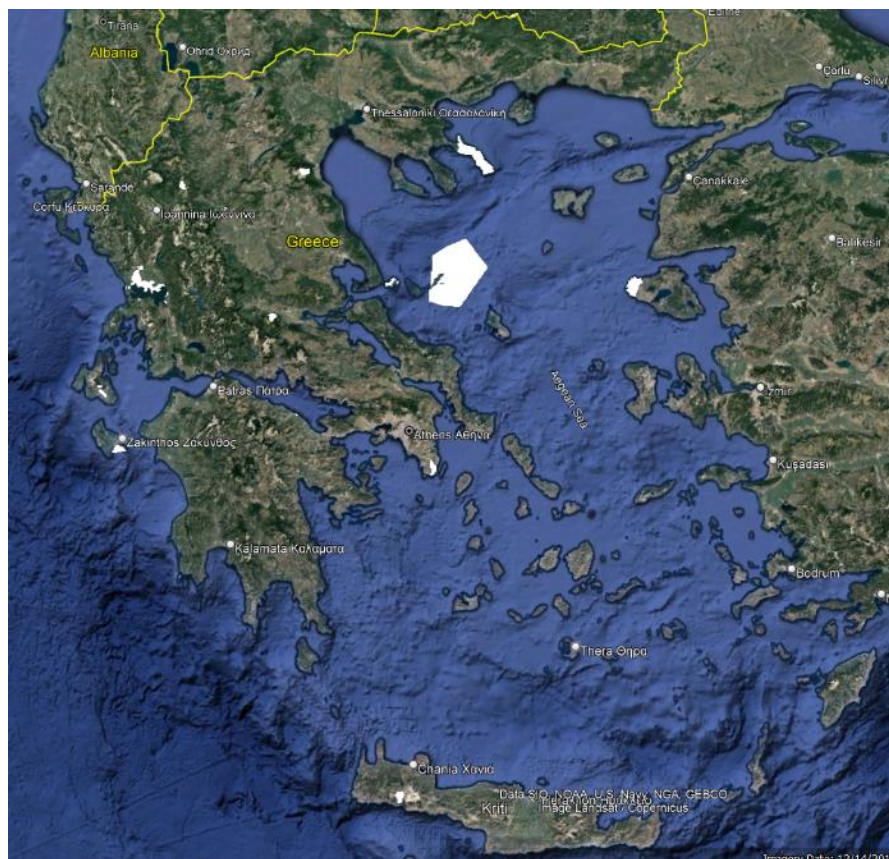
Σημαντική κρίνεται και η γεωμετρία (εμβαδόν, σχήμα, κατανομή βάθους στην έκταση) του υδάτινου «οικοπέδου» για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών αφού αυτή καθορίζει και τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης. Υπολογίζεται πως 1 MWp απαιτεί περίπου 1 εκτάριο για το πλωτό νησί και 1.7 εκτάρια υδάτινης έκτασης, αφού ληφθεί υπόψη η αγκύρωση [31].

#### 4.2.5. Προστατευόμενη περιοχή

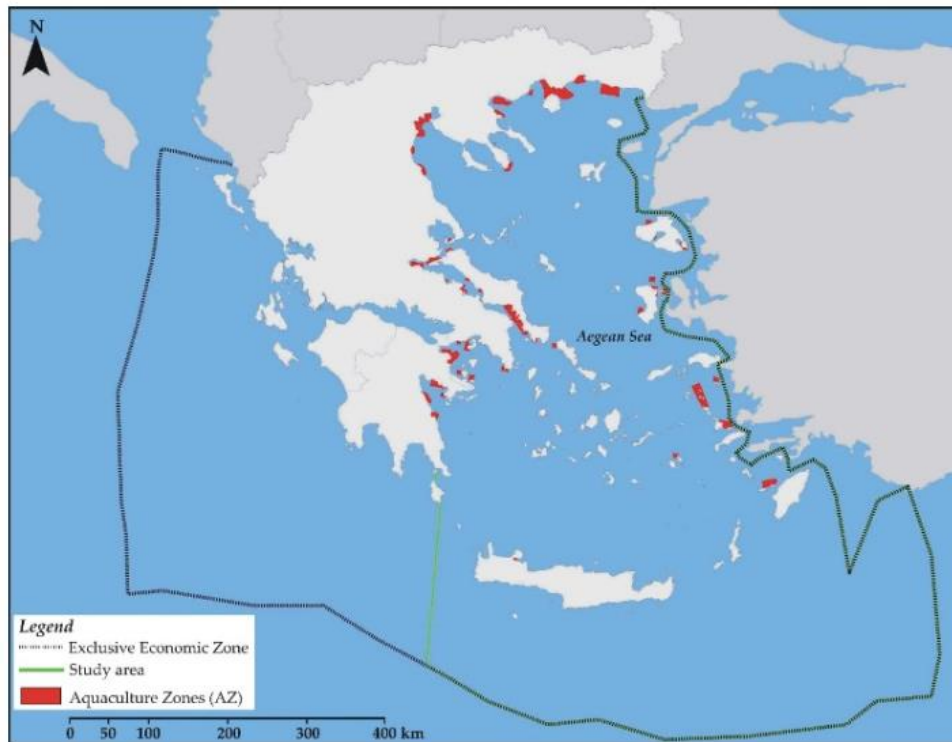
Προστατευόμενες περιοχές, βιότοποι και κατελιμμένες τοποθεσίες για στρατιωτικές ασκήσεις, ιχθυοκαλλιέργειες και εξορύξεις αποκλείονται για την εγκατάσταση πλωτών φωτοβολταϊκών. Οι περιοχές Natura παρουσιάζονται σκιαγραφημένες στην Εικόνα 4.7, οι κατελιμμένες περιοχές από διεθνείς συνθήκες (π.χ. BARCELONA, BIOGEN, BIOSPHERE, DIPLOMA, MPK) παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.8 και οι περιοχές δεσμευμένες για ιχθυοκαλλιέργεια φαίνονται στην Εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.7 Προστατευόμενες περιοχές Natura στην Ελλάδα [52]



Εικόνα 4.8 Κατελιγμένες περιοχές από διεθνείς συνθήκες στην Ελλάδα [53]



Εικόνα 4.9 Κατειλημμένες περιοχές ιχθυοκαλλιέργειας στην Ελλάδα [46]

#### 4.2.6. Απόσταση από τη στεριά [km]

Η τοποθέτηση των πλωτών εκτάσεων παραγωγής ενέργειας γίνεται σε απόσταση τάξεως χιλιομέτρων από τις ακτές για λόγους οπτικής και ηχητικής όχλησης. Λόγω του πρώιμου σταδίου ανάπτυξης και εγκατάστασης των πλωτών φωτοβολταϊκών, δεν υπάρχει κάποια αναλυτική οδηγία ή νομοθετικό πλαίσιο όσον αφορά αυτές τις πηγές. Σε πιο προχωρημένο στάδιο βρίσκονται τα νομοθετικά πλαίσια για τις πλωτές ανεμογεννήτριες. Με απόφαση της επιτροπής συντονισμού της κυβερνητικής πολιτικής στον τομέα του χωροταξικού σχεδιασμού και της αειφόρου ανάπτυξης, η χωροθέτηση αιολικών μονάδων στον θαλάσσιο χώρο επιτρέπεται εκτός των άλλων σε απόσταση μεγαλύτερη των 1500 m από ακτές και απαγορεύεται για κλειστούς κόλπους με εύρος ανοίγματος μικρότερο των 1500 m [54]. Συγκεκριμένα οι ακτές αυτές περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα παρακολούθησης της ποιότητας νερών κολύμβησης. Σε αρκετές δημοσιεύσεις αναφορικά με την επιλογή τοποθέτησης πλωτών ανεμογεννητριών, παρατηρούνται κριτήρια για μεγάλες αποστάσεις από τις ακτές, τουλάχιστον 10-20 km, λόγω της έντονης ηχητικής όχλησης [55] και του υψηλού αιολικού δυναμικού στην ανοικτή θάλασσα (ταχύτητα ανέμου τουλάχιστον ίση με 8 m/s) [56].

Όσον αφορά τα πλωτά φωτοβολταϊκά, η εγγύτητα με τη στεριά μειώνει το κόστος εγκατάστασης μεν, είναι όμως παράγοντας οπτικής όχλησης και περιοριστικός παράγοντας για τουριστικές δραστηριότητες δε [46]. Στην περίπτωση λοιπόν των πλωτών φωτοβολταϊκών, η βέλτιστη απόσταση κρίνεται στα 1.5 με 2 km από τις ακτές.

#### 4.2.7. Απόσταση από το δίκτυο ενέργειας [km]

Η επιλογή χωροθέτησης των φωτοβολταϊκών ώστε να επιτυγχάνεται η διασύνδεση τους με το δίκτυο ενέργειας, προϋποθέτει τις κατάλληλες συνθήκες για ασφάλεια του δικτύου, εύκολη και γρήγορη πρόσβαση και συντήρηση. Η εγγύτητα στο δίκτυο και στις γραμμές ισχύος προσφέρει σημαντικό οικονομικό πλεονέκτημα στο έργο, αφού μειώνονται τα έξοδα της εγκατάστασης καλωδίων διασύνδεσης. Υπολογίζεται ότι η βέλτιστη απόσταση μεταξύ ηλιακών συστημάτων και του δικτύου ενέργειας όσον αφορά θέματα ασφαλείας είναι περίπου 0 έως 5 χιλιόμετρα [47]. Για επιλογή χωροθέτησης στη στεριά, χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι περιοχές σε απόσταση τουλάχιστον 50 km μακριά από το δίκτυο, αποκλείονται για πιθανή εγκατάσταση φωτοβολταϊκών.

Στην Ελλάδα, το δίκτυο χωρίζεται σε δίκτυο υπερύψηλης τάσης 400 kV, υψηλής 150 kV και μέσης 66 kV. Ο χάρτης των γραμμών τάσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10 Χάρτης διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα [57]

#### 4.2.8. Ακτοπλοϊκό δίκτυο

Η χωροθέτηση των φωτοβολταϊκών οφείλει να μην εμποδίζει ακτοπλοϊκές εμπορικές ή επιβατικές γραμμές και να προνοεί ικανοποιητική απόσταση από λιμάνια και χώρους προσάραξης σκαφών. Η απόσταση η οποία προνοείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι τουλάχιστον 1 km μακριά από θαλάσσιους δρόμους [58] , τουλάχιστον 100 km μακριά από λιμάνια με βαθύ βυθό [46] και 50 km μακριά από μικρές προβλήτες [59].

#### 4.2.9. Εξυπηρετούμενες κοινότητες

Η κοινωνική αποδοχή και στήριξη από τις τοπικές κοινότητες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών [46]. Αυτό διότι πιθανώς υπάρχει και στήριξη κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και χρηματοδότηση από τοπικές επιχορηγήσεις. Οι περιοχές οι οποίες βρίσκονται κοντά σε συγκεντρωμένες πυκνοκατοικημένες κοινότητες μόνιμων κατοίκων είναι προτιμότερες για χωροθέτηση των έργων λόγω και των πολλών θέσεων εργασίας οι οποίες προσφέρονται σε τέτοιες εγκαταστάσεις [49].

### 4.3: Κριτήρια της εργασίας

Στην παρούσα εργασία δόθηκε έμφαση σε 7 από τα προαναφερθέντα κριτήρια. Συνοπτικά αυτά τα κριτήρια παρουσιάζει ο Πίνακας 4.1 και η αρίθμηση δεν υποδηλώνει κάποια βαρύτητα των κριτηρίων.

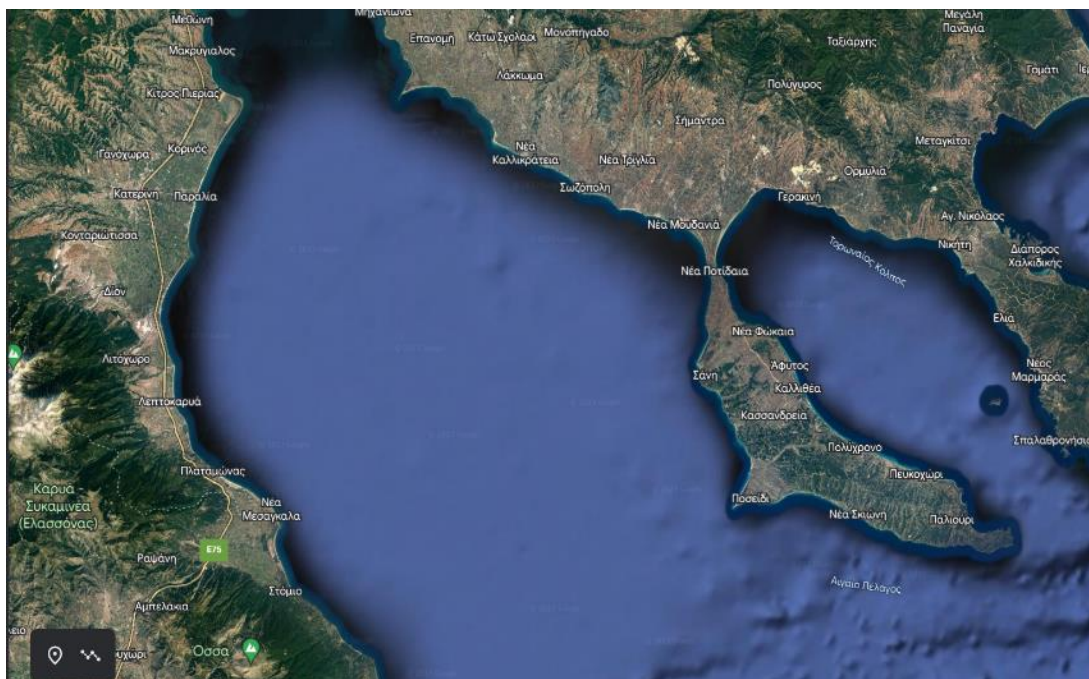
Πίνακας 4.1 Κριτήρια και περιγραφή για τη χωροθέτηση των πλωτών φωτοβολταϊκών

A/A	Κριτήριο	Περιγραφή
1	Βάθος του βυθού	Αποκλείονται περιοχές με βάθος μεγαλύτερο των 100 m
2	Απόσταση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	Αποκλείονται περιοχές με μεγάλη απόσταση 50 km από το δίκτυο υπερύψηλης τάσης 400 kV
3	Προστατευόμενες περιοχές και περιοχές Natura	Αποκλείονται όλες οι προστατευόμενες περιοχές
4	Ακτοπλοϊκές γραμμές	Αποκλείονται περιοχές κοντά σε ακτοπλοϊκές γραμμές
5	Ταχύτητα ανέμου	Αποφεύγονται περιοχές με μέση ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη των 5 m/s
6	Σημαντικό ύψος κυμάτων	Αποφεύγονται περιοχές με μέσο σημαντικό ύψος κύματος μεγαλύτερο των 0.5 m
7	Ηλιακή ακτινοβολία	Επιλέγονται περιοχές με υψηλή τιμή (μεγαλύτερη των 1700 kWh/m <sup>2</sup> ) παγκόσμιας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας



#### 4.4: Επιλογή τελικής τοποθεσίας και χαρακτηριστικά

Η τοποθεσία που επιλέχθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11 και αποτελεί τον θαλάσσιο χώρο ανοικτά των Νέων Μεσαγκαλών.



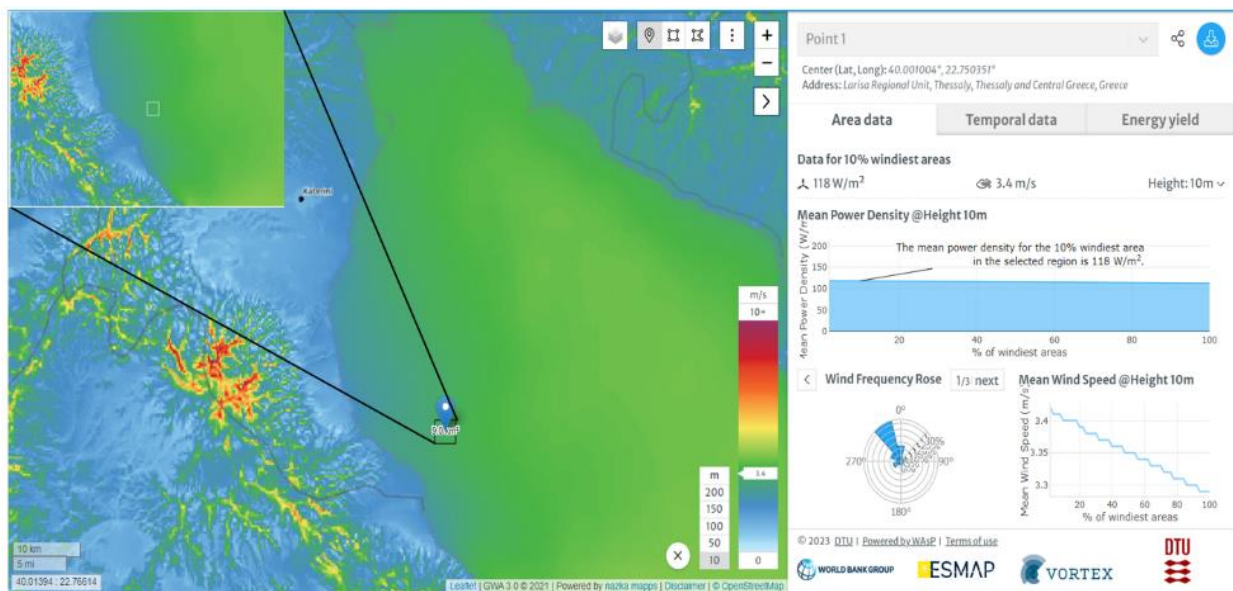
Εικόνα 4.11 Επιλεγθείσα τοποθεσία των πλωτών φωτοβολταϊκών στην ανοικτή θάλασσα

#### Χαρακτηριστικά τοποθεσίας

Ο Πίνακας 4.2 συνοψίζει τα τελικά χαρακτηριστικά της επιλεγθείσας τοποθεσίας για χωροθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνελ, ενώ στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζεται αναλυτικότερα το αιολικό δυναμικό της περιοχής αυτής.

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά της επιλεγθείσας τοποθεσίας χωροθέτησης των πάνελ στην ανοικτή θάλασσα

<b>Βάθος του βυθού</b>	Μέγιστο βάθος 73 m
<b>Απόσταση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας</b>	Απόσταση 6 km από την ακτή και σύνδεση με δίκτυο υψηλής τάσης 150 kV στον Πλαταμόνα
<b>Προστατευόμενες περιοχές και περιοχές Natura</b>	Δεν ανήκει σε κάποια προστατευόμενη περιοχή
<b>Ακτοπλοϊκές γραμμές</b>	Δεν εμποδίζει τη διέλευση κάποιας ακτοπλοϊκής γραμμής
<b>Ταχύτητα ανέμου</b>	Η μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή είναι για 10 m ίση με 3.4 m/s
<b>Σημαντικό ύψος κυμάτων</b>	Το μέσο σημαντικό ύψος κυμάτων είναι εντός του εύρους 0.4-0.5 m
<b>Ηλιακή ακτινοβολία</b>	Η παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία είναι εντός του εύρους 1700-1725 kWh/m <sup>2</sup>



Εικόνα 4.12 Αιολικό δυναμικό τοποθεσίας των πάνελ στην ανοικτή θάλασσα [51]

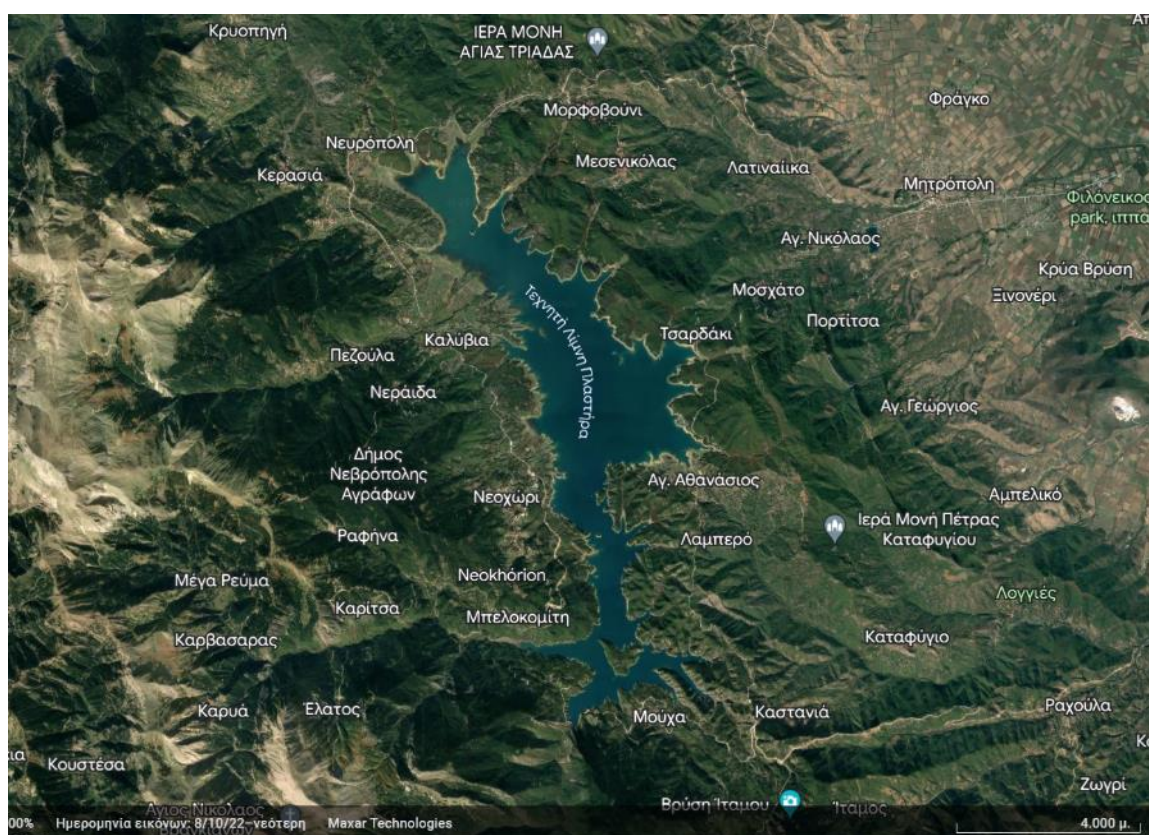
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΛΙΜΝΗ

### 5.1: Γενικά

Η επιλογή της τοποθεσίας των πλωτών φωτοβολταϊκών σε λίμνη ή φράγμα αποτελεί επίσης έντονα πολυκριτηριακό πρόβλημα. Η επιλογή αυτή, έχει παρόμοια κριτήρια με την περίπτωση της θάλασσας με επιπλέον περιορισμό την διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάσταση.

### 5.2: Επιλογή και χαρακτηριστικά της τοποθεσίας

Η επιλεγθείσα τοποθεσία για την περίπτωση της λίμνης αποτελεί η τεχνητή Λίμνη Πλαστήρα η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1 Επιλεγθείσα τοποθεσία για την περίπτωση της λίμνης

### Σημαντικό σχόλιο:

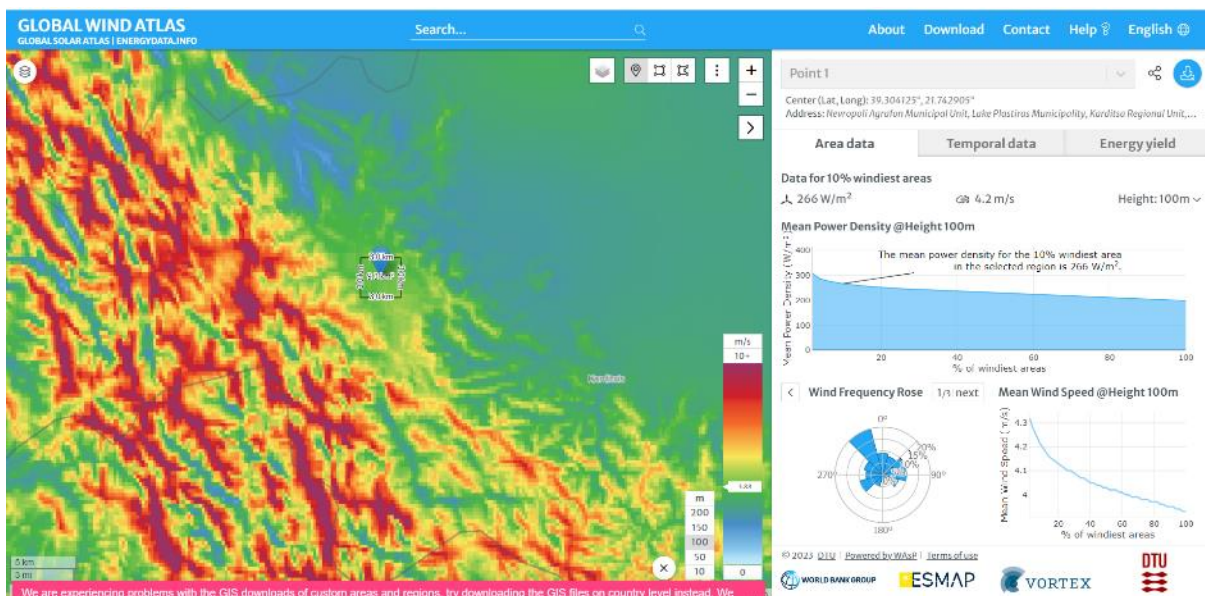
Η λίμνη Πλαστήρα αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους υγροβιότοπους στην Ελλάδα και προστατευόμενη περιοχή Natura. Παρόλα αυτά, επιλέχθηκε για σκοπούς μελέτης λόγω της πληθώρας και καλής ποιότητας των μετεωρολογικών δεδομένων που υπάρχουν για την συγκεκριμένη περιοχή. Σκοπός της μελέτης της είναι να αποτελέσει οδηγό και παράδειγμα του δυναμικού και των ενεργειακών δυνατοτήτων των ελληνικών λιμνών και φραγμάτων και όχι μια υλοποιήσιμη πρόταση για εγκατάσταση πλωτών φωτοβολταϊκών.

## Χαρακτηριστικά τοποθεσίας

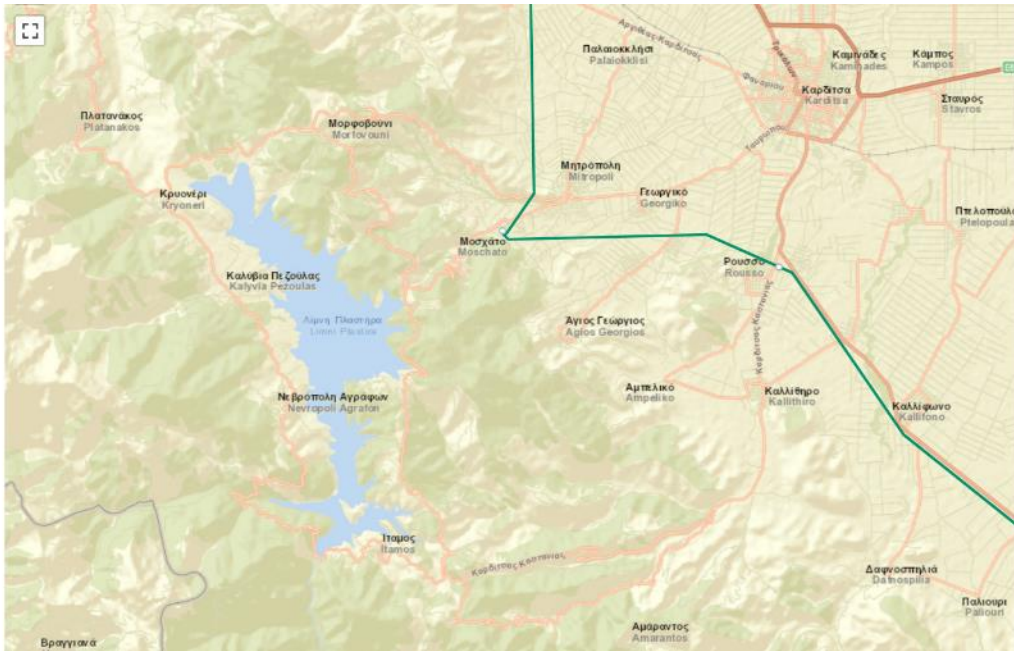
Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψιν τα προαναφερθέντα κριτήρια, ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα δεδομένα της τελικής τοποθεσίας στην λίμνη και τα χαρακτηριστικά της για χωροθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται αναλυτικότερα το αιολικό δυναμικό της περιοχής αυτής και στην Εικόνα 5.3 το πλησιέστερο σημείο υψηλής τάσης, στο Μοσχάτο κοντά στην λίμνη. Το σημαντικό ύψος κυμάτων θεωρήθηκε αμελητέο και οι ακτοπλοϊκές γραμμές δεν αποτελούν κριτήριο.

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά της επιλεχθείσας τοποθεσίας χωροθέτησης των πάνελ στην λίμνη

<b>Βάθος του βυθού</b>	Μέγιστο βάθος 60 m
<b>Απόσταση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας</b>	Απόσταση 2.5 km από την ακτή και σύνδεση με δίκτυο υψηλής τάσης 150 kV στο Μοσχάτο
<b>Προστατευόμενες περιοχές και περιοχές Natura</b>	Είναι περιοχή Natura
<b>Ταχύτητα ανέμου</b>	Η μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή είναι για 10 m ίση με 4.2 m/s
<b>Ηλιακή ακτινοβολία</b>	Η παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία είναι εντός του εύρους 1725-1750 kWh/m <sup>2</sup>



Εικόνα 5.2 Αιολικό δυναμικό τοποθεσίας στην περίπτωση της λίμνης



Εικόνα 5.3 Πλησιέστερο σημείο δικτύου τάσης ως προς την τοποθεσία της λίμνης

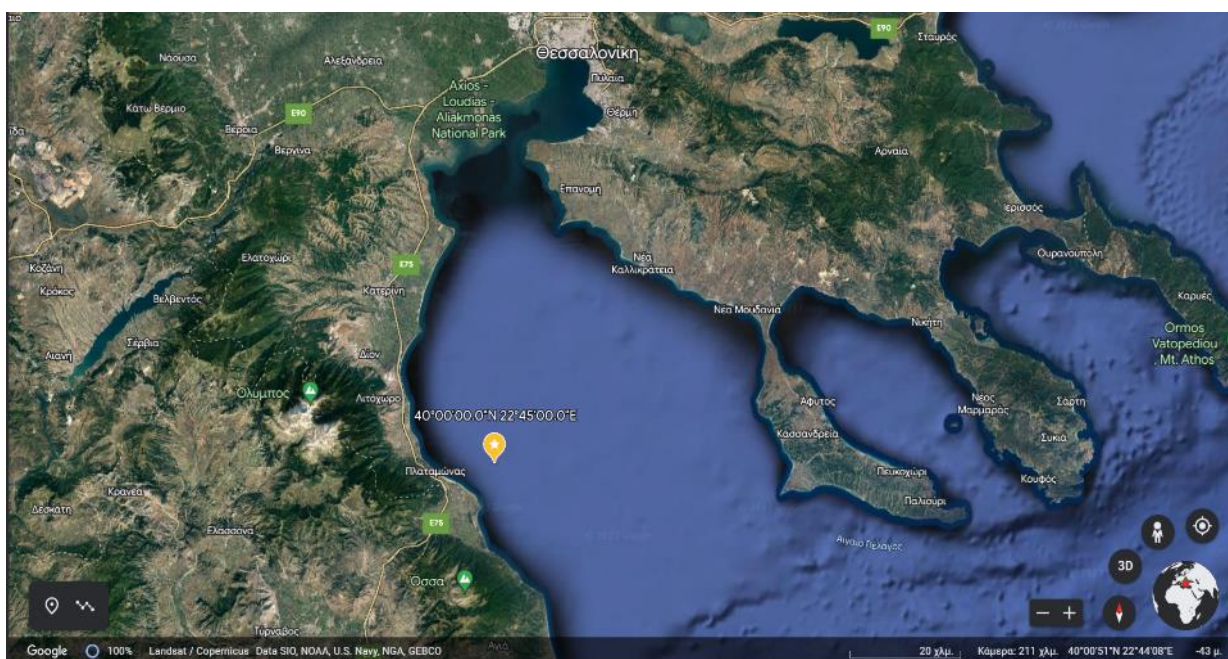
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΛΩΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΑΡΚΑ

### 6.1: Διάταξη και τοποθεσία

#### 6.1.1. :Περίπτωση ανοικτής θάλασσας

##### *6.1.1.1. Συντεταγμένες της τοποθεσίας*

Λαμβάνοντας υπόψιν τα προαναφερθέντα κριτήρια, η τελική τοποθεσία στην ανοικτή θάλασσα βρίσκεται σε συντεταγμένες 40.0 γεωγραφικό πλάτος, 22.75 γεωγραφικό μήκος και εξυπηρετεί πολλά κριτήρια της χωροθέτησης. Οι συγκεκριμένες συντεταγμένες προέκυψαν από τη συνεργασία μας με το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, όπου με τον αναλυτή ERA5 για το παγκόσμιο κλίμα και τον καιρό, μας δόθηκαν τα μετεωρολογικά μεγέθη για την τοποθεσία. Η τοποθεσία παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.1.



*Εικόνα 6.1 Επιλεγθείσα τοποθεσία των πλωτών φωτοβολταϊκών στην ανοικτή θάλασσα*

##### *6.1.1.2. Σχήμα και μέγεθος τοποθεσίας*

Εκτιμάται πως μια επιφάνεια 0.5 km<sup>2</sup> επιφάνειας φωτοβολταϊκών πάνελ θα αποδίδει ισχύ της τάξεως των 100 MW, έτσι εφόσον τα πάνελ θα τοποθετούνται με νότιο προσανατολισμό επιλέγεται ένα ορθογώνιο σχήμα.

Η ολική επιφάνεια της εγκατάστασης θα είναι αρκετά μεγαλύτερη από την επιφάνεια των συλλεκτών, καθώς θα συμπεριλαμβάνει την απόσταση μεταξύ των σειρών των φωτοβολταϊκών πλαισίων, την επιφάνεια των πλωτήρων και των συστημάτων πρόσδεσης και αγκύρωσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο υποεδάφιο 4.2.4, για την ολική πλωτή εγκατάσταση φωτοβολταϊκού πάρκου ονομαστικής ισχύος 100 MW απαιτούνται περίπου 1.7 km<sup>2</sup> θαλάσσιας επιφάνειας.

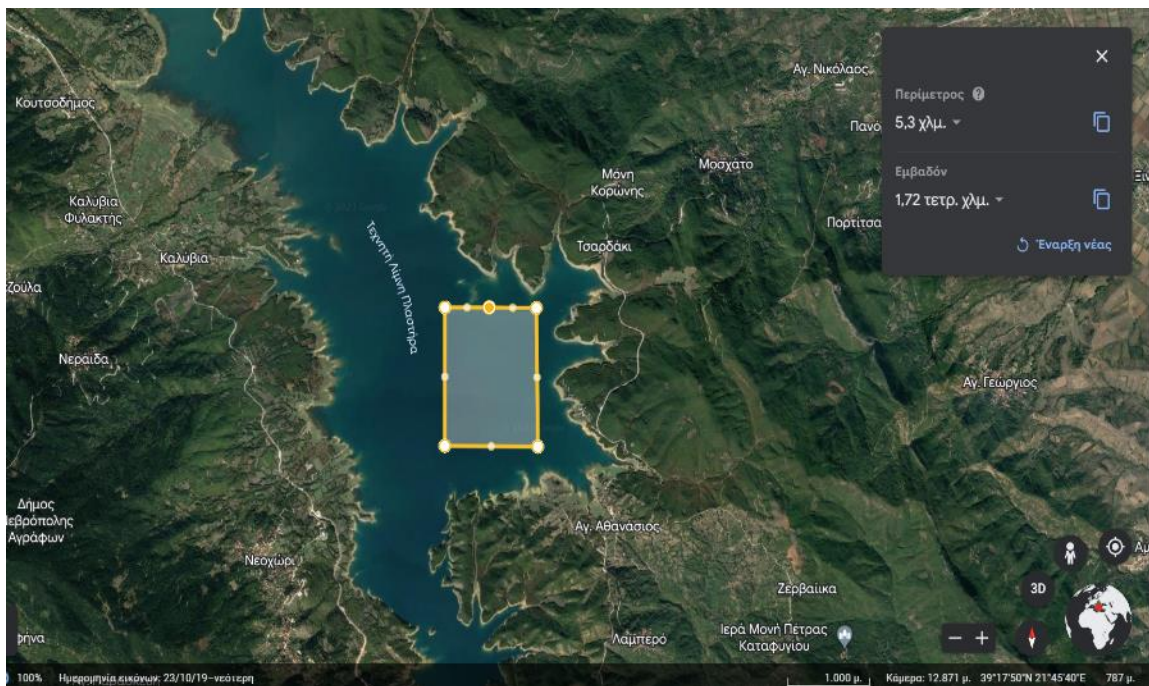
#### 6.1.2 : Περίπτωση λίμνης

Η τελική τοποθεσία στην λίμνη Πλαστήρα, βρίσκεται σε συντεταγμένες 40.0 γεωγραφικό πλάτος, 22.75 γεωγραφικό μήκος, αφού αυτή εξυπηρετεί πολλά κριτήρια της χωροθέτησης. Οι συγκεκριμένες συντεταγμένες

και μετεωρολογικά μεγέθη για την τοποθεσία παραχωρήθηκαν από τον Τομέα Υδρολογίας και συλλογής υδρολογικών μετρήσεων της ΔΕΗ. Οι μετρήσεις έγιναν στις συντεταγμένες που παρουσιάζονται στην τοποθεσία που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.2. Το μέγεθος/σχήμα της περιοχής της εγκατάστασης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.3 και το κέντρο της περιοχής έχει 39.29722 N και 21.76111 E.



Εικόνα 6.2 Συντεταγμένες της τοποθεσίας λήψης μετρήσεων για την περίπτωση της λίμνης



Εικόνα 6.3 Τοπικό σχήμα της περιοχής εγκατάστασης στην περίπτωση της λίμνης

## **6.2: Προσανατολισμός και κλίση της διάταξης**

### **6.2.1: Προσανατολισμός**

Και στις δύο περιπτώσεις επιλέγεται ο νότιος προσανατολισμός για τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Και οι δύο τοποθεσίες βρίσκονται στον Ελλαδικό χώρο, στο βόρειο ημισφαίριο οπότε για μέγιστη ηλιοφάνεια επιλέγεται ο Νότος ως κύριος προσανατολισμός των επιπέδων των φωτοβολταϊκών.

### **6.2.2: Κλίση**

Η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών έχει καίριο ρόλο στην παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού πάρκου. Όπως αναλύθηκε στο υποεδάφιο 1.3.4.2, η γωνία κλίσης των πλωτών φωτοβολταϊκών αποτελεί πολυπαραγοντικό ζήτημα, για αυτόν τον λόγο κρίθηκε ενδιαφέρουσα η μελέτη της ως έναν παράγοντα που καθορίζει την παραγωγή ενέργειας. Στο εδάφιο 7.8 αναλύονται οι παραμετροποιήσεις και τα μεγέθη που εξετάστηκαν λεπτομερώς.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PVsyst**

### **7.1. Γενικά**

Το λογισμικό PVsyst διαθέτει ενσωματωμένες βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων όπως Meteonorm, NREL NSRDB, PVGIS v.5 και SolarGIS. Στο λογισμικό είναι δυνατή η εισαγωγή μετρήσιμων καιρικών δεδομένων από τους χρήστες. Παρά του ότι αρκετές από τις βάσεις δεδομένων διαθέτουν δεδομένα για χερσαίες τοποθεσίες μόνο, στόχος της διπλωματικής ήταν η προσομοίωση των πλωτών φωτοβολταϊκών βάσει πραγματικών μετεωρολογικών δεδομένων. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών για την ανοικτή θάλασσα και από τη ΔΕΗ για την περίπτωση της λίμνης.

Τα απαραίτητα δεδομένα για μια τοποθεσία, ώστε να πραγματοποιηθεί προσομοίωση στο PVsyst, είναι η θερμοκρασία ξηρής σφαίρας περιβάλλοντος και η παγκόσμια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον μεγέθη που μπορούν να προσμετρηθούν στις προσομοιώσεις είναι η διάχυτη οριζόντια ακτινοβολία, η κάθετη ακτινοβολία, το επίπεδο ακτινοβολίας συστοιχίας και η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m.

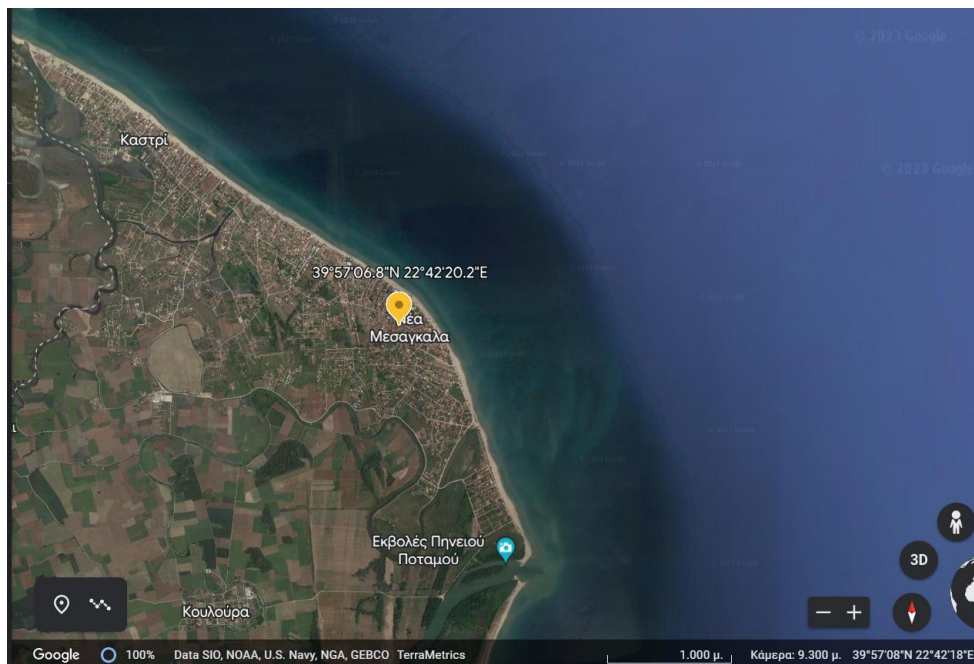
### **7.2. Τοποθεσίες στη στεριά για τη θάλασσα και την λίμνη**

Κύριος στόχος της εργασίας αποτελεί η μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς των πλωτών φωτοβολταϊκών σε σύγκριση με τα χερσαία. Για τον λόγο αυτό, δύο χερσαίες τοποθεσίες επιλέχθηκαν από τις περιοχές κοντά στη θάλασσα και στην λίμνη αντίστοιχα.

Αυτές οι τοποθεσίες αναφοράς έχουν θεωρητικά το ίδιο διαθέσιμο εμβαδόν επιφάνειας εγκατάστασης με τις περιοχές στο νερό. Οι χερσαίες και οι πλωτές περιοχές διαφέρουν ως προς τη θέση και τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν αρκετά μεγέθη, όπως τον συντελεστή απωλειών θερμότητας των συλλεκτών, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα ανέμου κτλ. Στο πρώτο σενάριο μελέτης οι χερσαίες τοποθεσίες χρησιμοποιήθηκαν συγκριτικά ως προς τις πλωτές εγκαταστάσεις.

#### **7.2.1. Χερσαία τοποθεσία εγκατάστασης στην περίπτωση της ανοικτής θάλασσας**

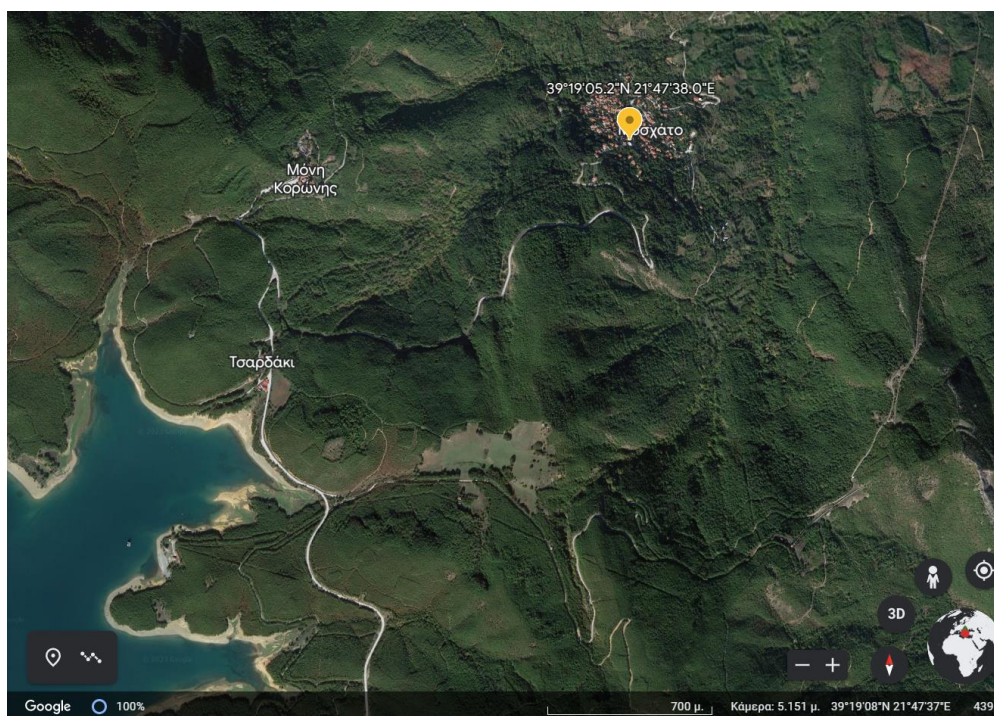
Η τοποθεσία στη στεριά επιλέχθηκε να είναι στον οικισμό των Νέων Μεσαγκαλών Λάρισας, στην περιφέρεια της Θεσσαλίας. Οι συντεταγμένες της τοποθεσίας είναι 39.9519 γεωγραφικό πλάτος και 22.7056 γεωγραφικό μήκος, σε υψόμετρο μόνο 4 m και απόσταση από τη θάλασσα ίση με 250 m. Η τοποθεσία παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.1.



Εικόνα 7.1 Χερσαία τοποθεσία στην περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

### 7.2.2. Χερσαία τοποθεσία εγκατάστασης στην περίπτωση της λίμνης

Η τοποθεσία στη στεριά επιλέχθηκε να είναι στον οικισμό των Νέων Μεσαγκαλών Λάρισας, στην περιφέρεια της Θεσσαλίας. Οι συντεταγμένες της τοποθεσίας είναι 39.3181 γεωγραφικό πλάτος και 21.7939 γεωγραφικό μήκος και σε υψόμετρο 472 m. Η απόσταση από τη θάλασσα είναι ίση με 2 km και η τοποθεσία παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.2.



Εικόνα 7.2 Χερσαία τοποθεσία στην περίπτωση της λίμνης

### 7.3. Αλλαγές στο λογισμικό και την προσομοίωση

Μέχρι στιγμής το λογισμικό PVsyst δε διαθέτει επιλογή για προσομοίωση πλωτών φωτοβολταϊκών. Έτσι, για να προσεγγιστεί η προσομοίωση τους χρειάζονται μερικές αλλαγές στα μεγέθη που εισάγονται στο λογισμικό. Μερικές δημοσιεύσεις έχουν προσπαθήσει να προσεγγίσουν αυτό το πρόβλημα, όπως για παράδειγμα η δημοσίευση των Oliveira-Pinto και Stokkermans, με στόχο στην εξαγωγή αποτελεσμάτων όσον αφορά την ρεαλιστική απόδοση των πλωτών φωτοβολταϊκών συγκριτικά με τη θεωρητική εκτίμηση της στη μέχρι τώρα βιβλιογραφία [21]. Όπως αναφέρεται στη δημοσίευση αυτή, οι παράγοντες που πρέπει να μεταβληθούν ώστε να προσεγγιστούν τα πλωτά φωτοβολταϊκά στο λογισμικό είναι το Albedo, ο συντελεστής απωλειών θερμότητας, τα εισαγόμενα μετεωρολογικά μεγέθη και οι λοιπές απώλειες. Αυτοί οι παράγοντες αναλύονται σε αυτό το εδάφιο.

#### 7.3.1. Albedo - Λευκαύγεια

Το μέγεθος του Albedo ορίζεται ως το κλάσμα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από μια επιφάνεια ως προς τη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία. Μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα των συνεισφορών των άμεσων και διάχυτων συνιστωσών της ακτινοβολίας. Ορίζεται από την Εξίσωση 7.1, όπου  $\theta_z$  είναι η γωνία αζιμούθιου,  $\alpha(\theta_z)$  η άμεση ανάκλαση,  $a_d$  η ανάκλαση του διάχυτου φωτός και  $D$  η σχετική συμβολή του διάχυτου φωτός στη συνολική ηλιακή ακτινοβολία [10].

$$\alpha(\theta_z) = (1 - D) \cdot a_b(\theta_z) + D \cdot a_d$$

*Εξίσωση 7.1*

Στα φωτοβολταϊκά, το albedo μεταφράζεται ως ο λόγος της συνολικής ακτινοβολίας που αντανακλάται από το έδαφος και στη συνέχεια λαμβάνεται από φωτοβολταϊκές μονάδες. Η τιμή του αυξάνεται για φωτεινότερες επιφάνειες και εξαρτάται σημαντικά από την τοποθεσία [21]. Στη βιβλιογραφία υπογραμμίζεται πως η φασματική απόκριση albedo είναι σημαντική καθώς επηρεάζει την απόκριση των φωτοβολταϊκών με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το ενεργό υλικό, όπως το άμορφο πυρίτιο a-Si ή κρυσταλλικό πυρίτιο c-Si [10]. Χαρακτηριστικά, το εύρος του albedo κυμαίνεται από 0.2 για επιφάνειες με γρασίδι ή άμμο έως και 0.6 ή και περισσότερο. Η προεπιλεγμένη τιμή albedo για το έδαφος στο PVsyst είναι 0.2.

Για το νερό, το albedo υπολογίζεται ως ο μέσος όρος δύο συνιστωσών. Η πρώτη εκφράζει την απ' ευθείας ακτινοβολία του Ήλιου και η δεύτερη προέρχεται από τη διάχυση του ηλιακού φωτός στην ατμόσφαιρα. Το ποσοστό της δεύτερης είναι περίπου ίσο με 17% του συνολικού albedo. Για την τιμή της λευκαύγειας του νερού παίζει ρόλο το ύψος του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα, με αίθριο καιρό χωρίς σύννεφα. Δεν εξαρτάται από το φάσμα και είναι πολύ χαμηλό, εκτός από τις υψηλές γωνίες πρόσπτωσης (νωρίς το πρωί ή αργά το απόγευμα) όταν η συλλογή ενέργειας μειώνεται από άλλες φυσικές επιπτώσεις. Επίσης, οι επιδράσεις των κυμάτων και του ανέμου στην επιφάνεια του νερού, αλλάζουν τη δομή της επιφάνειας και ως αποτέλεσμα αυξάνεται η ανακλαστικότητα της. Το albedo στο νερό για αζιμουθιακές γωνίες ( $\theta_z > 60^\circ$ ) είναι κατά μέσο όρο κάτω από 5% [10]. Αυτό συμφωνεί με τα ευρήματα των Liu κ.ά. όπου οι μετρήσεις τους για την λευκαύγεια στο νερό υπολογίστηκαν εντός του εύρους 5% με 7%, σε σύγκριση με 13% η οποία ήταν η τιμή αναφορά σε εφαρμογή σε ταράτσα σπιτιού [60]. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η τιμή του 5% για το albedo στις πλωτές εγκαταστάσεις, τιμή που τίθεται για το νερό στις προσομοιώσεις που έγιναν στο λογισμικό από τους Oliveira-Pinto και Stokkermans. Στις χειρσαίες τοποθεσίες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η προεπιλεγμένη τιμή του PVsyst, 0.2.

### 7.3.2. Συντελεστής απωλειών θερμότητας

Η ψύξη των πλωτών πλαισίων αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας. Ο συντελεστής απωλειών θερμότητας  $U$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] αποτελεί μέγεθος με καθοριστικής σημασίας. Ορίζεται από την Εξίσωση 7.2 [21], όπου  $T_{Mod}$  [K] και  $T_{Amb}$  [K] οι θερμοκρασίες λειτουργίας των πλαισίων και του αέρα της ατμόσφαιρας,  $G$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] η προσπίπτουσα ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά,  $\eta(T)$  ο βαθμός απόδοσης του πλαισίου συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας,  $\tau$  ο συντελεστής διάβασης και  $\alpha$  ο συντελεστής απορρόφησης.

$$U \times (T_{Mod} - T_{Amb}) = G \times \tau \cdot \alpha \times \left(1 - \frac{\eta(T)}{\tau \cdot \alpha}\right) \quad \text{Εξίσωση 7.2}$$

Μπορεί να οριστεί επίσης από την Εξίσωση 7.3, ως το άθροισμα δύο συντελεστών, ενός σταθερού μέρους και ενός παράγοντα που εξαρτάται από τον άνεμο. Στην Εξίσωση 7.3,  $U_c$  είναι ο ανεξάρτητος συντελεστής απωλειών θερμότητας,  $v$  η ταχύτητα ανέμου [ $\text{m}/\text{s}$ ] και  $U_v$  ο συντελεστής απωλειών θερμότητας που εξαρτάται από την ταχύτητα ανέμου [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}/\text{m}/\text{s}$ ].

$$U = U_c + v \cdot U_v \quad \text{Εξίσωση 7.3}$$

Σε πραγματική πλωτή διάταξη ισχύος 1 MWp στη Σιγκαπούρη, οι Liu κ.ά. παρακολούθησαν τις θερμοκρασίες των πλαισίων σε διάφορες τοποθεσίες (πλωτές και χερσαίες) μέσω αισθητήρων θερμοκρασίας τοποθετημένων στο πίσω μέρος των πλαισίων. Συμπέρασμα ήταν ότι όλα τα πλωτά πλαίσια ανέπτυξαν χαμηλότερες θερμοκρασίες συγκριτικά με τα πλαίσια στη στεριά και ότι ο τύπος της πλωτής τεχνολογίας έχει καθοριστικό ρόλο στην μείωση της θερμοκρασίας. Καταληκτικά παρατήρησαν ανομοιογένεια μεταξύ της θερμοκρασίας των πλωτών πλαισίων και υπογράμμισαν ότι η ψύξη τους εξαρτάται από την λεπτομερή θέση των πλαισίων στις πλατφόρμες [60].

Ως συνέχεια της αναφερθείσας δημοσίευσης καθορίζονται τρία είδη διατάξεων των πλαισίων:

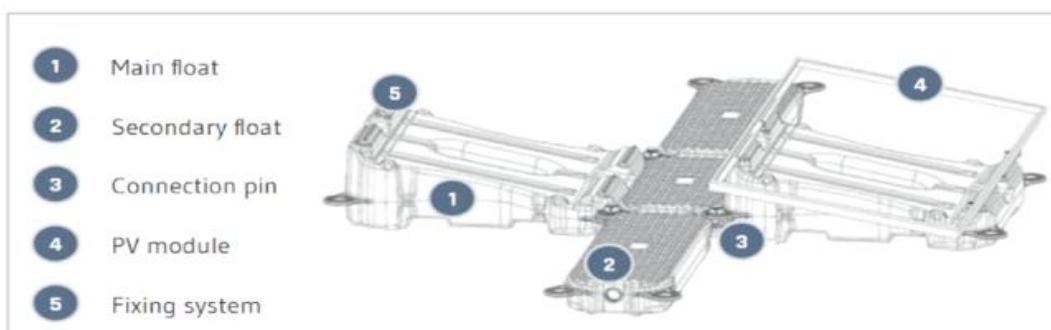
1. Ελεύθερη στάση: τα πλαίσια στηρίζονται ψηλά πάνω από το νερό με ελαχιστοποιημένο αποτύπωμα στο νερό, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την καλή συναγωγή με το περιβάλλον και κατ' επέκταση ψύξη των πλαισίων (βλ. Εικόνα 7.3)[21]. Σε αυτή τη διάταξη, η ροή του ανέμου εμποδίζεται μερικώς από την πλωτή κατασκευή και τα περιβάλλοντα πλαίσια. Η πίσω πλευρά των φωτοβολταϊκών εκτίθεται άμεσα στην επιφάνεια του νερού [23].
2. Μικρό αποτύπωμα στο νερό: τα πλαίσια τοποθετούνται πολύ κοντά στην επιφάνεια του νερού και η διάταξη τους στοχεύει στην ελάχιστη κάλυψη επιφάνειας νερού με αποτέλεσμα επίσης την καλή συναγωγή και ψύξη των πλαισίων (βλ. Εικόνα 7.4) [21]. Η ροή του αέρα σε αυτήν τη διάταξη, περιορίζεται λόγω της κλειστής δομής που βρίσκεται στον άξονα Ανατολής-Δύσης και ως αποτέλεσμα, η πίσω πλευρά των φωτοβολταϊκών δεν έχει άμεση έκθεση στην επιφάνεια του νερού [23].
3. Μεγάλο αποτύπωμα στο νερό: τα πλαίσια τοποθετούνται έτσι ώστε η επιφάνεια του νερού να είναι μερικώς καλυμμένη από τους πλωτήρες (βλ. Εικόνα 7.5)



Εικόνα 7.3 Διάταξη πλωτών φωτοβολταϊκών σε ελεύθερη στάση [21]

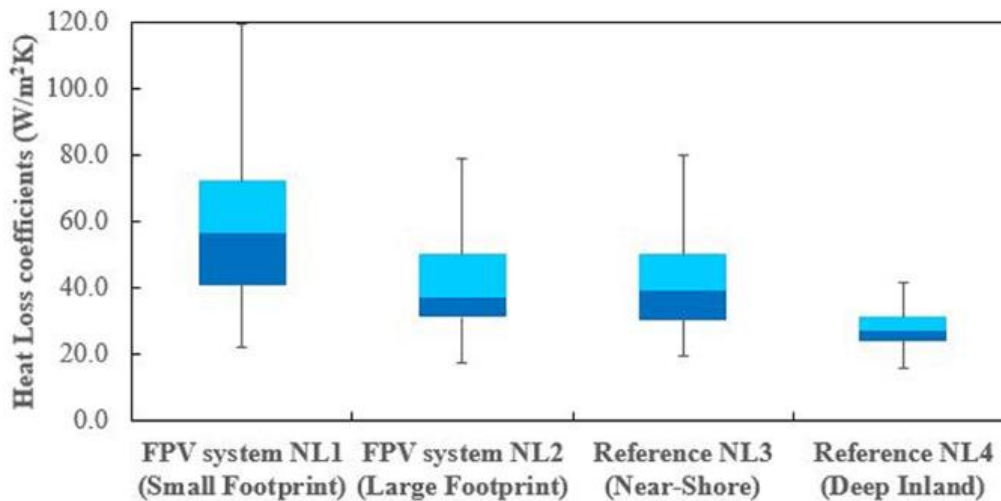


Εικόνα 7.4 Διάταξη πλωτών φωτοβολταϊκών με μικρό αποτύπωμα στο νερό [21]



Εικόνα 7.5 Διάταξη πλωτών φωτοβολταϊκών με μεγάλο αποτύπωμα στο νερό [21]

Στη δημοσίευση των Dörenkämper κ.ά. γίνονται μετρήσεις σε τέσσερις διατάξεις στην Ολλανδία, σε δύο πλωτές και δύο χερσαίες εγκαταστάσεις. Από τις πλωτές, η μια χαρακτηρίζεται από μικρό αποτύπωμα στο νερό και η δεύτερη από μεγάλο αποτύπωμα, ενώ οι χερσαίες βρίσκονται η μια σε κοντινή απόσταση 250 m και η άλλη στην ενδοχώρα, σε απόσταση τουλάχιστον 100 km. Στη δημοσίευση δίνεται έμφαση στις μετρούμενες τιμές του συντελεστή  $U$  για τα είδη των διατάξεων αυτών, οι οποίες παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 7.1. Επέκταση του διαγράμματος είναι ο Πίνακας 7.1 με τις μέσες τιμές του  $U$  για κάθε είδος διάταξης.



Διάγραμμα 7.1 Κατανομές του συντελεστή απωλειών θερμότητας  $U$  για τέσσερις διαφορετικούς τύπους διατάξεων φωτοβολταϊκών (πλωτών και χερσαίων)

Πίνακας 7.1 Μέσες τιμές του συντελεστή απωλειών θερμότητας  $U$  για τέσσερις διαφορετικούς τύπους διατάξεων φωτοβολταϊκών (πλωτών και χερσαίων)

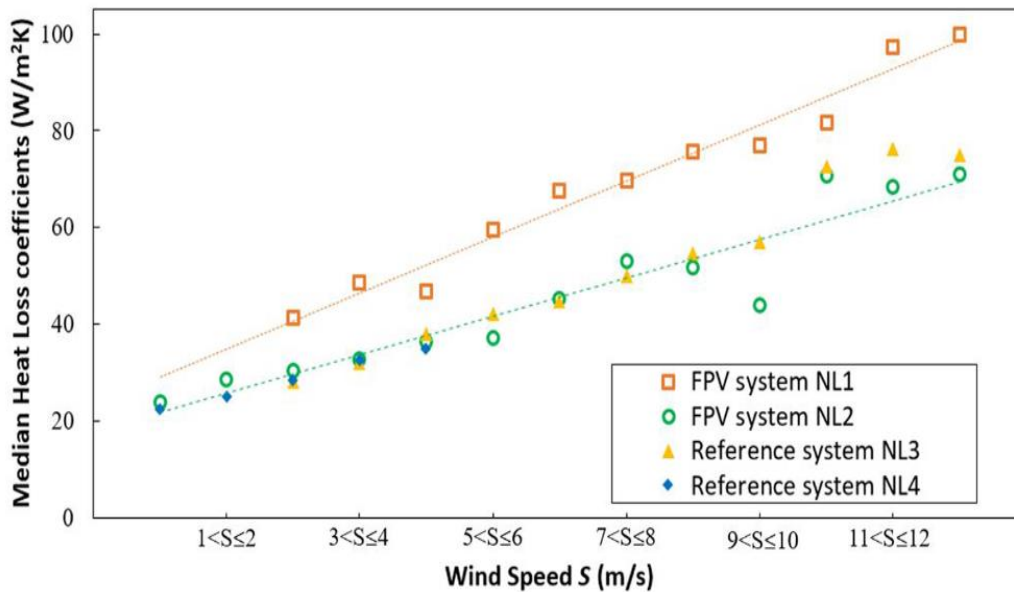
FPV system NL1 (small footprint and open structure)	FPV system NL2 (large footprint and closed structure)	Reference NL3 (land based, near- shore)	Reference NL4 (deep inland)
57 W/m <sup>2</sup> K	37 W/m <sup>2</sup> K	39 W/m <sup>2</sup> K	27 W/m <sup>2</sup> K

Χαρακτηριστικά, συμπεραίνεται ότι η διάταξη με μικρό αποτύπωμα στο νερό έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή θερμικών απωλειών  $U$  και άρα φύγεται καλύτερα, ενώ η πλωτή διάταξη με μεγάλο αποτύπωμα έχει πολύ παρόμοια συμπεριφορά με τη χερσαία εγκατάσταση που βρίσκεται πολύ κοντά στο νερό. Όπως αναφέρουν και οι ερευνητές, η διαφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στους διαφορετικούς σχεδιασμούς συστημάτων σχετικά με το αποτύπωμα στο νερό και το άνοιγμα της κατασκευής [23]. Το χερσαίο σύστημα βαθιά στη στεριά παρουσιάζει τον μικρότερο συντελεστή  $U$  και αυτό πιθανώς οφείλεται στην έκθεσή του σε λιγότερο ανεμώδες περιβάλλον.

### Παράγοντας $U_v$

Για τον παράγοντα του συντελεστή απωλειών θερμότητας, που εξαρτάται από την ταχύτητα ανέμου, σημειώνονται τα πειραματικά σημεία στο Διάγραμμα 7.2 για τις τέσσερις διατάξεις. Τα δεδομένα έχουν προσαρμοστεί μέσω γραμμικής παλινδρόμησης, όπου γίνεται ελαχιστοποίηση του αθροίσματος τετραγωνικών υπολοίπων. Παρατηρείται ότι το ανοικτό σύστημα πλωτών πλαισίων (NL1) έχει υψηλότερες τιμές συντελεστή  $U_v$  συγκριτικά με τις υπόλοιπες διατάξεις.

Ο Πίνακας 7.2 παρουσιάζει αυτά τα συμπεράσματα. Από τον ίδιο πίνακα παρατηρείται επίσης ότι σε αντίθεση με τον υπολογισμό της ενιαίας τιμής  $U$ , το σύστημα αναφοράς στην ενδοχώρα δεν έχει τη χαμηλότερη τιμή  $U$ . Πιθανή αιτία αποτελεί το γεγονός ότι οι συνθήκες ανέμου στο εσωτερικό της στεριάς είναι λιγότερο έντονες από εκείνες κοντά στην ακτή, όπως παρατηρείται και στο Διάγραμμα 7.11 και Διάγραμμα 7.15 για τις τοποθεσίες της εργασίας.



Διάγραμμα 7.2 Κατανομές του συντελεστή  $U_v$  για τις διάφορες διατάξεις συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου [23]

Πίνακας 7.2 Συντελεστής  $U_v$  για διάφορα συστήματα [23]

System	Heat loss coefficient		Regression analysis
	$U_c$ , W/m²K	$U_v$ , W/m²K/m/s	
1. FPV system NL1	24.4	6.5	$R^2 = 0.57$
2. FPV system NL2	25.2	3.7	$R^2 = 0.28$
3. Reference system NL3	13.0	5.4	$R^2 = 0.52$
4. Reference system NL4	18.6	4.4	$R^2 = 0.36$

Για τον υπολογισμό της αναμενόμενης παραγωγής ενέργειας στα τέσσερα συστήματα έγιναν προσομοιώσεις στο PVsyst, για τις περιπτώσεις εισαγωγής του συντελεστή απωλειών θερμότητας ως μια μεμονωμένη τιμή  $U$  και ως το άθροισμα μιας σταθερής τιμής  $U_c$  και μιας εξαρτώμενης από τον άνεμο  $U_v$ . Αυτές οι προσομοιώσεις, ανεξαρτήτως μεθόδου, ανέδειξαν ελαφρώς καλύτερη απόδοση του πλωτού συστήματος NL1 συγκριτικά με τις άλλες διατάξεις. Η μέθοδος μιας μοναδικής τιμής  $U$  δείχνει ότι ένα πλωτό σύστημα μπορεί να αποδώσει 3% υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με το χερσαίο σύστημα αναφοράς NL4 της ενδοχώρας. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τις διαφορετικές συνθήκες ανέμου, και μετά τη διόρθωση του  $U$ , το πλωτό σύστημα NL1 παρουσιάζει αύξηση απόδοσης περίπου ίση με 1.3% συγκριτικά με το κοντινό χερσαίο σύστημα αναφοράς NL3 και περίπου 1% σε σύγκριση με το ενδοχώριο σύστημα NL4 (Πίνακας 7.3).

Πίνακας 7.3 Εκτιμώμενη ετήσια ειδική παραγωγή ενέργειας των διαφορετικών συστημάτων για διαφορετικές τιμές εισόδου του συντελεστή απωλειών  $U$  [23]

Method	Specific Annual Yield NL1 (kWh/kWp)	Specific Annual Yield NL2 (kWh/kWp)	Specific Annual Yield NL3 (kWh/kWp)	Specific Annual Yield NL4 (kWh/kWp)
Single U-Value	1110	1094	1096	1078
$U = U_c + v \cdot U_v$	1108	1100	1094	1097

Οι τιμές του  $U$  για τις πλωτές διατάξεις που αναφέρθηκαν σε αυτό το υποεδάφιο, χρησιμοποιήθηκαν στο 4<sup>ο</sup> σενάριο προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας, όπου έγινε και σύγκριση της ανάλυσης του συντελεστή απωλειών σε δύο παράγοντες σε σχέση με τη χρήση μιας ολικής τιμής.

### 7.3.3. Μετεωρολογικά μεγέθη

Τα μετεωρολογικά μεγέθη αποτελούν τη βάση των προσομοιώσεων. Έτσι και αυτά πρέπει να μεταβληθούν ώστε να γίνει η προσομοίωση πλωτών φωτοβολταϊκών. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η παγκόσμια οριζόντια και διάχυτη ακτινοβολία χρησιμοποιούνται στην είσοδο της προσομοίωσης. Συνήθως η θερμοκρασία κοντά στις επιφάνειες του νερού έχει λιγότερο έντονες διακυμάνσεις από ότι στην ξηρά. Στη συνέχεια, αναλύονται λεπτομερώς τα μετεωρολογικά μεγέθη εισόδου, η μέθοδος επιλογής και η δημιουργία των αρχείων τους.

### 7.3.4. Απώλειες «αναντιστοιχίας» - Mismatch losses

Τα πλωτά φωτοβολταϊκά χαρακτηρίζονται από δυναμική κίνηση των πλωτήρων. Οι απώλειες «αναντιστοιχίας» οφείλονται στο ότι το ανομοιόμορφο ηλιακό φως που προσπίπτει στις μονάδες στην ίδια συστοιχία πιθανώς να προκαλέσει διαφορές στην τάση και το ρεύμα μεταξύ των συνδεδεμένων μονάδων. Αυτές οι απώλειες παρατηρούνται όταν τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία μιας συστοιχίας έχουν διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε κάποια στιγμή, τα οποία συνήθως προκαλούνται από ορισμένες σκιές. Στη μέχρι τώρα βιβλιογραφία δεν υπάρχει δείκτης για αυτές τις απώλειες για τα πλωτά φωτοβολταϊκά. Στη μελέτη των Oliveira-Pinto και Stokkermans που αφορά εσωτερικά γλυκά υδάτινα σώματα, θεωρήθηκε ότι η δυναμική φύση και των δύο πλωτών κατασκευών είναι ομαλή, επομένως δόθηκε τιμή 1% για αυτές τις απώλειες [21]. Αυτή η τιμή επιλέχθηκε και στις δύο πλωτές διατάξεις της εργασίας. Για τις χερσαίες τοποθεσίες επιλέχθηκε η προεπιλεγμένη τιμή του PVsyst, 2%.

### 7.3.5. Απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης – Soiling losses

Οι απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης υπολογίζονται ως η απώλεια ακτινοβολίας κατά την προσομοίωση ενός συστήματος. Οφείλονται σε συσσώρευση βρωμιάς και η επίδρασή τους στην απόδοση του συστήματος είναι μια αβεβαιότητα που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον του συστήματος. Σε μεσαία βροχερά κλίματα (π.χ. Ευρώπη) και σε κατοικημένες ζώνες, το ποσοστό των απωλειών είναι συνήθως χαμηλό και σχεδόν αμελητέο (τιμή κάτω από 1%). Η ρύπανση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από διάφορες παραμέτρους, όπως τη βροχόπτωση στην τοποθεσία, τις περιβαλλοντικές δραστηριότητες (γεωργία, βιομηχανία, κ.λπ.), τη κλίση των συλλεκτών και τη συχνότητα καθαρισμού του συστήματος. Τα περιττώματα πτηνών αντιπροσωπεύουν ένα σοβαρό πρόβλημα, καθώς συνήθως δεν απομακρύνονται από βροχοπτώσεις με τον αντίκτυπό τους να αναφέρεται ως σχετικά μικρός (λιγότερο από 2%). Επιπρόσθετα, οι απώλειες κατακαθίσεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις βροχοπτώσεις και τις χιονοπτώσεις, όπου το χιόνι ακουμπάει στις μονάδες για μεγάλες χρονικές περιόδους [21]. Τα πλαίσια με μεγάλο αριθμό κατακαθίσεων θα λειτουργήσουν ως υπό σκιά και σε ακραίες περιπτώσεις αυτό μπορεί να οδηγήσει σε θερμά σημεία της



επιφάνειας τους, που απότομα προκαλούν την υποβάθμιση της μονάδας. Ενώ συνήθως το ποσοστό των απωλειών αυτών είναι μικρότερο του 4%, σε ερήμους μπορεί να φτάσει το 15%. Τέλος, σε μια περίπτωση στο Μαρόκο, εκτιμάται πως η απώλεια παραγωγής ενέργειας λόγω της επίδρασης της ρύπανσης λαμβάνει τιμή έως και 2 Wh/Wp [61].

Στις εγκαταστάσεις πλωτών φωτοβολταϊκών, αναμένεται η προσέλευση βιολογικής ζώης που θα επηρεάσει τις δραστηριότητες συντήρησης των πλωτών μονάδων και θα προκαλέσει σημαντική μείωση της παραγωγής ενέργειας. Η μέχρι στιγμής βιβλιογραφία σχετικά με τις απώλειες για τα συστήματα FPV παρουσιάζει ελλείμματα, γι' αυτό και οι απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης στην παρούσα εργασία ορίστηκαν ως 2% [21]. Για τις χερσαίες τοποθεσίες, λήφθηκε η προτεινόμενη από το λογισμικό τιμή 3%.

## **7.4.Μετεωρολογικά μεγέθη στις πλωτές τοποθεσίες**

### **7.4.1. Δεδομένα ανοικτής θάλασσας**

Για την περιοχή της ανοικτής θάλασσας, τα δεδομένα των μετεωρολογικών μεγεθών, τα οποία αναλύθηκαν προηγουμένως, λήφθηκαν από το αριθμητικό μοντέλο reanalysis ERA5. Σε συνεργασία με το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και των εξωτερικών του συνεργατών, κατέστη δυνατό να βρεθούν τα δεδομένα για το χρονικό διάστημα 10 χρόνων, 2013-2022. Τα δεδομένα που μας δόθηκαν από το μοντέλο ήταν η θερμοκρασία [°C], η ταχύτητα του ανέμου στα 10 m ύψος σε [m/s], η διεύθυνση του ανέμου σε μοίρες, η παγκόσμια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία σε [W/m<sup>2</sup>] και η διάχυτη οριζόντια ακτινοβολία επίσης σε [W/m<sup>2</sup>].

#### ***Αριθμητικό μοντέλο μετεωρολογικών δεδομένων***

Το αριθμητικό μοντέλο reanalysis ERA5 αποτελεί μέρος της βάσης δεδομένων Copernicus του διαστημικού προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το οποίο προσφέρει πληροφορίες που αντλούνται από τη δορυφορική παρατήρηση της γης και επιτόπου (μη διαστημικά) δεδομένα. Η διαχείριση αυτού του εργαλείου ανήκει στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή και υλοποιείται σε συνεργασία με τα κράτη μέλη, τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT), το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων (ECMWF), τους Οργανισμούς της ΕΕ και τη Mercator Océan. Συνδυασμός από παγκόσμια δεδομένα από δορυφόρους και επίγεια, αερομεταφερόμενα και θαλάσσια συστήματα μετρήσεων παρέχουν ανοιχτά προσβάσιμες πληροφορίες σε υπηρεσίες, δημόσιες αρχές και διεθνείς οργανισμούς [62].

Το ERA5 είναι η πέμπτη γενιά ECMWF για εκ νέου ανάλυση του παγκόσμιου κλίματος και του καιρού. Διατίθενται δεδομένα από το 1940 και έπειτα και είναι συνδυασμός από μοντέλα με παρατηρήσεις από όλο τον κόσμο βασισμένα στους νόμους της φυσικής. Η αφομοίωση των δεδομένων, βασίζεται στη μέθοδο που χρησιμοποιείται από τα αριθμητικά κέντρα πρόβλεψης καιρού. Κάθε 12 ώρες μια προηγούμενη πρόβλεψη συνδυάζεται με πρόσφατα διαθέσιμες παρατηρήσεις, ώστε να παραχθεί μια νέα καλύτερη εκτίμηση του την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Αυτή ονομάζεται ανάλυση, από την οποία εκδίδεται μια ενημερωμένη και βελτιωμένη πρόγνωση. Η εκ νέου ανάλυση λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, αλλά με μειωμένη ανάλυση για να επιτρέψει την παροχή ενός συνόλου δεδομένων που εκτείνεται σε βάθος δεκαετιών. Το ERA5 παρέχει ωριαίες εκτιμήσεις για μεγάλο αριθμό ποσοτήτων ατμοσφαιρικών, κυμάτων ωκεανού και εδάφους.

Το μοντέλο ενημερώνεται καθημερινά και το σύνολο των δεδομένων που παρουσιάζεται στη βάση δεδομένων του, είναι ένα ανανεωμένο υποσύνολο του πλήρους συνόλου δεδομένων ERA5 σε εγγενή ανάλυση. Τα δεδομένα ορίζονται σε ένα κανονικό πλέγμα lat-lon 0.25° για την ανάλυση και 0.5° για την εκτίμηση της αβεβαιότητας (0.5° και 1° αντίστοιχα για τα κύματα του ωκεανού). Υπάρχουν τέσσερα κύρια υποσύνολα: ωριαία και μηνιαία δεδομένα σε επίπεδα πίεσης (ανώτερα πεδία αέρα) και σε μεμονωμένα επίπεδα (ατμοσφαιρικές, ποσότητες ωκεανών κυμάτων και επιφάνειας γης) [63].

## 7.4.2. Δεδομένα λίμνης

Για την περιοχή της λίμνης, τα δεδομένα των μετεωρολογικών μεγεθών, πάρθηκαν από τα αρχεία καταγραφής μετρήσεων του Τομέα Υδρολογίας και συλλογής υδρολογικών μετρήσεων της ΔΕΗ. Για την λίμνη Πλαστήρα, η ΔΕΗ διαθέτει σημείο υδροληψίας με συντεταγμένες που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 6 και μας δόθηκαν οι καθημερινές μετρήσεις για τα έτη 2003-2012. Τα μεγέθη ήταν η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία ημέρας [°C], η περιγραφή της νέφωσης και η ταχύτητα του ανέμου (ως μέτρηση από ανεμόμετρο). Επίσης, διαθέσιμες ήταν οι μετρήσεις της βροχόπτωσης αλλά το μέγεθος αυτό δεν ήταν στις δεκτές εισόδους του λογισμικού οπότε δε χρησιμοποιήθηκε.

### Μέτρηση ανεμόμετρου και μετατροπή

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας ανέμου, οι ενδείξεις του ανεμομέτρου διαβάζονται και υπολογίζονται ανά ζεύγη. Γίνεται μια καταγραφή της ένδειξης την ημέρα. Μεταξύ λοιπόν δύο συνεχόμενων μετρήσεων, εάν η δεύτερη (χρονικά μεταγενέστερη) ένδειξη είναι μεγαλύτερη σε τιμή της πρώτης (προγενέστερη χρονικά) τότε η διαφορά τους διαιρείται με το 24 και το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η ταχύτητα της δεύτερης ημέρας σε [km/hr]. Εάν είναι όμως μικρότερη, τότε στη διαφορά των δύο μετρήσεων προστίθεται το 10000 και έπειτα διαιρείται με το 24 ώστε να προκύψει η ταχύτητα σε [km/hr]. Τέλος, αφού έχουν υπολογιστεί όλες οι ταχύτητες, αυτές μετατρέπονται σε [m/s]. Στην Εξίσωση 7.4, παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού, όπου Α η μέτρηση του ανεμόμετρου την προγενέστερη και η Β την μεταγενέστερη ημέρα.

$$\text{Ταχύτητα της ημέρας} \left[ \frac{\text{km}}{\text{hr}} \right] = \begin{cases} \frac{10000 + B - A}{24}, & A > B \\ \frac{B - A}{24}, & B > A \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 7.4}$$

## 7.5. Μορφή και δημιουργία μετεωρολογικών αρχείων

### *Γενικά*

Για τα μετεωρολογικά δεδομένα που εισάγονται από τον κάθε χρήστη, το λογισμικό δέχεται τιμές για μέσους όρους μηνών ή ωριαίες τιμές για ένα έτος. Έτσι, για την πρώτη περίπτωση, μπορούν να εισαχθούν οι μέσοι όροι των μεγεθών όπου υπάρχουν μηνιαία δεδομένα, ενώ στη δεύτερη, εάν υπάρχουν ακριβείς τιμές για περίοδο 10 συνεχόμενων, ετών τότε το εργαλείο της δημιουργίας του Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους είναι διαθέσιμο.

### 7.5.1. Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος (TMY)

#### *Ορισμός του TMY*

Τα τυπικά σύνολα δεδομένων μετεωρολογικού έτους (TMY) αντιπροσωπεύουν τιμές ωριαίων δεδομένων καιρού 1 έτους (8760 ωρών) που εξάγονται από μακροπρόθεσμα (τουλάχιστον 10 χρόνια) αρχεία δεδομένων. Τα σύνολα δεδομένων TMY είναι δημοφιλή για σχεδιασμό κτηρίων αναφορικά με τη μοντελοποίηση συστημάτων ΑΠΕ, επειδή παρέχουν ένα συνοπτικό σύνολο δεδομένων από το οποίο μπορούν να αναπτυχθούν εκτιμήσεις απόδοσης του συστήματος. Τα σύνολα δεδομένων TMY δημιουργούνται με τον προσδιορισμό των «τυπικών» μετεωρολογικών μηνών από μια διαδικασία στάθμισης διαφόρων καιρικών παραμέτρων και στη συνέχεια συνένωση των μηνών για να σχηματιστεί ένα τυπικό έτος. Σημαντικό είναι ότι δεν παρέχουν πληροφορίες για ακραία γεγονότα και δεν αντιπροσωπεύουν απαραίτητα πραγματικές συνθήκες σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή [64].

## Γενικά

Το εργαλείο του TMY απαιτεί ωριαίες συνεχόμενες μετρήσεις (χωρίς κενά) για την ίδια τοποθεσία, από την ίδια πηγή, για περίοδο 10 συνεχόμενων ετών. Διαθέτει έτοιμα στατιστικά μοντέλα τα οποία είναι τα εξής:

1. ISO norm 15927-4
2. Sandia method
3. NSRDB για TMY3
4. NSRDB για TGY (Τυπικό παγκόσμιο έτος οριζόντιας ακτινοβολίας)
5. NSRDB για TDY (Τυπικό έτος κανονικής άμεσης ακτινοβολίας)
6. Προσαρμοσμένο TMY με βάρη καθορισμένα από το χρήστη και πρόσθετες επιλογές

Ο Πίνακας 7.4 περιέχει τους στατιστικούς παράγοντες στάθμισης για το κάθε μετεωρολογικό μέγεθος και το εκάστοτε μοντέλο TMY.

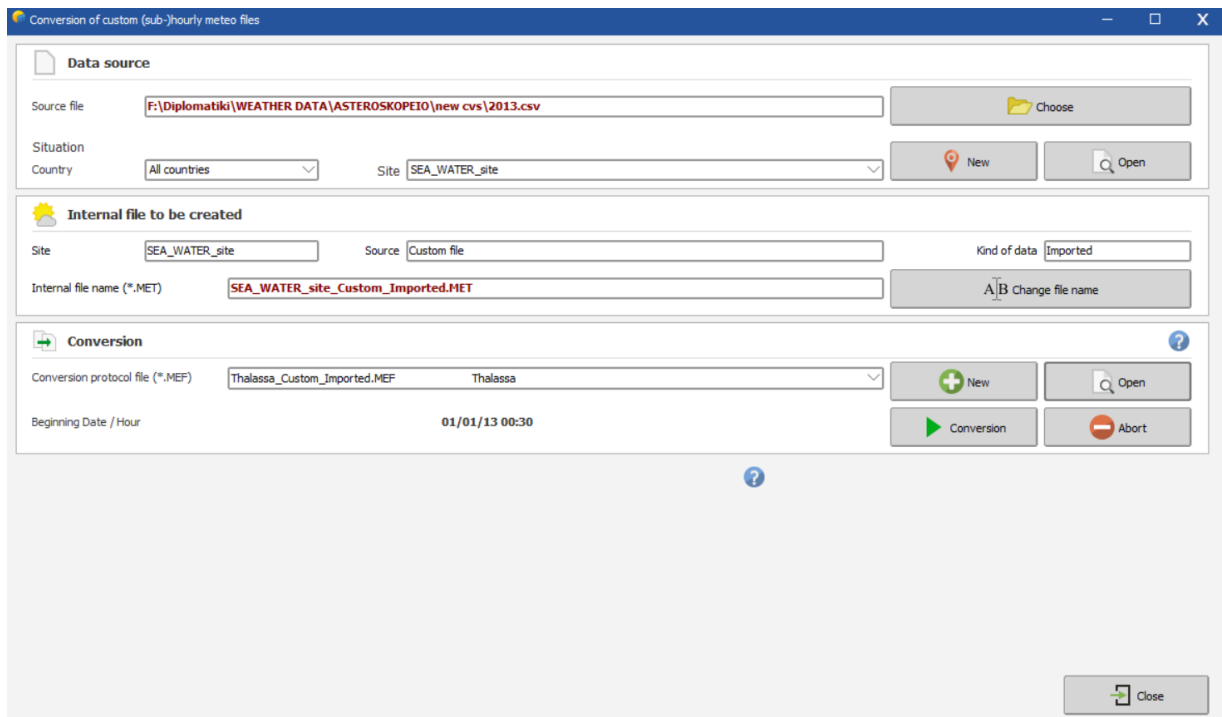
Πίνακας 7.4 Στατιστικοί παράγοντες στάθμισης μετεωρολογικών μεγεθών για κάθε μοντέλο TMY [65]

### Variables weight for the FS statistics

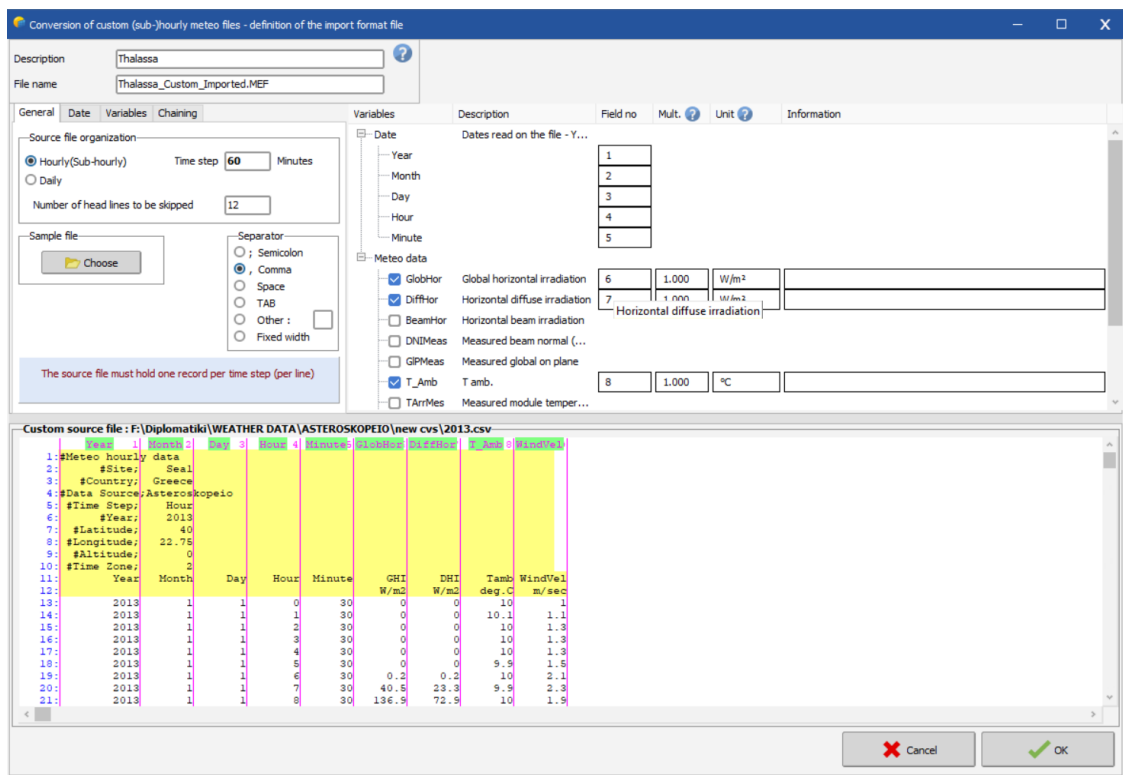
Index of daily values	ISO 15927-4_2005	Sandia Method	NSRDB TMY
Maximum Dry Bulb Temperature	0	1/24	1/20
Minimum Dry Bulb Temperature	0	1/24	1/20
Mean Dry Bulb Temperature	1	2/24	2/20
Maximum Dew Point Temperature	0	1/24	1/20
Minimum Dew Point Temperature	0	1/24	1/20
Mean Dew Point Temperature	0	2/24	2/20
Maximum Wind Velocity	0	2/24	1/20
Mean Wind Velocity	0*	2/24	1/20
Mean Relative Humidity	1	0	0
Global horizontal irradiance	1	12/24	5/20
Direct normal irradiance	0	0	5/20

## Εισαγωγή των meteo αρχείων

Για τη δημιουργία ενός TMY μετεωρολογικού αρχείου χρειάζονται τα 10 μετεωρολογικά αρχεία (.MET files) για κάθε έτος μετρήσεων. Αυτά, εισάγονται το κάθε ένα ξεχωριστά μέσω του εργαλείου Custom file του Database στο PVsyst (Εικόνα 7.6). Σε αυτό το εργαλείο, το κάθε αρχείο εισέρχεται σε μορφή .cvs και μέσω ενός μετατροπέα ο οποίος «διαβάζει» κάθε στήλη και δεδομένο (Εικόνα 7.7), αναγνωρίζεται και μετατρέπεται σε .MET αρχείο το οποίο στη συνέχεια αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων του λογισμικού.



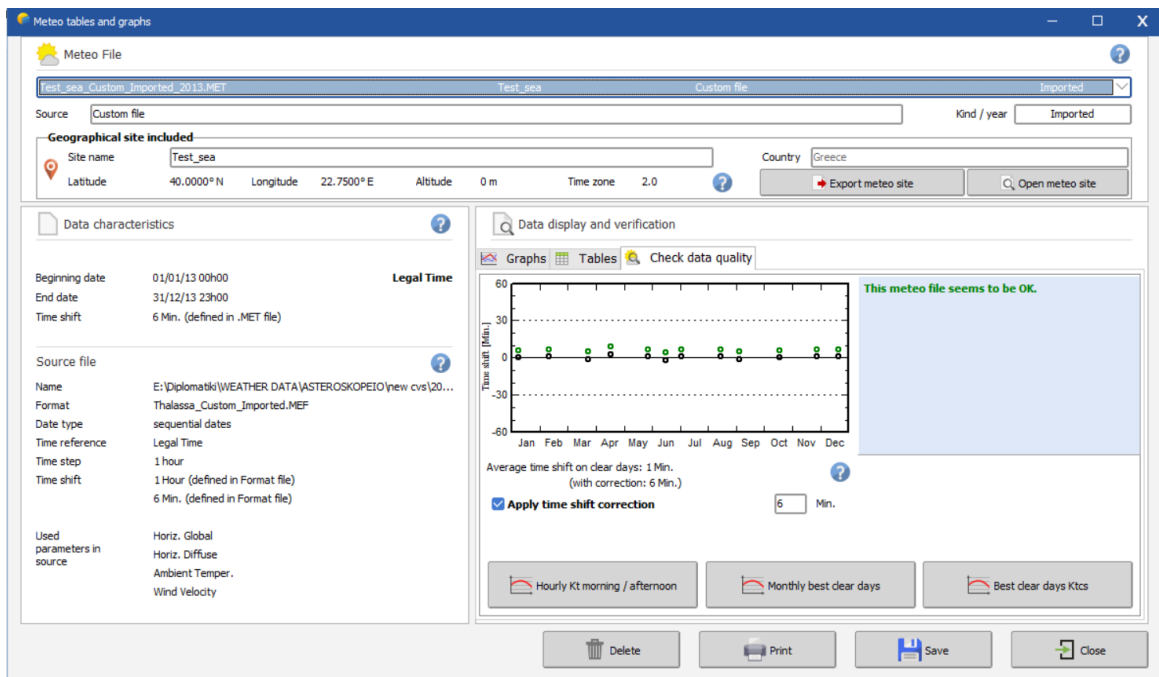
Εικόνα 7.6 Εργαλείο custom meteo file import στο PVsyst



Εικόνα 7.7 Μετατροπή και αναγνώριση δεδομένων μετεωρολογικών αρχείων στο λογισμικό

Κάθε .MET αρχείο, για κάθε έτος, έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.8. Για τα αρχεία που εισάγονται από τον χρήστη είναι πιθανώς απαραίτητη η εφαρμογή μιας χρονικής μετατόπισης (Time shift) ώστε τα δεδομένα να συμπίπτουν χρονικά με τον χρονικό βήμα της προσομοίωσης του λογισμικού. Για να

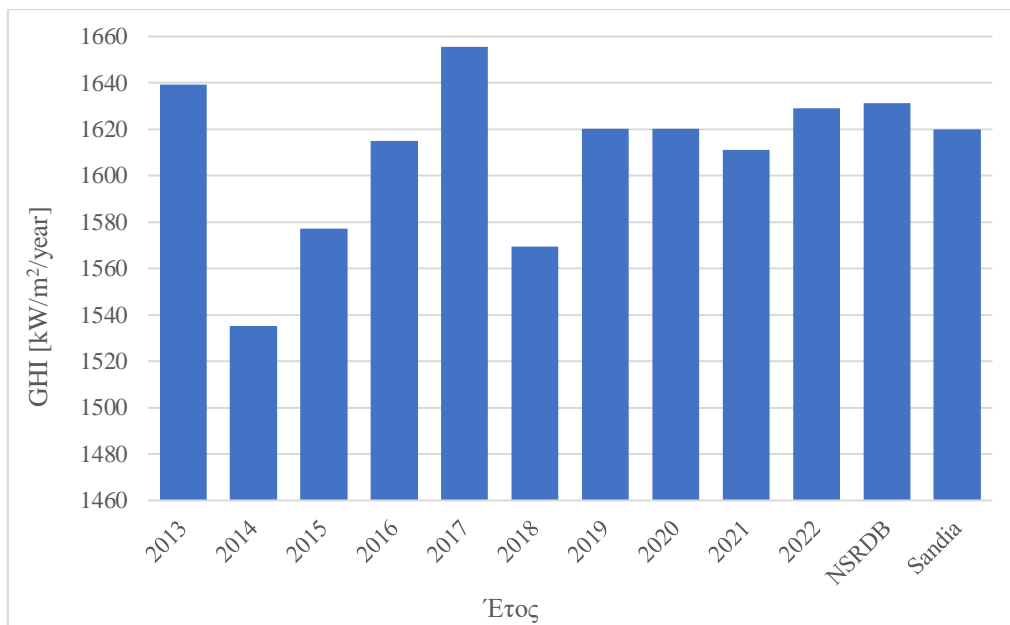
αναγνωριστούν και να χρησιμοποιηθούν τα μετεωρολογικά αρχεία θα πρέπει να φέρουν το μήνυμα «This meteo file seems to be OK».



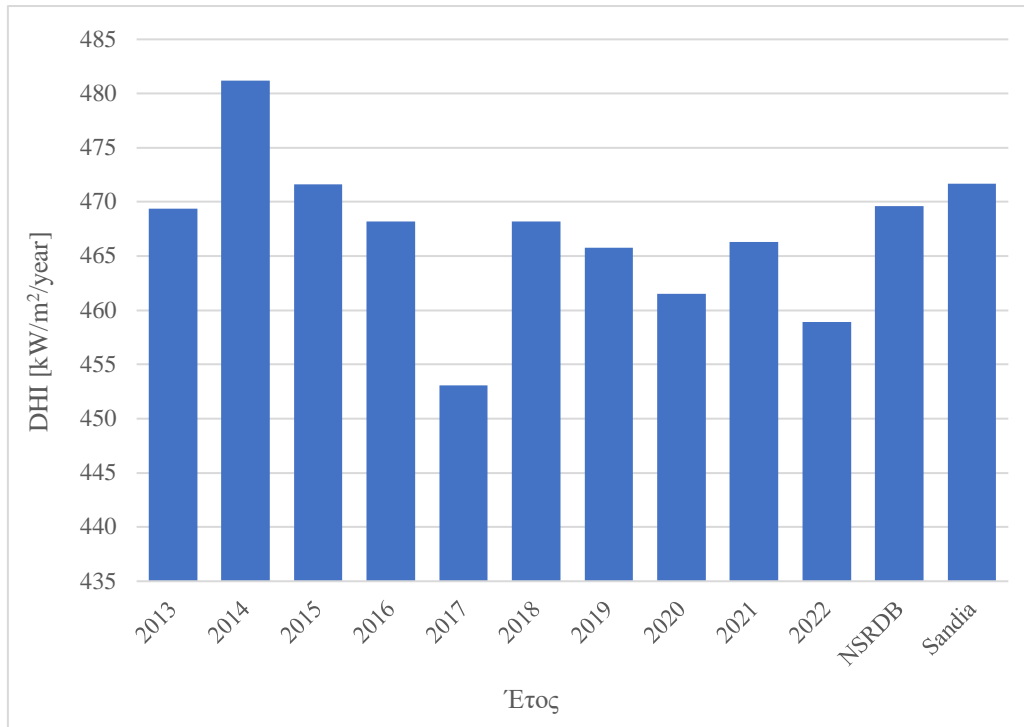
Εικόνα 7.8 Μορφή .MET αρχείου στο PVsyst

### Σύγκριση μοντέλων

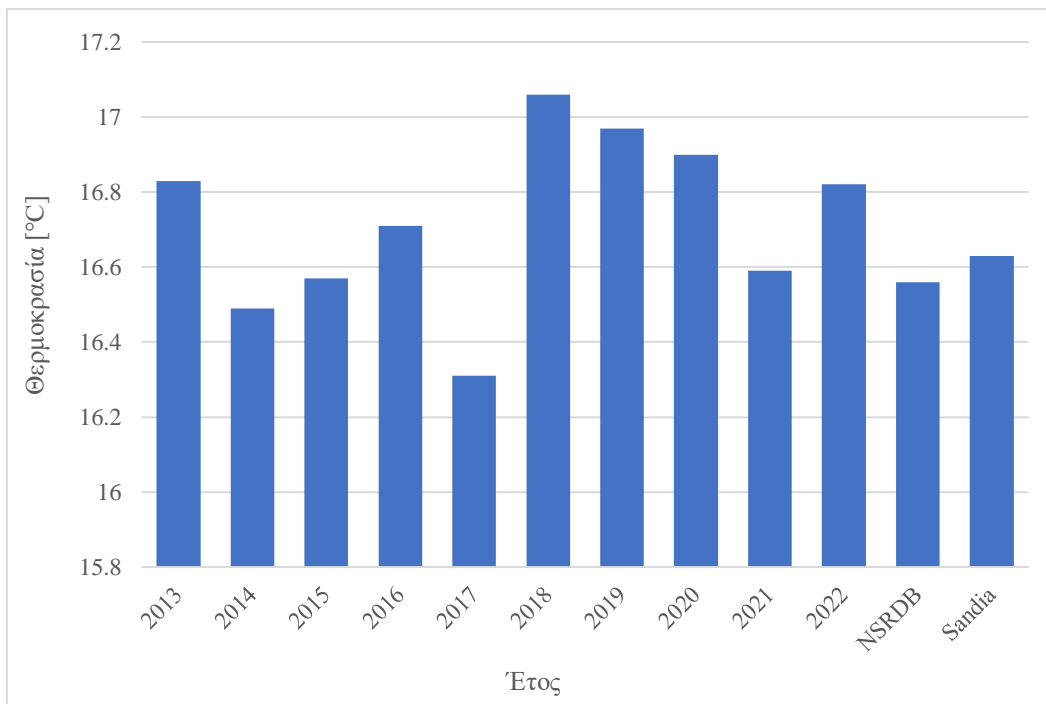
Στο Διάγραμμα 7.3 έως το Διάγραμμα 7.6 παρουσιάζονται οι μηνιαίες τιμές των μεγεθών GHI, DHI, θερμοκρασία και Wind\_vel για κάθε ένα από τα 10 έτη του TMY στην ανοικτή θάλασσα και τα δύο τυπικά έτη των μοντέλων NSRDB και Sandia.



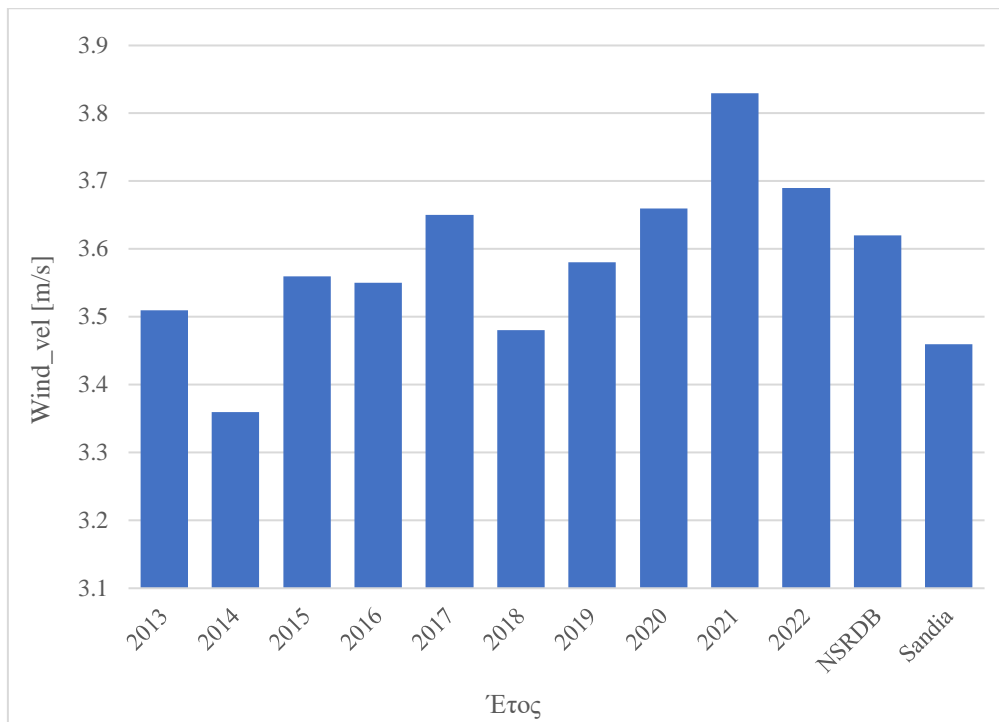
Διάγραμμα 7.3 GHI για τα 10 έτη στη θάλασσα και τα δύο TMY μοντέλων NSRDB και Sandia



Διάγραμμα 7.4 DHI για τα 10 έτη στη θάλασσα και τα δύο TMY μοντέλων NSRDB και Sandia



Διάγραμμα 7.5 Θερμοκρασία για τα 10 έτη στη θάλασσα και τα δύο TMY μοντέλων NSRDB και Sandia



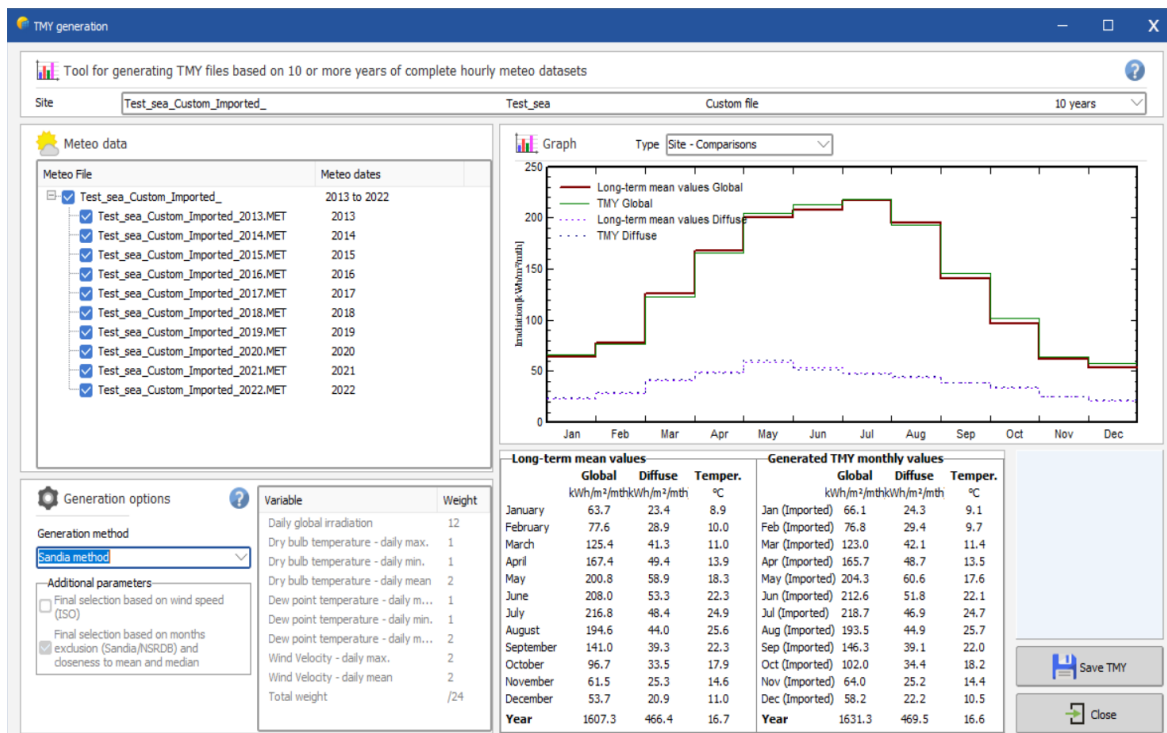
Διάγραμμα 7.6 Ταχύτητα ανέμου για τα 10 έτη στη θάλασσα και τα δύο TMY μοντέλων NSRDB και Sandia

### **Μοντέλο TMY**

Εφόσον όλα τα αρχεία για τα 10 συνεχόμενα έτη καταχωρηθούν και αποθηκευτούν στη βάση δεδομένων του λογισμικού, έπειτα είναι δυνατή η δημιουργία TMY. Το μοντέλο το οποίο επιλέχθηκε είναι το Sandia method το οποίο αναφέρεται και στην μελέτη των Πισιμάνη κ.ά. [66].

Η μέθοδος Sandia είναι μια εμπειρική προσέγγιση που επιλέγει μεμονωμένους μήνες από διαφορετικά έτη που περιλαμβάνονται στην περίοδο καταγραφής. Εάν για παράδειγμα το σύνολο δεδομένων περιέχει δεδομένα 30 ετών, εξετάζονται και οι 30 μήνες του Ιανουαρίου και επιλέγεται αυτός που κρίνεται από τον αλγόριθμο ως πιο τυπικός για να συμπεριληφθεί στο TMY. Οι υπόλοιποι μήνες του έτους αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο και στη συνέχεια οι 12 επιλεγμένοι τυπικοί μήνες συνενώνονται για να σχηματίσουν ένα πλήρες έτος. Για τους 12 τυπικούς μήνες που επιλέχθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά στοιχεία που προσδιορίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη πέντε μεγέθη. Αυτά είναι η παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία, η άμεση κανονική ακτινοβολία, η θερμοκρασία ξηρού βολβού, η θερμοκρασία σημείου δρόσου και η ταχύτητα ανέμου. Αυτά θεωρούνται τα πιο σημαντικά για την προσομοίωση συστημάτων μετατροπής ηλιακής ενέργειας και κτιριακών συστημάτων [67].

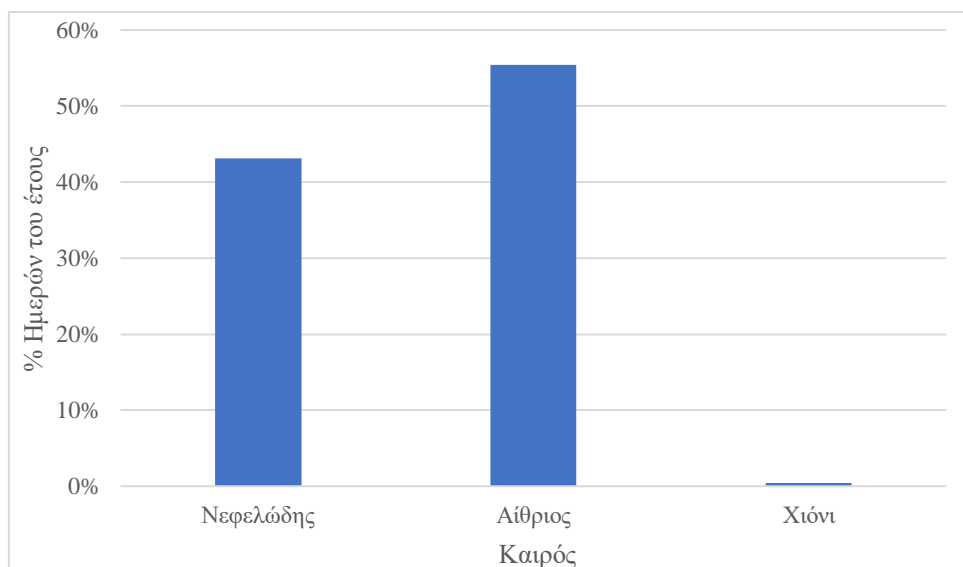
Το συγκεκριμένο μοντέλο επιλέγει έναν τυπικό μήνα με βάση εννέα ημερήσιους δείκτες αποτελούμενοι από τις μέγιστες, ελάχιστες και μέσες θερμοκρασίες ξηρού βολβού και σημείου δρόσου, τη μέγιστη και τη μέση ταχύτητα ανέμου και τη συνολική παγκόσμια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία. Η τελική επιλογή ενός μήνα περιλαμβάνει την εξέταση του μηνιαίου μέσου όρου και τη διατήρηση των καιρικών προτύπων. Λόγω της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου σε πολλές ανανεώσιμες πηγές, όπως τα φωτοβολταϊκά, επιλέχθηκε για να γίνει η ανάλυση των καιρικών δεδομένων για την ανοικτή θάλασσα. Οι στατιστικές βαρύτητες των μεγεθών όσο και οι τελικές μηνιαίες τιμές για το τυπικό μετεωρολογικό έτος παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.9.



Εικόνα 7.9 TMY για την περίπτωση της θάλασσας

### 7.5.2. Μετεωρολογικά δεδομένα της λίμνης στο λογισμικό

Τα μετρήσιμα δεδομένα της λίμνης είχαν ημερήσιες τιμές και έτσι η σύνθεση TMY δεν ήταν δυνατή. Σε αυτό το υποεδάφιο παρουσιάζονται μερικά χαρακτηριστικά καιρικά στοιχεία της τοποθεσίας της λίμνης. Το Διάγραμμα 7.7 παρουσιάζει τις περιγραφές του καιρού όπως αυτές καταγράφονταν ημερησίως ως ποσοστά των καταγεγραμμένων ημερών. Παρατηρείται ότι η περίπτωση χιονιού είναι η λιγότερο πιθανή και ο αίθριος καιρός είναι ο επικρατέστερος στην τοποθεσία. Ο Πίνακας 7.5 παρουσιάζει τις μέσες τιμές για τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία (και τον υπολογισμό της μέσης τιμής) και την ταχύτητα ανέμου των μετρήσιμων τιμών της τοποθεσίας.



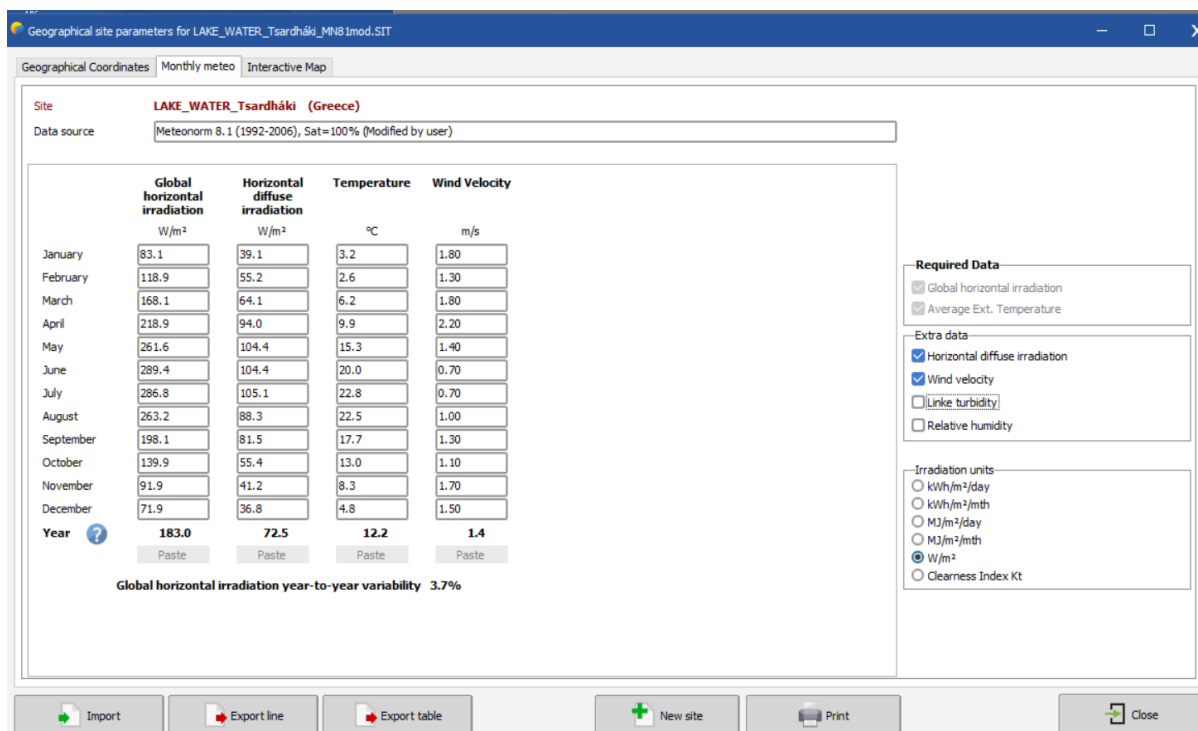
Διάγραμμα 7.7 Περιγραφή καιρού για τα έτη 2003-2012 για την λίμνη



Πίνακας 7.5 Μέσες τιμές μέγιστων, ελαχίστων της θερμοκρασίας και μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου για την τοποθεσία της λίμνης

Μήνας	Ελάχιστη θερμοκρασία [°C]	Μέγιστη θερμοκρασία [°C]	Μέση θερμοκρασία [°C]	Ταχύτητα ανέμου [m/sec]
Ιανουάριος	0.0	6.4	3.2	1.8
Φεβρουάριος	-0.4	5.6	2.6	1.3
Μάρτιος	2.3	10.2	6.2	1.8
Απρίλιος	5.8	14.1	9.9	2.2
Μάιος	10.5	20.1	15.3	1.4
Ιούνιος	14.7	25.2	20.0	0.7
Ιούλιος	16.8	28.9	22.8	0.7
Αύγουστος	16.7	28.3	22.5	1.0
Σεπτέμβριος	12.8	22.6	17.7	1.3
Οκτώβριος	8.9	17.0	13.0	1.1
Νοέμβριος	4.6	11.9	8.3	1.7
Δεκέμβριος	1.6	8.0	4.8	1.5

Για το μετεωρολογικό αρχείο της πλωτής τοποθεσίας της λίμνης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα στις δύο τελευταίες στήλες που παρουσιάζει ο Πίνακας 7.5 και οι τιμές των ακτινοβολιών GHI, DHI όπως αυτές καταγράφονται από τη βάση καιρικών δεδομένων της Meteornorm. Αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.10 το οποίο αποτελεί το αρχείο .MET για το αντίστοιχο .SIT αρχείο της τοποθεσίας.



Εικόνα 7.10 Μετεωρολογικά δεδομένα για την τοποθεσία της λίμνης

## 7.6. Μετεωρολογικά αρχεία των χερσαίων τοποθεσιών

Για τις χερσαίες τοποθεσίες στα Νέα Μεσάγκαλα και στο Μοσχάτο αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκαν τα έτοιμα δεδομένα για τις τοποθεσίες αυτές από τη βάση δεδομένων Meteornorm. Τα .MET αρχεία για τις δύο τοποθεσίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.11 και Εικόνα 7.12 αντίστοιχα. Για να καταχωρηθούν τα δεδομένα αυτά, σε πρώτο στάδιο εισάγονται οι συντεταγμένες κάθε τοποθεσίας, επιλέγεται η επιθυμητή βάση δεδομένων και αυτομάτως αναγνωρίζεται η τοποθεσία και εισάγονται τα μετεωρολογικά μεγέθη στο λογισμικό. Τέλος, τα αρχεία αποθηκεύονται μαζί με το αρχείο της τοποθεσίας, δηλαδή το .SIT αρχείο.

	Global horizontal irradiation W/m <sup>2</sup>	Horizontal diffuse irradiation W/m <sup>2</sup>	Temperature °C	Wind Velocity m/s
January	81.0	33.7	4.6	1.50
February	109.8	59.2	6.6	1.90
March	161.2	76.9	10.1	1.90
April	215.0	99.4	13.9	1.89
May	267.2	110.6	19.7	1.90
June	293.2	111.2	24.7	2.10
July	291.5	96.4	27.6	2.19
August	262.0	104.4	27.1	1.99
September	193.9	87.8	21.3	1.80
October	128.9	67.7	16.2	1.40
November	81.0	43.9	10.9	1.10
December	65.7	35.8	6.0	1.30
<b>Year</b>	<b>179.6</b>	<b>77.3</b>	<b>15.7</b>	<b>1.7</b>

Global horizontal irradiation year-to-year variability 3.7%

Εικόνα 7.11 Μετεωρολογικό αρχείο για την τοποθεσία των Νέων Μεσαγαλών

	Global horizontal irradiation W/m <sup>2</sup>	Horizontal diffuse irradiation W/m <sup>2</sup>	Temperature °C	Wind Velocity m/s
January	84.0	32.9	5.8	2.10
February	118.7	56.1	7.2	2.39
March	168.7	79.8	10.9	2.49
April	219.0	98.6	14.4	2.60
May	262.0	114.8	20.0	2.59
June	289.0	107.9	24.6	2.80
July	287.1	105.4	27.7	2.80
August	263.8	97.0	27.2	2.70
September	197.9	75.3	21.4	2.31
October	139.9	64.4	16.6	1.80
November	91.9	43.2	11.3	1.59
December	71.9	35.2	6.8	1.90
<b>Year</b>	<b>183.2</b>	<b>76.0</b>	<b>16.2</b>	<b>2.3</b>

Global horizontal irradiation year-to-year variability 3.8%

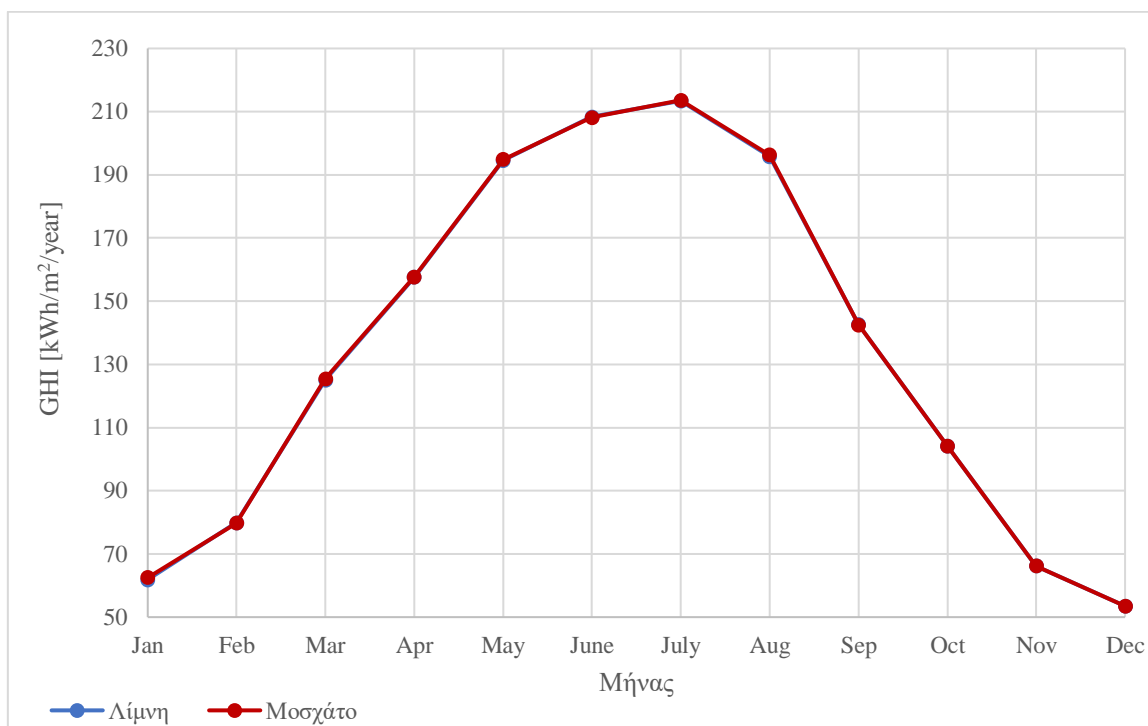
Εικόνα 7.12 Μετεωρολογικό αρχείο για την τοποθεσία του Μοσχάτου

## 7.7. Σύγκριση μετεωρολογικών δεδομένων μεταξύ των χερσαίων και πλωτών τοποθεσιών

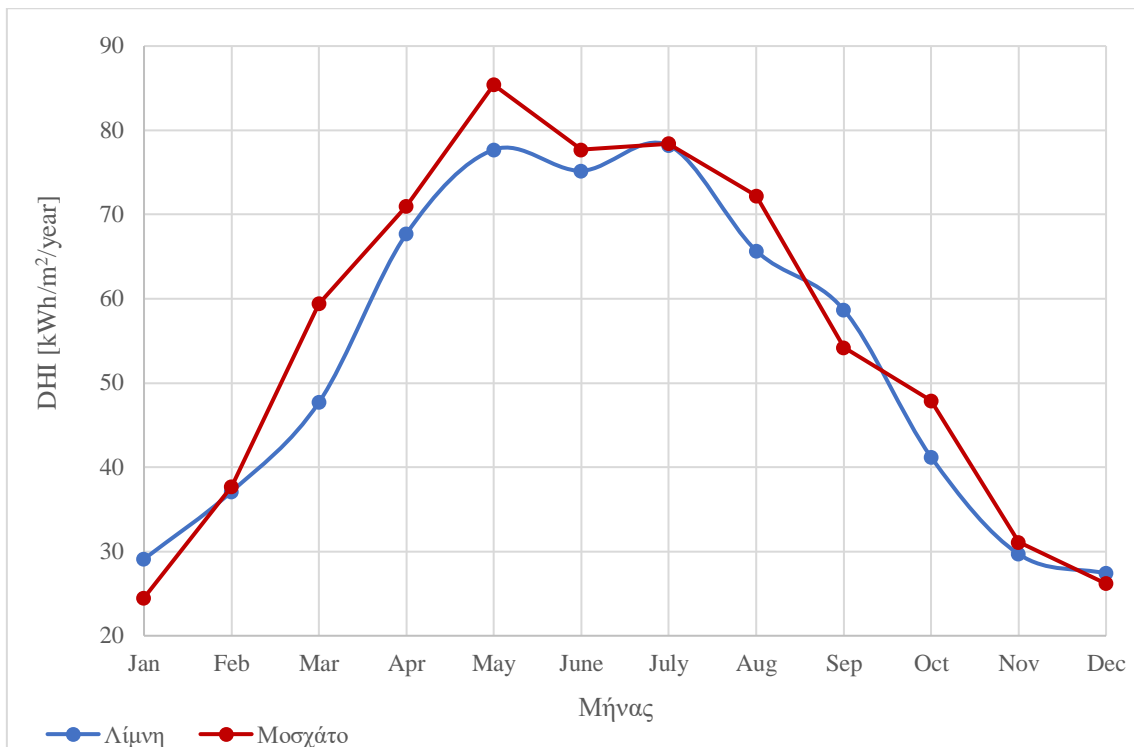
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι ετήσιες καμπύλες των μεγεθών της παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, της διάχυτης οριζόντιας ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου για τις δύο πλωτές τοποθεσίες και τις αντίστοιχες χερσαίες.

### 7.7.1. Τοποθεσία λίμνης και Μοσχάτο

Από το Διάγραμμα 7.8 παρατηρείται ότι οι κατανομές της ακτινοβολίας στις δύο τοποθεσίες ταυτίζονται πλήρως. Αυτό δεν ισχύει όμως στο Διάγραμμα 7.9 της διάχυτης ακτινοβολίας, όπου παρόλο που οι κατανομές έχουν παρόμοιες μορφές εντούτοις δεν ταυτίζονται και διαφέρουν σημαντικά. Παρατηρείται στην πλειονότητα των μηνών μεγαλύτερη διάχυτη ακτινοβολία στο Μοσχάτο συγκριτικά με τη λίμνη, λόγω του χαμηλότερου albedo στο νερό.

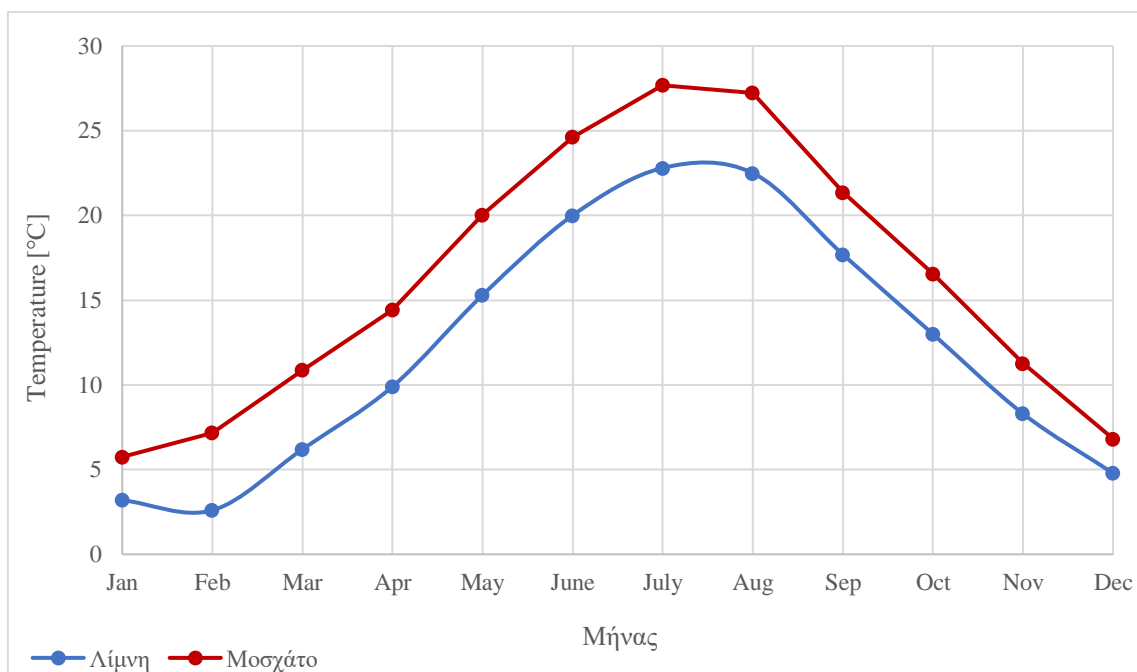


Διάγραμμα 7.8 Κατανομές της GHI για το τυπικό έτος στην λίμνη και στο Μοσχάτο



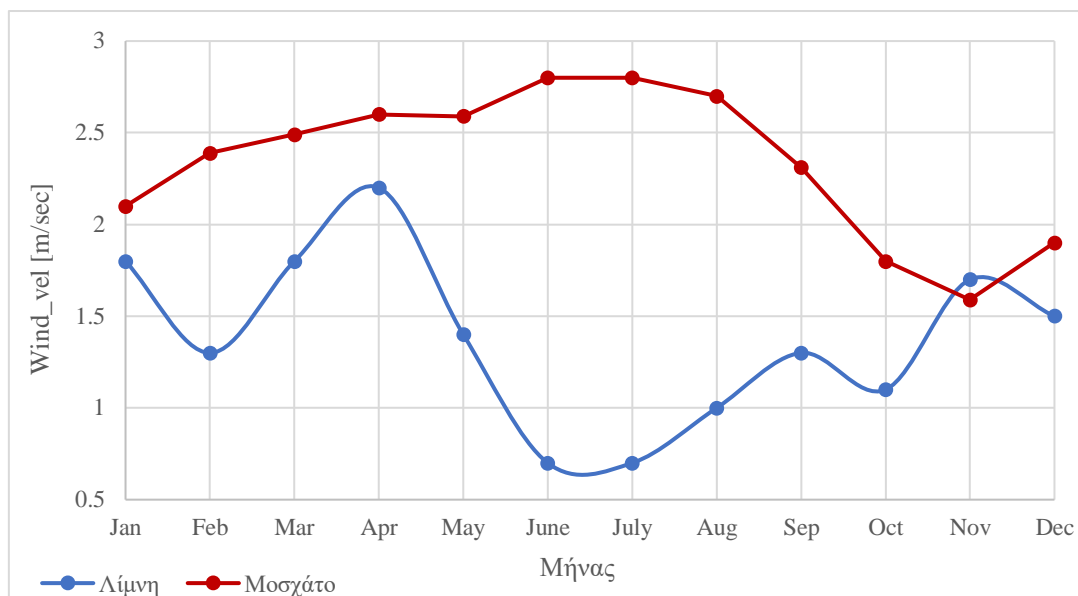
Διάγραμμα 7.9 Κατανομές της DHI για το τυπικό έτος στην λίμνη και στο Μοσχάτο

Σχετικά με τις θερμοκρασίες του περιβάλλοντος (βλ. Διάγραμμα 7.10), οι θερμοκρασίες των δύο περιοχών έχουν παρόμοια διακύμανση, με την τοποθεσία του Μοσχάτου να εμφανίζει υψηλότερες θερμοκρασίες περίπου διαφοράς 5°C.



Διάγραμμα 7.10 Κατανομές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το τυπικό έτος στην λίμνη και στο Μοσχάτο

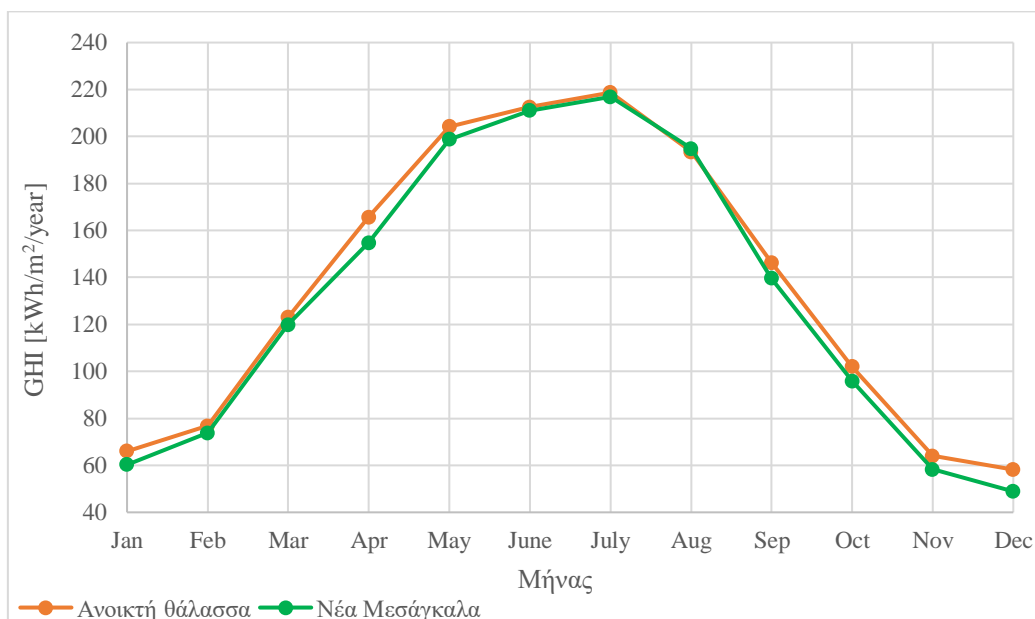
Η κατανομή του ανέμου στην λίμνη παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7.11. Αυτό δεν ισχύει τόσο για την τοποθεσία στο Μοσχάτο όπου η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται από Ιανουάριο έως Ιούλιο ενώ μετά ακολουθεί καθοδική πορεία μέχρι που ξανά αυξάνεται τον Δεκέμβριο.



Διάγραμμα 7.11 Κατανομές της ταχύτητας ανέμου για το τυπικό έτος στην λίμνη και στο Μοσχάτο

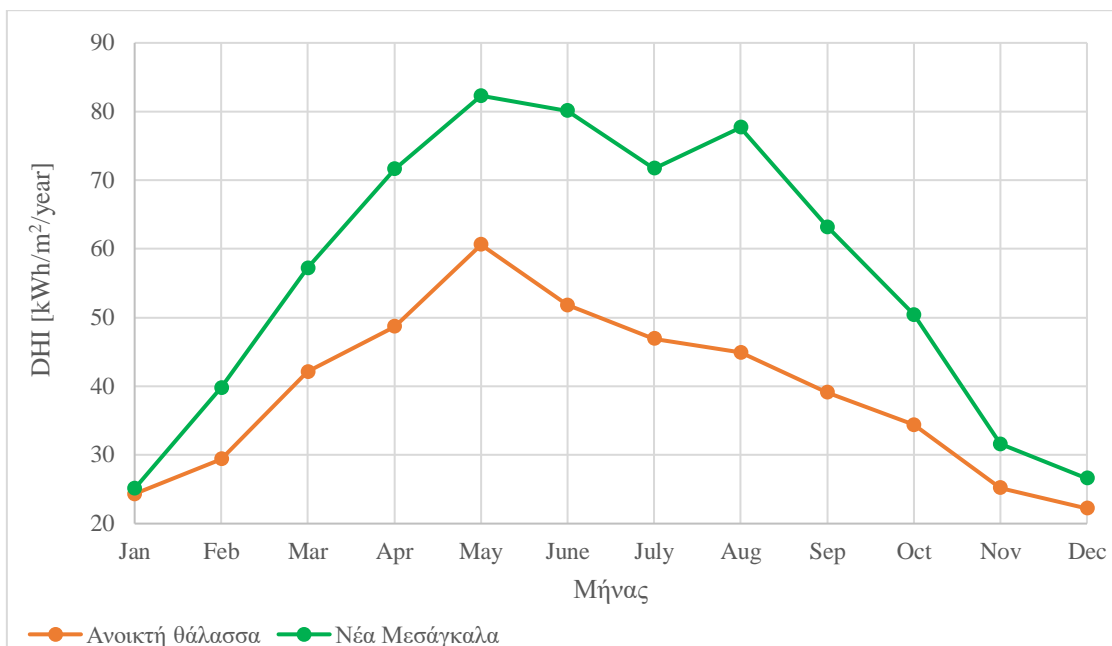
### 7.7.2. Τοποθεσία ανοικτής θάλασσας και Νέα Μεσάγκαλα

Στο Διάγραμμα 7.12 παρατηρείται ότι η παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία της δύο τοποθεσίες διαφέρει ελάχιστα, με την ανοικτή θάλασσα να παρουσιάζει ελάχιστα υψηλότερες τιμές συγκριτικά με τη χερσαία τοποθεσία.



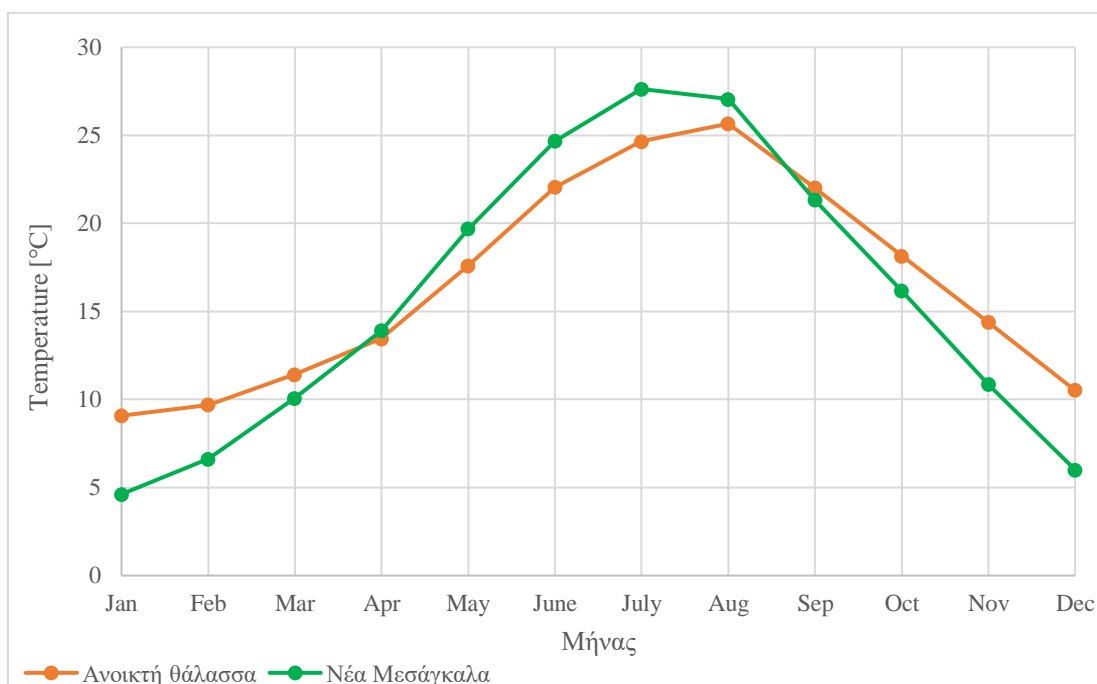
Διάγραμμα 7.12 Κατανομή της GHI για το τυπικό έτος στην ανοικτή θάλασσα και στα Νέα Μεσάγκαλα

Η διάχυτη ακτινοβολία στα Νέα Μεσάγκαλα είναι εμφανώς μεγαλύτερη παρά στην ανοικτή θάλασσα (βλ. Διάγραμμα 7.13) καθ' όλο το έτος, με εξαίρεση τον Ιανουάριο όταν οι τιμές τους σχεδόν ταυτίζονται.



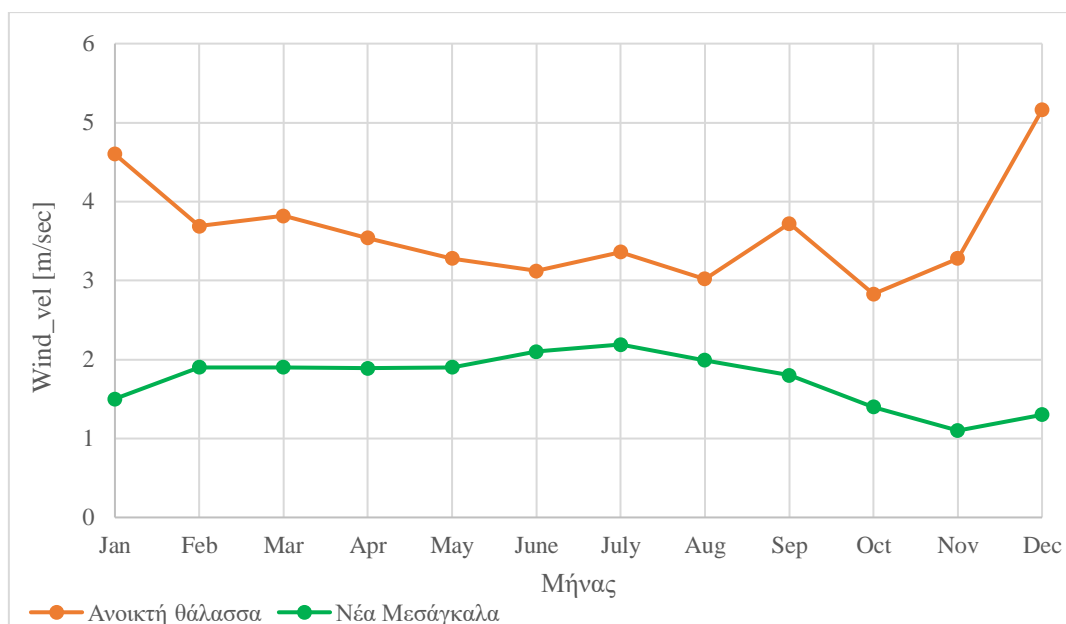
Διάγραμμα 7.13 Κατανομές της DHI για το τυπικό έτος στην ανοικτή θάλασσα και στα Νέα Μεσάγκαλα

Στο Διάγραμμα 7.14 παρατηρείται ότι τους μήνες Ιανουάριο έως Μάρτιο η θερμοκρασία στην ανοικτή θάλασσα είναι υψηλότερη από τη στεριά. Αυτό αντιστρέφεται τους καλοκαιρινούς μήνες, μέχρι τον Σεπτέμβριο όπου πάλι η θερμοκρασία στη στεριά είναι μικρότερη από τη θάλασσα.



Διάγραμμα 7.14 Κατανομές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το τυπικό έτος στην ανοικτή θάλασσα και στα Νέα Μεσάγκαλα

Περίπου σταθερή, και μικρότερη από τη θάλασσα, είναι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στην τοποθεσία των Νέων Μεσαγκαλών στο Διάγραμμα 7.15, ενώ έντονες διακυμάνσεις παρουσιάζει η κατανομή στην περιοχή της θάλασσας.



Διάγραμμα 7.15 Κατανομές της ταχύτητας ανέμου για το τυπικό έτος στην ανοικτή θάλασσα και στα Νέα Μεσαγκαλά

## **7.8. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ**

### **7.8.1. Γενικά**

Συνολικά εξετάστηκαν πέντε σενάρια σε κάθε περίπτωση, λίμνης και θάλασσας. Σε κάθε σενάριο μερικές μεταβλητές εισάγονται μεταβαλλόμενες ή σταθερές και μερικά μεγέθη εξάγονται ως υπολογίσιμα αποτελέσματα.

Στην εργασία αυτή, τα μεταβαλλόμενα μεγέθη εισόδου αποτελούν τα εξής:

- 1) Γωνία κλίσης των συλλεκτών  $\beta$  [°]
- 2) Απόσταση μεταξύ των σειρών των συλλεκτών – Βήμα (Pitch) [m]
- 3) Συντελεστής απωλειών θερμότητας  $U$  [W/m<sup>2</sup>K]
- 4) Υλικό φωτοβολταϊκού κελιού (Πολυκρυσταλλικό/Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο)

Σε κάθε σενάριο εξετάστηκε η μεταβολή ενός μεγέθους ή συνδυασμός αυτών.

### **Σταθερά μεγέθη στις προσομοιώσεις**

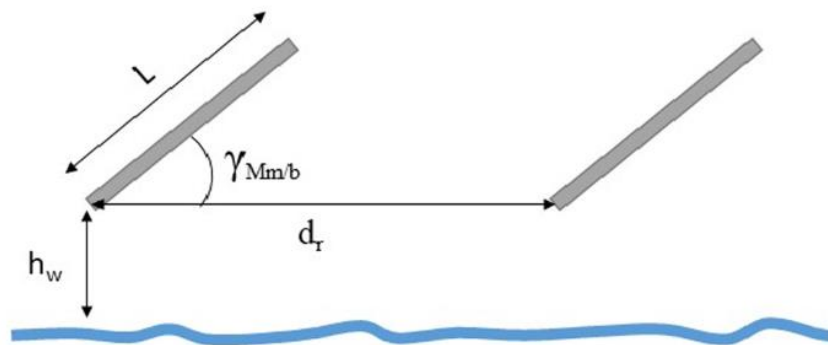
Σε όλα τα σενάρια και περιπτώσεις που μελετήθηκαν (στεριά και νερό), σταθερά μεγέθη εισόδου αποτελούν η γωνία του αζιμουθίου ίση με 0° (δηλαδή νότιος προσανατολισμός) και το πλήθος πάνελ σε σειρά ίσος με 26. Το τελευταίο μέγεθος, προέκυψε από την αρχική διαστασιολόγηση που έγινε από το λογισμικό.

Επίσης, στα τέσσερα πρώτα σενάρια ως υλικό του φωτοβολταϊκού κελιού επιλέχθηκε το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο ενώ στο πέμπτο εξετάστηκε η περίπτωση του πολυκρυσταλλικού πυρίτιου.

### Απόσταση βήματος -Pitch

Το βήμα (pitch) θεωρήθηκε σταθερό σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης των σεναρίων 1,4 και 5, ενώ στα σεναρία 2 και 3 αποτελεί μεταβλητή της μελέτης.

Στα σεναρία όπου η απόσταση βήματος ήταν σταθερό μέγεθος εισόδου, η τιμή της επιλέχθηκε ίση με 3 m. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στη μελέτη των Tina κ.ά. [68], όπου η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια για τις περιπτώσεις των μονόπλευρων συλλεκτών μεγιστοποιείται για λόγο απόστασης βήματος προς πλάτος πλαισίου  $d_r/L$  ίσο με 2. Αυτό ισχύει και για απόσταση από το νερό  $h_w = 0$  και 0.9 m. Στην περίπτωση της εργασίας λόγω του πλάτους των πλαισίων ίσο με 1.13 m, η απόσταση λήφθηκε λίγο μεγαλύτερη για μεγαλύτερη αποφυγή σκιάσεων ίση με 3 m. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.13.



Εικόνα 7.13 Γεωμετρικά μεγέθη της μελέτης απόστασης βήματος [68]

### Δεδομένα εξόδου και μεγέθη τα οποία υπολογίστηκαν

Σε κάθε περίπτωση, τα μεγέθη εξόδου του λογισμικού τα οποία παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον προς ανάλυση ήταν τα εξής:

- 1) Η καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη – Global effective irradiation (GlobEff\_Irr) [kWh/m<sup>2</sup>]
- 2) Η ετήσια διαχεόμενη ενέργεια στο δίκτυο (E\_grid) [GWh]
- 3) Ο λόγος απόδοσης % – Performance Ratio (PR)
- 4) Διαφορά θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών πάνελ και εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους (DTArr) [°C]
- 5) Απώλειες ενέργειας λόγω θερμοκρασίας (TempLss) [GWh]
- 6) Απώλειες ενέργειας λόγω κατακαθίσεων και σκόνης (SIgLoss) [kWh/m<sup>2</sup>]
- 7) Απώλειες ενέργειας λόγω σκιάσεων (ShdLoss) [kWh/m<sup>2</sup>]
- 8) Απώλειες ενέργειας λόγω ακτινοβολίας (GincLss) [GWh]

Από τα μεγέθη εξόδου του λογισμικού μπορούν επίσης να υπολογιστούν τα μεγέθη:

- 1) Ειδική παραγωγή ανά έτος (E\_specific) [kWh/kWp/year]
- 2) Συντελεστής φορτίου (Capacity Factor-CF)



## 7.8.2. Σενάρια τα οποία εξετάστηκαν

**1<sup>ο</sup> σενάριο:** Μελέτη ενεργειακής συμπεριφοράς της πλωτής εγκατάστασης σε σύγκριση με τη χερσαία για μεταβαλλόμενη γωνία κλίσης  $\beta$ , σταθερή απόσταση βήματος και συντελεστή απωλειών θερμότητας  $U$

### ▪ Σκοπός

Το σενάριο αυτό, μελετήθηκε για τις θέσεις της ανοικτής θάλασσας, της λίμνης και της στεριάς αντίστοιχα στις δύο περιπτώσεις, στις θέσεις οι οποίες αναλύθηκαν στο υποεδάφιο 7.7.1. Έτσι, μελετώνται τα ενεργειακά μεγέθη συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών και η εύρεση της βέλτιστης γωνίας τοποθέτησης τους. Ταυτόχρονα, γίνεται η σύγκριση των σημαντικών ενεργειακών μεγεθών και μεγεθών λειτουργίας μεταξύ των πλωτών και χερσαίων εγκαταστάσεων.

### ▪ Δεδομένα εισόδου

Στο σενάριο επιλέγεται σταθερό βήμα μεταξύ των σειρών των πάνελ και σταθερός συντελεστής απωλειών θερμότητας, ενώ η γωνία κλίσης  $\beta$  συλλεκτών [deg] μεταβάλλεται. Στις σταθερές μεταβλητές εισόδου επίσης προστίθενται οι συντελεστές σκόνης και κατακαθίσεων και απωλειών αναντιστοιχίας, όπως αυτοί αναλύθηκαν προηγουμένως. Ο Πίνακας 7.6 παρουσιάζει τις μεταβλητές εισόδου στην προσομοίωση για την πλωτή και αντίστοιχα για τη χερσαία εγκατάσταση.

Πίνακας 7.6 Δεδομένα εισόδου στο 1<sup>ο</sup> σενάριο για πλωτά φωτοβολταϊκά

Περίπτωση εγκατάστασης	$\beta$ [°]	Βήμα [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	Συντελεστής απωλειών λόγω σκόνης και κατακαθίσεων %	Συντελεστής απωλειών αναντιστοιχίας %
Πλωτά φωτοβολταϊκά λίμνης/θάλασσας	1 ..40	3	57	2	1
Χερσαία φωτοβολταϊκά στα Νέα Μεσάγκαλα	1 ..40	3	39	3	1
Χερσαία φωτοβολταϊκά στο Μοσχάτο	1 ..40	3	27	3	1

### ▪ Δεδομένα εξόδου και αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν

Τα μεγέθη εξόδου τα οποία μελετήθηκαν για τις πλωτές εγκαταστάσεις είναι:

- 1) Ετήσια παραγόμενη ενέργεια που διαχέεται στο δίκτυο [GWh]
- 2) Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη [kWh/m<sup>2</sup>]
- 3) Λόγος απόδοσης %
- 4) Συντελεστής φορτίου (Capacity Factor-CF)
- 5) Διαφορά θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών πάνελ και εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας (DTArr) [°C]

- 6) Απώλειες ενέργειας λόγω ακτινοβολίας (GincLss) [GWh]
- 7) Απώλειες ενέργειας λόγω κατακαθίσεων και σκόνης (SlgLoss) [kWh/m<sup>2</sup>]
- 8) Απώλειες ενέργειας λόγω σκιάσεων (ShdLoss) [kWh/m<sup>2</sup>]
- 9) Ειδική παραγωγή ανά έτος (E\_specific) [kWh/kWp/year]

Από το διάγραμμα της ετήσιας ενέργειας η οποία διαχέεται στο δίκτυο συναρτήσκει της γωνίας κλίσης, βρέθηκε η βέλτιστη γωνία κλίσης των πλαισίων ως το σημείο με τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας. Επιπρόσθετα, έγινε απεικόνιση με διαγράμματα των μεγεθών της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο, του λόγου απόδοσης, της ειδικής παραγωγής ανά έτος, του συντελεστή φορτίου, των απωλειών λόγω θερμοκρασίας, της διαφοράς θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών με θερμοκρασία περιβάλλοντος συναρτήσκει της κλίσης του συλλέκτη για τα χειρσαία και τα πλωτά φωτοβολταϊκά.

**2<sup>ο</sup> σενάριο: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ διατάξεων με μεταβλητή γωνία κλίσης των συλλεκτών, μεταβλητή απόσταση βήματος (pitch) και σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας U**

▪ **Σκοπός**

Το σενάριο αυτό μελετήθηκε για τις πλωτές θέσεις εγκατάστασης, δηλαδή αυτές της ανοικτής θάλασσας και της λίμνης. Στόχος είναι η μελέτη των ενεργειακών μεγεθών συναρτήσκει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών, με μεταβλητή την απόσταση βήματος (pitch).

▪ **Δεδομένα εισόδου**

Στο σενάριο μεταβάλλεται η απόσταση βήματος μεταξύ των σειρών των πάνελ και η γωνία κλίσης  $\beta$  [deg]. Το βήμα μεταβάλλεται μεταξύ 1.5 και 3 m με βήμα 0.5 m και η γωνία κλίσης μεταξύ 1° και 40° με βήμα 1°. Τις σταθερές μεταβλητές εισόδου αποτελούν οι συντελεστές σκόνης και κατακαθίσεων, απωλειών αναντιστοιχίας και ο συντελεστής απωλειών θερμότητας. Ο Πίνακας 7.7 παρουσιάζει τις μεταβλητές εισόδου στην προσομοίωση για τα πλωτά πάνελ.

Πίνακας 7.7 Δεδομένα εισόδου στο 2<sup>ο</sup> σενάριο

Περίπτωση εγκατάστασης	$\beta$ [°]	Βήμα [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	Συντελεστής απωλειών λόγω σκόνης και κατακαθίσεων %	Συντελεστής απωλειών αναντιστοιχίας %
Ανοικτή θάλασσα	1,..40	1.5	57	2	1
		2			
Λίμνη		2.5			
		3			
		3.5			

▪ **Δεδομένα εξόδου και διαγράμματα τα οποία εξήχθησαν**

Τα μεγέθη εξόδου τα οποία μελετήθηκαν στο σενάριο αυτό είναι:

- 1) Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη [kWh/m<sup>2</sup>]
- 2) Ετήσια παραγόμενη ενέργεια η οποία διαχέεται στο δίκτυο [GWh]

- 3) Λόγος απόδοσης %
- 4) Απώλειες λόγω σκίασης [kWh/m<sup>2</sup>]
- 5) Απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης [kWh/m<sup>2</sup>]

Προκύπτουν τα διαγράμματα αυτών των μεγεθών συναρτήσει της κλίσης του συλλέκτη για τα πλωτά φωτοβολταϊκά.

**3<sup>ο</sup> σενάριο:** Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ διατάξεων με σταθερή γωνία κλίσης συλλεκτών, μεταβλητή απόσταση βήματος και σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας  $U$

#### ▪ Σκοπός

Το σενάριο αυτό εξετάστηκε για τις θέσεις της ανοικτής θάλασσας και της λίμνης. Στόχος είναι η μελέτη των ενεργειακών μεγεθών συναρτήσει της απόστασης βήματος (pitch) για σταθερή γωνία κλίσης συλλεκτών. Η επιλογή μικρού βήματος δημιουργεί σκιάσεις και για την περίπτωση της θάλασσας σκοπός είναι η αξιοποίηση της διαθεσιμότητας του χώρου στη θάλασσα για εκμηδένιση των σκιάσεων.

#### ▪ Δεδομένα εισόδου

Το σενάριο αυτό χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο, μεταβάλλεται η απόσταση βήματος μεταξύ των σειρών των πάνελ και η γωνία κλίσης  $\beta$  [deg] παραμένει σταθερή και ίση με τη βέλτιστη γωνία του σεναρίου 1. Στο δεύτερο, επαναλαμβάνεται η ίδια μελέτη με το πρώτο μέρος και για άλλες γωνίες κλίσης  $\beta$ , και όχι μόνο τη βέλτιστη του σεναρίου 1.

Και στις δύο περιπτώσεις, το βήμα μεταβάλλεται από 1.5 m έως 3.5 m, με βήμα 0.5 m. Σταθερές μεταβλητές εισόδου αποτελούν οι συντελεστές σκόνης και κατακαθίσεων, απωλειών αναντιστοιχίας και ο συντελεστής απωλειών θερμότητας. Ο Πίνακας 7.8 και ο Πίνακας 7.9 παρουσιάζουν τα δεδομένα και μεταβλητές εισόδου για το πρώτο και δεύτερο μέρος του σεναρίου αντίστοιχα.

Πίνακας 7.8 Δεδομένα εισόδου στο πρώτο μέρος του 3<sup>ου</sup> σεναρίου

Περίπτωση εγκατάστασης	$\beta$ [°]	Βήμα [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	Συντελεστής απωλειών λόγω σκόνης και κατακαθίσεων %	Συντελεστής απωλειών αναντιστοιχίας %
Ανοικτή θάλασσα	17	1.5, ... 3.5	57	2	1
Λίμνη	6				

Πίνακας 7.9 Δεδομένα εισόδου στο δεύτερο μέρος του 3<sup>ου</sup> σεναρίου

Περίπτωση εγκατάστασης	$\beta$ [°]	Βήμα [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	Συντελεστής απωλειών λόγω σκόνης και κατακαθίσεων %	Συντελεστής απωλειών αναντιστοιχίας %
Ανοικτή θάλασσα	5,10,15,20,25,30	1.5, ... 3.5	57	2	1
Λίμνη					

- **Δεδομένα εξόδου και διαγράμματα τα οποία εξήχθησαν**

Τα μεγέθη εξόδου τα οποία μελετήθηκαν στο σενάριο αυτό είναι:

- 1) Ετήσια παραγόμενη ενέργεια που διαχέεται στο δίκτυο [GWh]
- 2) Λόγος απόδοσης %
- 3) Απώλειες λόγω σκίασης [kWh/m<sup>2</sup>]

Στο πρώτο μέρος απεικονίστηκαν τα διαγράμματα των μεγεθών αυτών συναρτήσει της απόστασης βήματος για διάφορες γωνίες κλίσης του συλλέκτη. Στο δεύτερο μέρος, έγινε το διάγραμμα της παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει της απόστασης βήματος για διάφορες γωνίες κλίσης συλλέκτη και χαράχθηκε η καμπύλη των κρίσιμων σημείων.

Κρίσιμα σημεία θεωρήθηκαν τα ζεύγη τιμών απόστασης βήματος και παραγόμενης ενέργειας (για κάθε γωνία κλίσης) όπου η παραγόμενη ενέργεια σταθεροποιείται όσο και να αυξάνεται η απόσταση βήματος.

**4<sup>ο</sup> σενάριο: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ των διατάξεων με μεταβλητό συντελεστή απωλειών θερμότητας  $U$  και σταθερή γωνία κλίσης συλλεκτών και απόσταση βήματος (pitch)**

- **Σκοπός**

Το σενάριο αυτό αφορά τις πλωτές θέσεις της ανοικτής θάλασσας και της λίμνης. Στόχος είναι η μελέτη των ενεργειακών μεγεθών συναρτήσει του συντελεστή απωλειών θερμότητας για σταθερή απόσταση βήματος (pitch) και γωνία κλίσης συλλεκτών.

- **Δεδομένα εισόδου**

Στο σενάριο μεταβάλλεται ο συντελεστής απωλειών θερμότητας βάσει του είδους της διάταξης των συλλεκτών, όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως. Τα σταθερά μεγέθη εισόδου είναι η απόσταση βήματος, η γωνία κλίσης συλλεκτών και οι συντελεστές σκόνης και κατακαθίσεων και απωλειών αναντιστοιχίας. Ο Πίνακας 7.10 παρουσιάζει τις μεταβλητές εισόδου στην προσομοίωση.

Πίνακας 7.10 Δεδομένα εισόδου στο 4<sup>ο</sup> σενάριο

Περίπτωση εγκατάστασης	$\beta$ [°]	Βήμα [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	Συντελεστής απωλειών λόγω σκόνης και κατακαθίσεων %	Συντελεστής απωλειών αναντιστοιχίας %	
Ανοικτή θάλασσα	17	3	Μικρό αποτύπωμα στο νερό και ελεύθερη στάση	$U=57$ $U_c=24.4$ και $U_v=6.5$	2	1
			Μεγάλο αποτύπωμα στο νερό και κλειστή κατασκευή	$U=37$ $U_c=25.2$ και $U_v=3.7$		
Λίμνη	6					

- **Δεδομένα εξόδου και αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν**

Τα μεγέθη εξόδου τα οποία μελετήθηκαν στο σενάριο αυτό είναι:

- 1) Ετήσια παραγόμενη ενέργεια που διαχέεται στο δίκτυο [GWh]
- 2) Θερμοκρασία σειράς συλλεκτών [°C]
- 3) Διαφορά θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος [°C]
- 4) Απώλειες λόγω θερμοκρασίας [GWh]

Έτσι λοιπόν, προέκυψαν οι τιμές των αποτελεσμάτων των μεγεθών αυτών συναρτήσει του συντελεστή απωλειών θερμότητας των πλωτών φωτοβολταϊκών.

**5<sup>ο</sup> σενάριο:** *Μελέτη ενεργειακών μεγεθών των διατάξεων φωτοβολταϊκών συλλεκτών πολυκρυσταλλικού πυριτίου με σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας  $U$ , γωνία κλίσης συλλεκτών και απόσταση βήματος (pitch)*

- **Σκοπός**

Το σενάριο αυτό αφορά τις πλωτές θέσεις της ανοικτής θάλασσας και της λίμνης. Στόχος είναι η μελέτη των ενεργειακών μεγεθών για την περίπτωση φωτοβολταϊκών πολυκρυσταλλικού πυριτίου και η σύγκριση τους με την περίπτωση του μονοκρυσταλλικού.

- **Δεδομένα εισόδου**

Στο σενάριο μεταβάλλεται το υλικό του φωτοβολταϊκού κελιού και η γωνία κλίσης συλλεκτών. Τα σταθερά μεγέθη εισόδου αποτελούν η απόσταση βήματος, ο συντελεστής απωλειών θερμότητας και οι συντελεστές σκόνης και κατακαθίσεων και απωλειών αναντιστοιχίας. Ο Πίνακας 7.11 παρουσιάζει τις μεταβλητές εισόδου στην προσομοίωση.

Πίνακας 7.11 Δεδομένα εισόδου στο 5<sup>ο</sup> σενάριο

Περίπτωση εγκατάστασης	$\beta$ [°]	Υλικό φωτοβολταϊκού κελιού	Βήμα [m]	$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	Συντελεστής απωλειών αναντιστοιχίας %
Ανοικτή θάλασσα	1,..40	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	3	2	1
Λίμνη	1,..40				

- **Δεδομένα εξόδου και αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν**

Τα μεγέθη εξόδου τα οποία μελετήθηκαν στο σενάριο αυτό είναι:

- 1) Ετήσια παραγόμενη ενέργεια που διαχέεται στο δίκτυο [GWh]
- 2) Συντελεστής φορτίου %
- 3) Διαφορά θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος [°C]
- 4) Ανηγγόμενες απώλειες συστήματος [kWh/kWp/day]

Έτσι λοιπόν, προέκυψαν τα διαγράμματα των μεγεθών αυτών συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα διαγράμματα για την περίπτωση του μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

## 7.9. Οικονομική ανάλυση πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων

Βασικός οικονομικός δείκτης αξιολόγησης της βιωσιμότητας μιας επένδυσης ενός έργου αποτελεί το κόστος ενέργειας LCOE (Levelized Cost of Energy). Ορίζεται από την Εξίσωση 7.5 [21] ως η αναλογία μεταξύ του συνολικού κόστους του έργου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του (του σταθερού κόστους κεφαλαίου) CAPEX, του κόστους λειτουργίας και συντήρησης (O&M) OPEX, του κόστους εγκατάλειψης ABEX, με έκπτωση προς τις παρούσες αξίες και της αναμενόμενης παραγωγής ενέργειας του συστήματος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Το LCOE δεν λαμβάνει υπόψη κανένα επιτόκιο και φορολογικό συντελεστή, διαφορετικό αναλόγως της περιοχής του έργου. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής ενός έργου πλωτών φωτοβολταϊκών είναι 25 έτη [21].

$$LCOE = \frac{\sum_{y=0}^Y \frac{ABEX(y) + OPEX(y) + CAPEX(y)}{\left(1 + \frac{R_d}{100}\right)^y}}{\sum_{y=0}^N \frac{E(y)}{\left(1 + \frac{R_d}{100}\right)^y}} \quad \text{Εξίσωση 7.5}$$

Στον ορισμό του LCOE, η μεταβλητή  $y$  ορίζει το έτος της εξεταζόμενης διάρκειας ζωής του συστήματος FPV και ο όρος  $R_d$  αντιπροσωπεύει το προεξοφλητικό επιτόκιο. Το τελευταίο έχει συνήθως τιμή μεταξύ 5 και 10% και αντικατοπτρίζει το κόστος ευκαιρίας της επένδυσης [21]. Δηλαδή, το εγγενές ποσόν του οικονομικού κινδύνου της επένδυσης το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των μελλοντικών εκροών σε τρέχουσες αξίες και εξαρτάται από την χώρα εγκατάστασης του έργου.

Για να υπολογιστεί το σταθερό κόστος κεφαλαίου CAPEX για τα FPV πρέπει να συμπεριληφθεί το κόστος για τα ηλιακά και τα πλωτά εξαρτήματα. Από την εργασία των Wang και Barnett [8] μπορεί να υπολογιστεί το κόστος των ηλιακών εξαρτημάτων (Πίνακας 7.12) στο οποίο συμπεριλαμβάνονται τα λοιπά κόστη εγκατάστασης (BOP), που αφορούν δηλαδή το κόστος των μετασχηματιστών, την καλωδίωση, τον εξοπλισμό μεταγωγής και ελέγχου, τον εξοπλισμό προστασίας κτλ. Συμπερασματικά, το κόστος κεφαλαίου για πλωτά συστήματα μπορεί να ανέβει μέχρι και 25% πάνω από αυτών των χερσαίες εγκαταστάσεων, λόγω του πλωτού εξοπλισμού δηλαδή των πλωτήρων, των αγκυροβολιών και της απαραίτητης πρόσθετης καλωδίωσης DC [69].

Πίνακας 7.12 Κόστος σταθερού κεφαλαίου για τα ηλιακά εξαρτήματα [21]

	Cost (USD/Wp)
PV Module	0.22
Inverter	0.1
BOP	0.23
Engineering, Procurement and Construction (EPC)	0.31
Other Costs	0.23

Ο Πίνακας 7.13 παρουσιάζει τα επιμέρους σταθερά έξοδα για τα πλωτά συστήματα για δύο διαφορετικές τεχνολογίες. Μεταξύ των δύο εταιρειών παραγωγής, η δομή των πλωτών κατασκευών της Solaris Synergy παρουσιάζει πιο απλή δομή κατασκευής άρα φθηνότερη και ευκολότερη παραγωγή, σε αντίθεση με την Ciel&Terre, επομένως χρειάζονται μικρές διαδρομές μεταφοράς και logistics. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συγκεκριμένη δομή πλωτήρων να εμφανίζει ένα χαμηλότερο κόστος προμήθειας.

Πίνακας 7.13 Κόστος σταθερού κεφαλαίου για τα πλωτά εξαρτήματα [21]

Cost (USD/Wp)	Cost (USD/Wp)	
	Ciel et Terre	Solaris Synergy
Floater supply	0.2	0.1
Moorings and anchors supply	0.02	0.04
EPC	0.1	0.1

Οι λειτουργίες συντήρησης είναι σίγουρα πιο κοστοβόρες σε σύγκριση με χερσαίες συστοιχίες φωτοβολταϊκών, καθώς απαιτούν χρήση σκαφών ή πιθανώς δυτών για ορισμένες παρεμβάσεις. Η προσέλευση βιολογικής ζωής αναμένεται να προκαλέσει αυξημένες ανάγκες συντήρησης των πλωτών φωτοβολταϊκών. Για την εκτίμηση αυτών των εξόδων OPEX, στην εργασία των Oliveira-Pinto και Stokkermans [21] επιλέχθηκε μια συντηρητική προσέγγιση, θεωρώντας το OPEX ίσο με 10% του CAPEX. Χαρακτηριστικά επίσης αναφέρεται πως το αντίστοιχο ποσοστό για ένα χερσαίο σύστημα αναφοράς είναι ίσο με 1.5% του CAPEX.

Όσον αφορά το κόστος παροπλισμού, στη δημοσίευση των Oliveira-Pinto και Stokkermans [21] καθορίστηκε στο 1% του CAPEX, βασισμένο στις προϋπάρχουσες τιμές του τομέα των θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η περίοδος αποπληρωμής ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος και των εσόδων του έργου και υπολογίζεται από την Εξίσωση 7.6. Στην εξίσωση, ο όρος  $El_{price}$  αντιπροσωπεύει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, που ποικίλει από χώρα σε χώρα, καθώς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η γεωπολιτική κατάσταση, το εθνικό ενεργειακό μείγμα, το κόστος δικτύου κ.λπ.

$$PBP = \frac{CAPEX}{El_{price} \cdot E_{grid} - OPEX}$$

Εξίσωση 7.6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

### 8.1 Γενικά

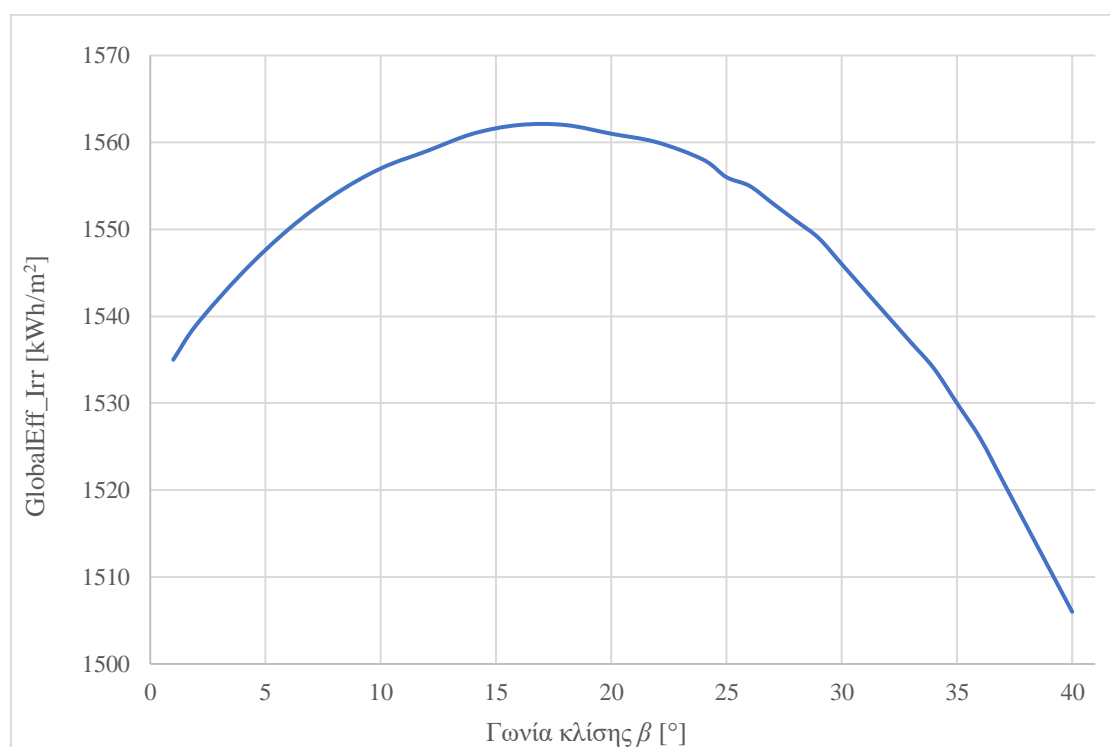
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο περιπτώσεις μελέτης, σε θάλασσα και λίμνη. Συνολικά εξετάστηκαν τα πέντε σενάρια που προαναφέρθηκαν και από αυτά προέκυψε πληθώρα διαγραμμάτων. Και για τις δύο περιπτώσεις έγινε και η αντίστοιχη σύγκριση με συστήματα στη στεριά σε κοντινή απόσταση από το νερό.

### 8.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Μελέτη ενεργειακής συμπεριφοράς της πλωτής εγκατάστασης σε σύγκριση με τη γερσαία για μεταβαλλόμενη γωνία κλίσης, σταθερή απόσταση βήματος (pitch) και συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$

#### 8.2.1 Ανοικτή θάλασσα

##### *Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη*

Η προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία είναι το μέγεθος με τη μεγαλύτερη επιρροή στην παραγόμενη ενέργεια του συστήματος των φωτοβολταϊκών. Η καθαρή ακτινοβολία, δηλαδή η ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία μείον τις οπτικές απώλειες (απώλειες σκίασης, κατακαθίσεων και πρόσπτωσης (IAM)), μελετάται ως μέγεθος εξόδου των προσομοιώσεων του λογισμικού. Η μεταβολή της συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.1. Η μορφή της καμπύλης είναι παραβολοειδής με μέγιστη τιμή τα 1562 kWh/m<sup>2</sup> στις 17° γωνίας κλίσης. Στο σημείο αυτό, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται.



Διάγραμμα 8.1 Μεταβολή της καθαρής προσπίπτουσα παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

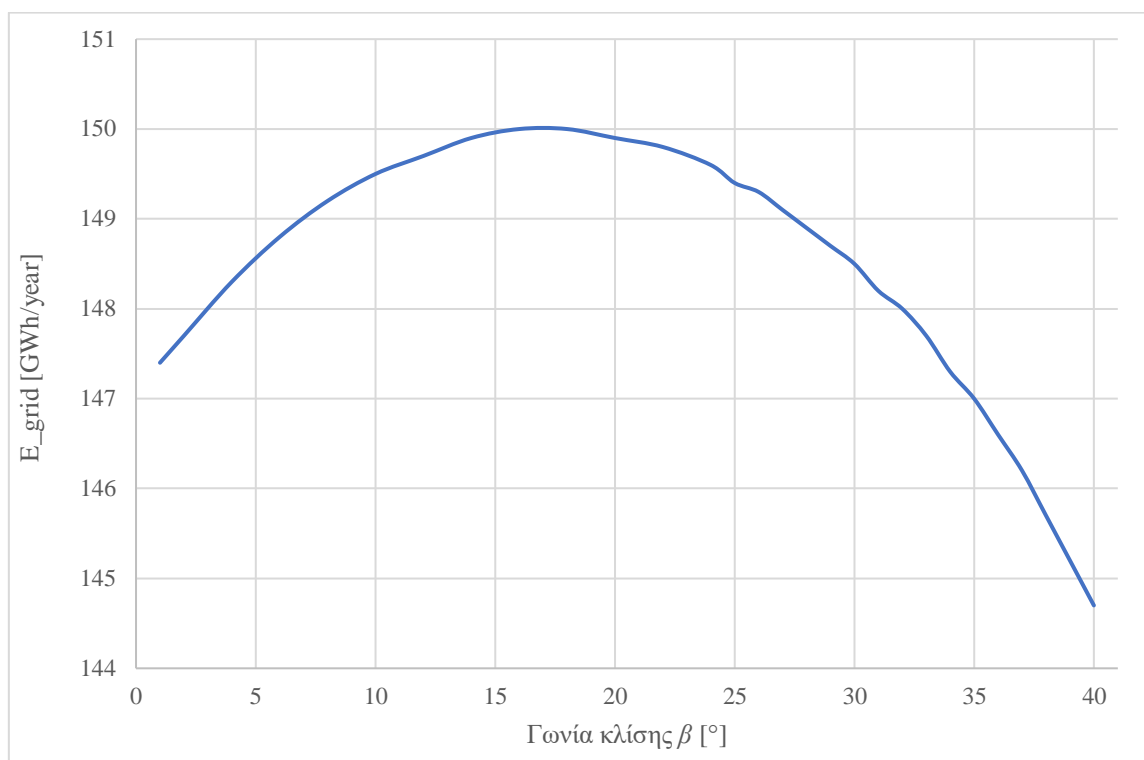


### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια διαχεόμενη στο δίκτυο

Το κύριο μέγεθος ενδιαφέροντος στα αποτελέσματα είναι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια που διαχέεται στο δίκτυο. Η επιλογή της βέλτιστης γωνίας κλίσης των συλλεκτών εξαρτάται κυρίως από τη μεγιστοποίηση του μεγέθους αυτού και συνδυαστικά με την ελαχιστοποίηση των φορτίων λόγω ανέμου στην κατασκευή.

Η μεταβολή της παραγόμενης διαχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, για την περίπτωση της εγκατάστασης στην ανοικτή θάλασσα, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.2. Όπως και αναμενόταν, η καμπύλη ακολουθεί σε μορφή την καμπύλη της καθαρής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο Διάγραμμα 8.1.

Στην περίπτωση της ανοικτής θάλασσας, η βέλτιστη γωνία κλίσης, όπου παρουσιάζεται η μεγιστοποίηση τόσο της καθαρής προσπίπτουσας ακτινοβολίας όσο και της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο, είναι οι  $17^\circ$  και η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια ίση με 150 GWh/έτος.



Διάγραμμα 8.2 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας η οποία διαχέεται στο δίκτυο συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

### Λόγος απόδοσης

Ο λόγος απόδοσης-Performance Ratio (PR) ορίζεται από την Εξίσωση 8.1 και είναι ο λόγος της ενέργειας που παράγεται από τη διάταξη των φωτοβολταϊκών, σε σχέση με την ενέργεια που θα παραγόταν εάν το σύστημα λειτουργούσε συνεχώς στην ονομαστική του ισχύ και απόδοση. Ο PR ορίζεται κατά τον κανόνα IEC EN 61724 και είναι ίσος με το γινόμενο της προσπίπτουσας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλεκτικό επίπεδο ( $G_{\text{Inc}}$ ) και της εγκατεστημένης ισχύς STC. Η δυνητικά παραγόμενη ενέργεια σε συνθήκες STC ( $P_{\text{nomPV}}$ ) είναι το γινόμενο του παρονομαστή  $G_{\text{Inc}} \cdot P_{\text{nomPV}}$ , όπου  $P_{\text{nomPV}}$  είναι η εγκατεστημένη ισχύς STC (χαρακτηριστικό μέγεθος κατασκευαστή). Αυτή η ισοδυναμία εξηγείται από το γεγονός ότι σε STC ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) κάθε  $\text{kWh/m}^2$  προσπίπτουσας ακτινοβολίας θα παράγει  $1 \text{ kWh}$  ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη διαστασιολόγηση του συστήματος, το λογισμικό PVsyst ορίζει την  $P_{\text{nomPV}}=100003 \text{ kW}$  για την παρούσα εγκατάσταση.

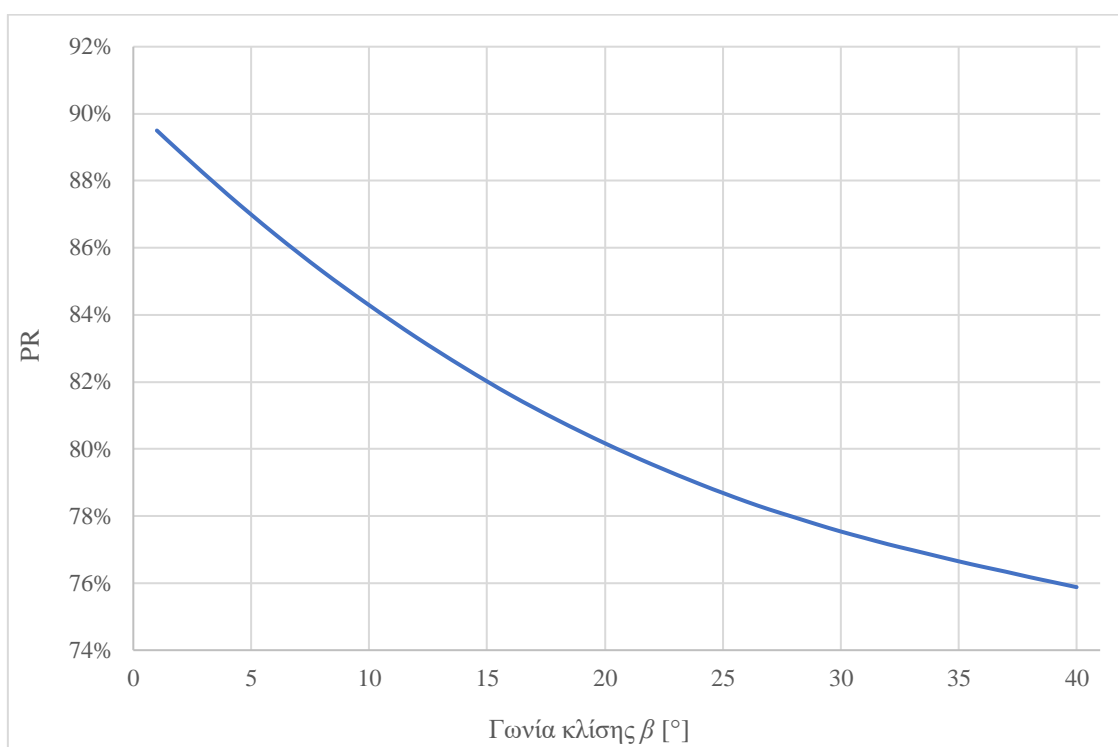
$$PR = \frac{E_{grid}}{GlobInc \cdot P_{nomPV}}$$

Εξίσωση 8.1

Ο λόγος PR περιλαμβάνει τις οπτικές απώλειες (Shadings, IAM, κατακαθίσεις και σκόνη), τις απώλειες συστοιχίας (π.χ. μετατροπή φωτοβολταϊκών, γήρανση, ποιότητα μονάδας, αναντιστοιχία, καλωδίωση) και τις απώλειες συστήματος (απόδοση μετατροπέα σε συνδεδεμένο δίκτυο).

Σε αντίθεση με το μέγεθος της ειδικής παραγωγής ενέργειας [kWh/kWp/έτος], το PR δεν εξαρτάται άμεσα από την είσοδο μετεωρολογικών δεδομένων ή τον προσανατολισμό του επιπέδου. Επιτρέπει δηλαδή τη σύγκριση της ποιότητας του συστήματος μεταξύ εγκαταστάσεων σε διαφορετικές τοποθεσίες και προσανατολισμούς και δεν εξαρτάται από την απόδοση της φωτοβολταϊκής μονάδας. Έτσι είναι δυνατόν μια άμορφη μονάδα και μια κρυσταλλική μονάδα υψηλής απόδοσης να οδηγήσουν σε συγκρίσιμο PR. Μόνο η απόδοση σε χαμηλό φωτισμό και η εξάρτηση από τη θερμοκρασία θα προκαλέσουν διαφορές.

Η μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτησει της γωνίας κλίσης συλλέκτη παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.3 και μειώνεται καθώς η γωνία κλίσης αυξάνεται. Σε μικρότερες έτσι γωνίες κλίσης η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση αποδίδει καλύτερα, σχεδόν όσο θα απέδιδε θεωρητικά.



Διάγραμμα 8.3 Μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτησει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

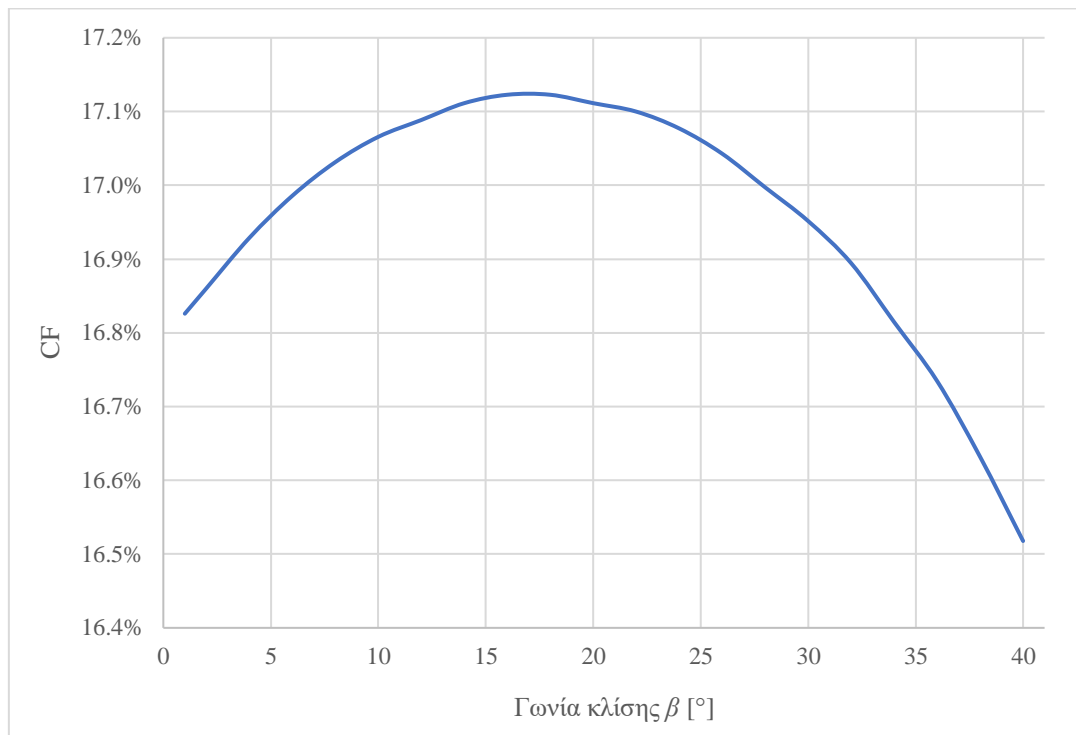
### Συντελεστής φορτίου

Ο συντελεστής φορτίου ορίζεται από την Εξίσωση 8.2. Στον αριθμητή βρίσκεται η παραγόμενη ετήσια ενέργεια και στον παρονομαστή η ενέργεια που θα παραγόταν εάν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση λειτουργούσε όλο τον χρόνο στην ονομαστική ισχύ  $P_{rated} = 100 \text{ MW}$ . Το μέγεθος αυτό αποτελεί δείκτη της ενεργειακής απόδοσης του έργου σε σχέση με το πόσο κοντά είναι η παραγωγή του στην μέγιστη δυνατή του, εάν δηλαδή λειτουργούσε στην ονομαστική ισχύ ολόχρονα.

$$CF = \frac{E_{grid}}{E_R} = \frac{E_{grid}}{P_{rated} \cdot 8760}$$

Εξίσωση 8.2

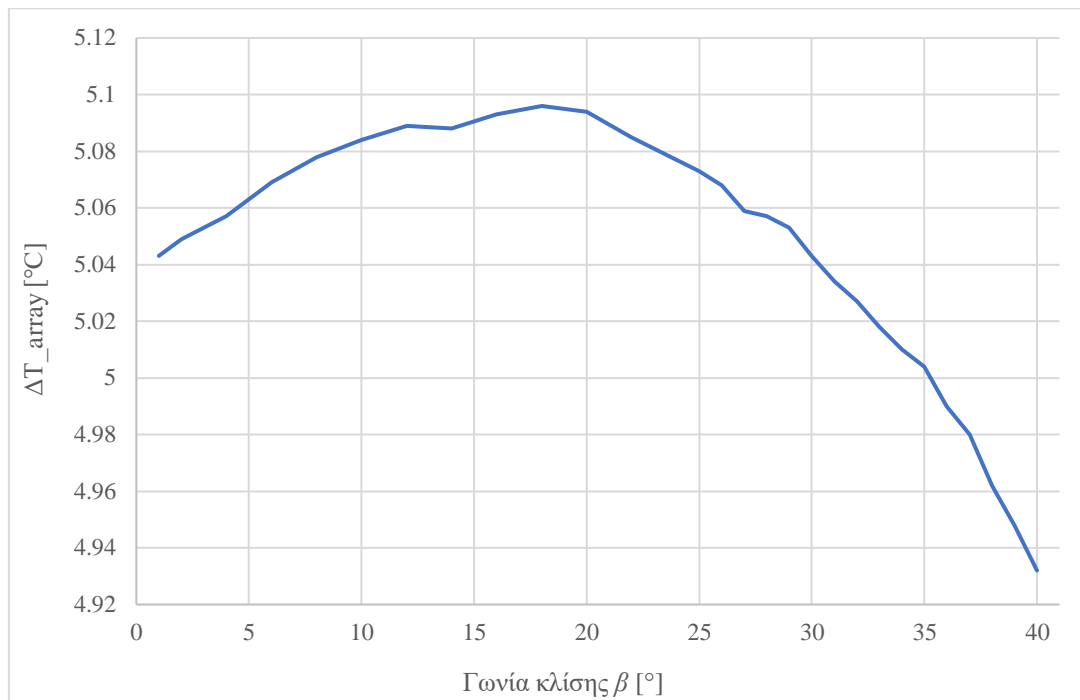
Στο Διάγραμμα 8.4, παρουσιάζεται η καμπύλη του συντελεστή φορτίου για τα πλωτά φωτοβολταϊκά της θάλασσας. Η καμπύλη αναμενόμενα ακολουθεί το προφίλ του διαγράμματος της ενέργειας. Η μέγιστη τιμή του εμφανίζεται στις 17° και είναι ίση με CF = 17.1%.



Διάγραμμα 8.4 Καμπύλη συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της θάλασσας

#### **Διαφορά θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών και θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας**

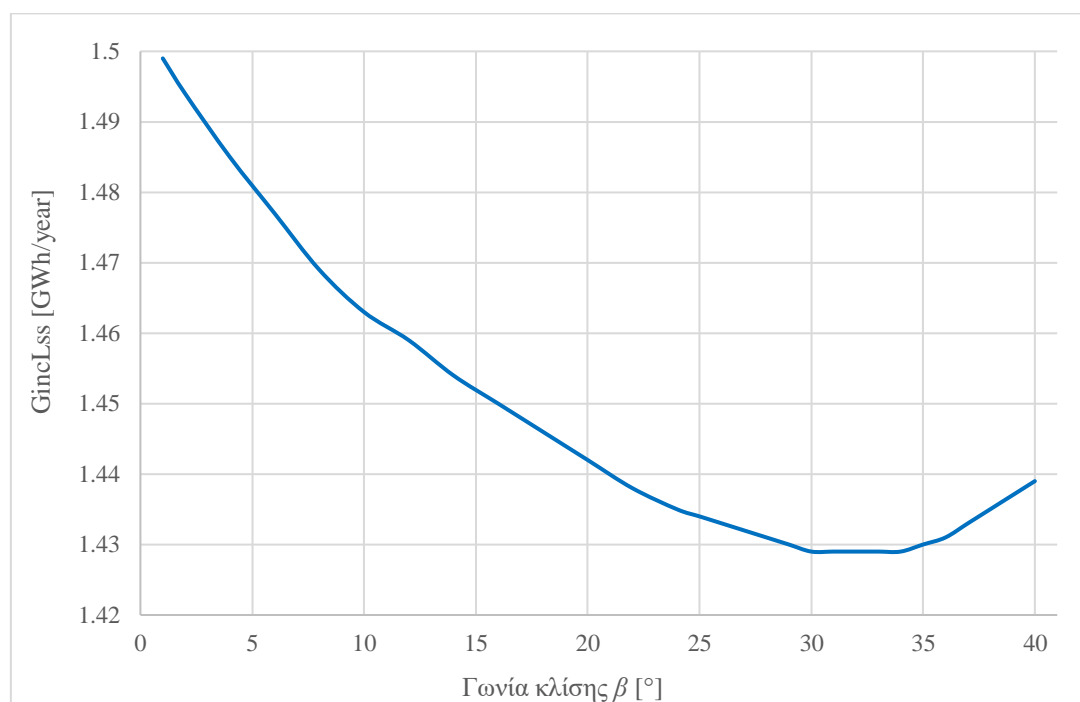
Η διαφορά θερμοκρασίας των πλαισίων ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελεί μέγεθος στην έξοδο των προσομοιώσεων. Βάσει των θερμοκρασιακών μοντέλων των φωτοβολταϊκών πλαισίων (δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι διαθέσιμα στη βάση δεδομένων του λογισμικού PVsyst) υπολογίζεται η θερμοκρασία τους και μετέπειτα συγκρίνεται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η μεταβολή της συναρτήσει της γωνίας κλίσης, φαίνεται στο Διάγραμμα 8.5. Η καμπύλη παρουσιάζει παραβολική συμπεριφορά, με πολύ μικρές διακυμάνσεις στις τιμές (τάξεως ενός δεκαδικού) και η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στις 18°. Περίπου όλες οι τιμές διακυμαίνονται γύρω στους 5°C.



Διάγραμμα 8.5 Μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας πλαισίων και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

### Απώλειες λόγω ακτινοβολίας

Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας οφείλονται στη χαμηλή απόδοση των φωτοβολταϊκών σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού (απόδοση σε σχέση με την απόδοση στα  $1000 \text{ W/m}^2$ ). Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι σημαντικές, της τάξεως των 1 GWh ετησίως και στο Διάγραμμα 8.6 παρουσιάζεται η κατανομή τους συναρτήσει της γωνίας κλίσης του συλλέκτη.

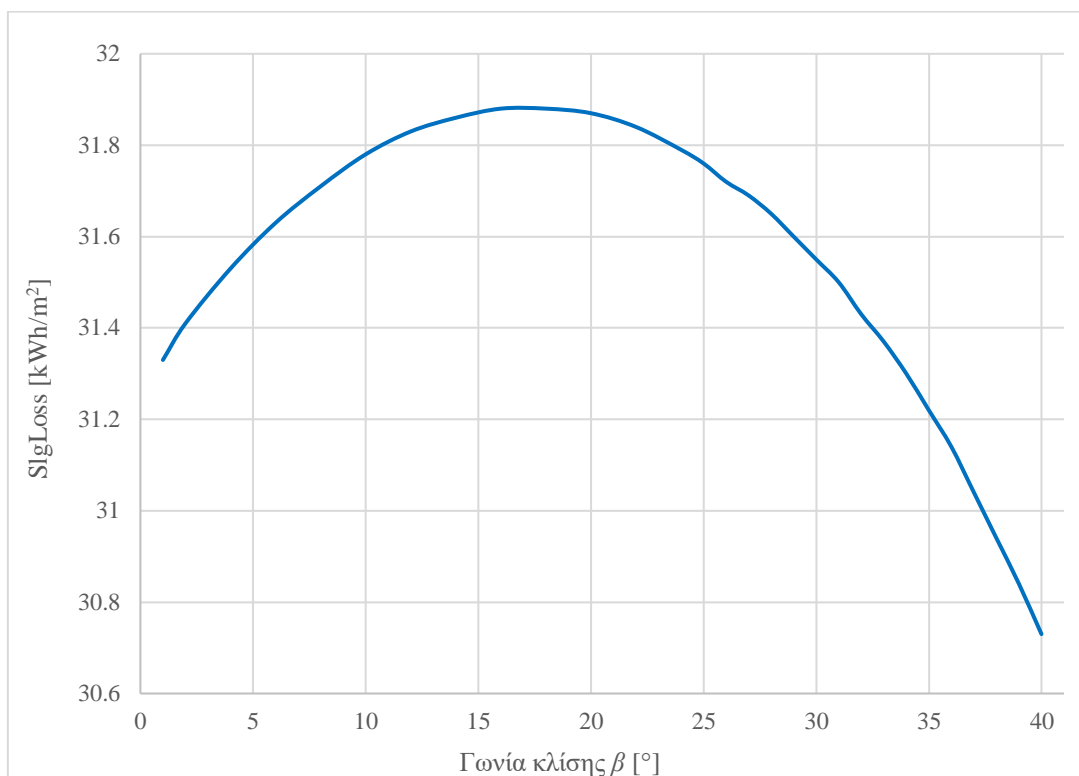


Διάγραμμα 8.6 Κατανομή των απωλειών ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

Η κατανομή βαίνει μειούμενη με την αύξηση της γωνίας κλίσης μέχρι τις 30° όπου εμφανίζει ελάχιστη τιμή ίση με 1.429 GWh/year.

#### **Απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης**

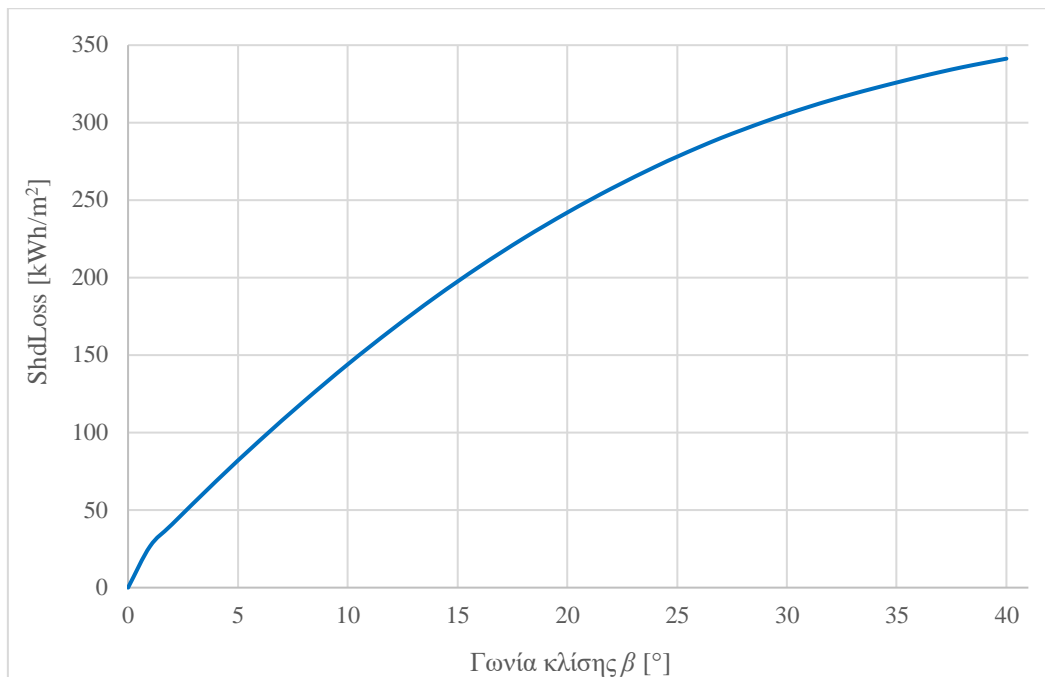
Το ποσοστό των απωλειών λόγω σκόνης και κατακαθίσεων ορίστηκε ως σταθερό ποσοστό 2% στα σταθερά μεγέθη εισόδου της προσομοίωσης για τα πλωτά φωτοβολταϊκά. Έτσι, η μορφή της κατανομής τους στο Διάγραμμα 8.7 ακολουθεί την κατανομή της παραγόμενης ενέργειας (Διάγραμμα 8.2) με μέγιστη τιμή ίση με 31.88 kWh/m<sup>2</sup> τις  $\beta = 17^\circ$ .



Διάγραμμα 8.7 Κατανομή των απωλειών κατακαθίσεων και σκόνης συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

#### **Απώλειες λόγω σκιάσεων**

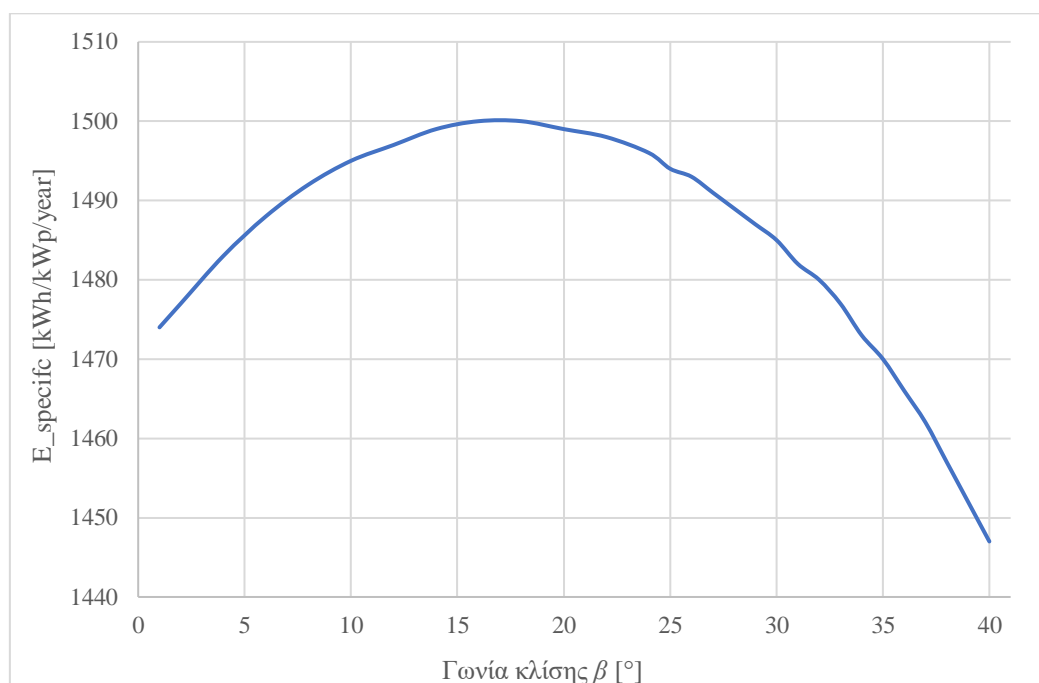
Οι γραμμικές απώλειες λόγω σκιάσεων οφείλονται σε ελλείψεις ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά κύτταρα. Αποτελούνται από δύο είδη απωλειών λόγω γειτονικών σκιάσεων στα πλαίσια, από το περιβάλλον και από κοντινά αντικείμενα. Συμπεριλαμβάνονται και οι σκιάσεις από τα ίδια τα πλαίσια. Οι απώλειες αναλύονται λοιπόν, σε τέσσερις παράγοντες και αυτοί υπολογίζονται στο λογισμικό PVsyst. Οι παράγοντες είναι η λευκαύγεια (albedo component), η θέση του ήλιου (beam component), ο παράγοντας διάχυσης σε όλες τις κατευθύνσεις του ουρανού (diffuse component) και ο περιηλιακός παράγοντας (circumsolar component). Στο Διάγραμμα 8.8 παρουσιάζεται η κατανομή των γραμμικών απωλειών σκίασης για διάφορες τιμές της γωνίας  $\beta$ . Για οριζόντιο συλλέκτη, γωνίας κλίσης 0°, οι απώλειες αυτές ως αναμενόμενο μηδενίζονται, ενώ παρατηρείται μεγάλη αύξηση τους παραλλήλως της αύξησης της κλίσης λόγω της σκίασης από τις ίδιες σειρές των πλαισίων.



Διάγραμμα 8.8 Κατανομή των απωλειών λόγω σκιάσεων συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

### Ειδική παραγωγή ανά έτος

Η ειδική παραγωγή ανά έτος υπολογίζεται από τον λόγο της παραγόμενης ετήσιας ενέργειας που διαχέεται στο δίκτυο προς την ολική εγκατεστημένη ισχύ της εγκατάστασης. Η κατανομή της συναρτήσει της γωνίας κλίσης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.9 και μεγιστοποιείται στις 17° με τιμή 1500 kWh/kWp/year.

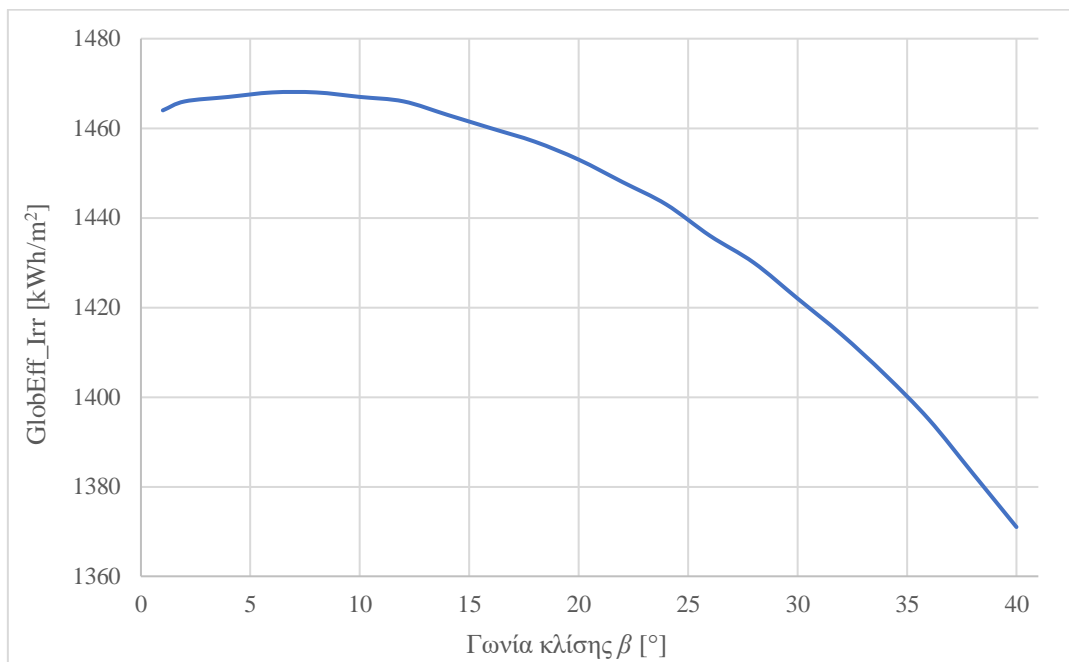


Διάγραμμα 8.9 Κατανομή της ετήσιας ειδικής παραγωγής ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

## 8.2.2 Χερσαία τοποθεσία της περίπτωσης της θάλασσας-Νέα Μεσάγκαλα

### **Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη**

Η μεταβολή της προσπίπτουσας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας στην χερσαία τοποθεσία εγκατάστασης στην περιοχή Νέα Μεσάγκαλα συναρτήσεως της γωνίας κλίσης των συλλεκτών παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.10. Η μορφή της καμπύλης είναι παραβολοειδής με μέγιστη τιμή τα 1468 kWh/m<sup>2</sup> στις 7° γωνία κλίσης. Στο σημείο αυτό, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται. Συγκρίνοντας με την καθαρή ακτινοβολία στα πλωτά, η ακτινοβολία στην χερσαία τοποθεσία είναι αρκετά μικρότερη και αυτό παίζει κύριο ρόλο στην παραγωγή ενέργειας.



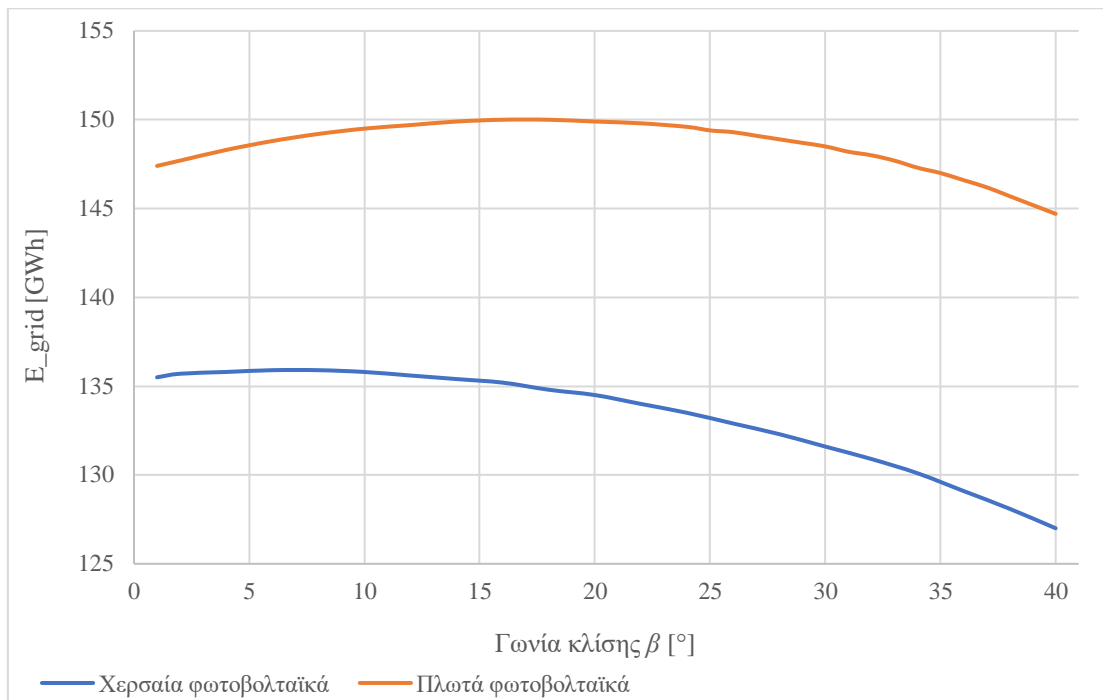
Διάγραμμα 8.10 Μεταβολή της καθαράς προσπίπτουσας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσεως της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της χερσαίας τοποθεσίας στα Νέα Μεσάγκαλα

### **Ετήσια παραγόμενη ενέργεια διαχεόμενη στο δίκτυο**

Οι μεταβολές της παραγόμενης διαχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας συναρτήσεως της γωνίας κλίσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών για την περίπτωση της εγκατάστασης στην χερσαία και πλωτή εγκατάσταση παρουσιάζονται συγκριτικά στο Διάγραμμα 8.11. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8.10, η καμπύλη της ενέργειας των χερσαίων πάνελ ακολουθεί σε μορφή την καμπύλη της καθαράς προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

#### **Παρατηρήσεις:**

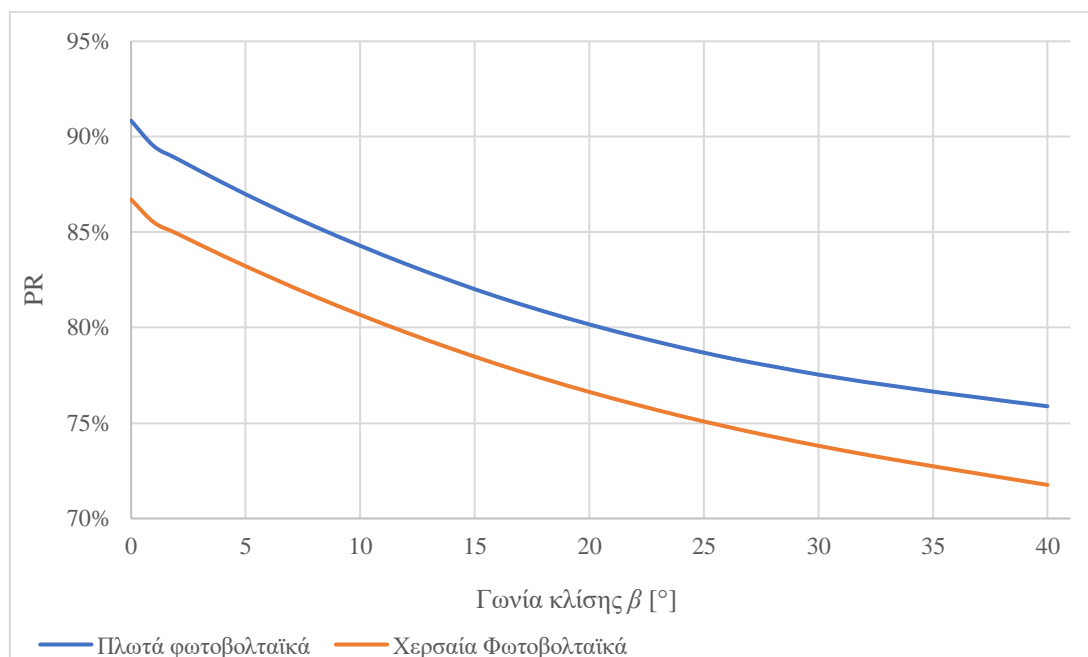
Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν αρκετές διαφορές. Οι μέγιστες τιμές τους αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές κλίσης γωνίας β. Η μέγιστη τιμή στην περίπτωση των πλωτών συλλεκτών είναι, όπως αναφέρθηκε, ίση με 150 GWh και γωνία κλίσης 17°, ενώ των χερσαίων είναι ίση με 135.9 GWh για γωνία κλίσης 7°. Έτσι, η παραγόμενη ετήσια ενέργεια που διαχέεται στο δίκτυο είναι μεγαλύτερη κατά 10.4% στην πλωτή εγκατάσταση παρότι στην χερσαία. Αυτό οφείλεται κυρίως στην χαμηλότερη καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη στα χερσαία παρά στα πλωτά φωτοβολταϊκά.



Διάγραμμα 8.11 Μεταβολές της παραγόμενης διαχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

### Λόγος απόδοσης

Η μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης συλλέκτη τόσο για τη χερσαία όσο και για την πλωτή εγκατάσταση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.12. Οι δύο καμπύλες έχουν ίδια μορφή και μειώνονται καθώς η γωνία κλίσης αυξάνεται. Μεγαλύτερο λόγο απόδοσης, κατά 4%, εμφανίζει η πλωτή εγκατάσταση κάτι που καταδεικνύει παραγωγή πλησιέστερη στην ισχύ κατά STC παρά αυτή της χερσαίας εγκατάστασης. Η πλωτή εγκατάσταση αποδίδει εμφανώς καλύτερα στις κανονικές συνθήκες από τη χερσαία.

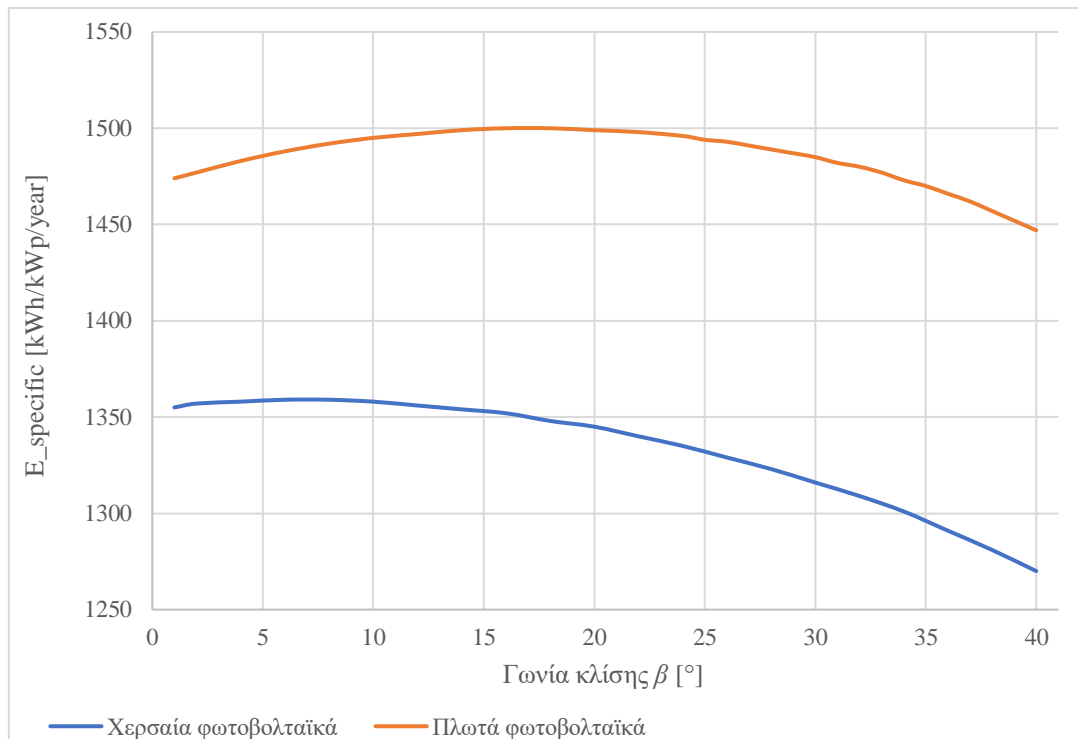


Διάγραμμα 8.12 Μεταβολές του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας



### Ειδική παραγωγή ανά έτος

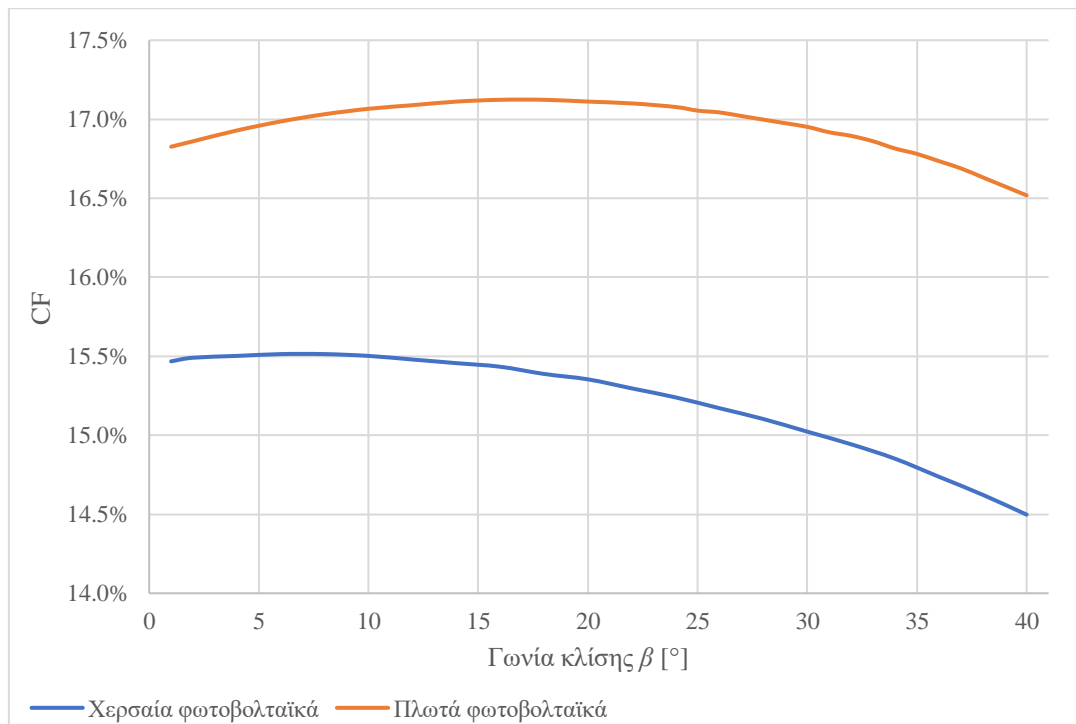
Οι καμπύλες της ετήσιας ειδικής παραγωγής ενέργειας για την πλωτή και χερσαία εγκατάσταση της ανοικτής θάλασσας απεικονίζονται στο Διάγραμμα 8.13. Διαπιστώνεται ότι η ειδική παραγωγή ενέργειας στα πλωτά φωτοβολταϊκά υπερτερεί των χερσαίων κατά περίπου 10.4%.



Διάγραμμα 8.13 Μεταβολές της ειδικής παραγωγής συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της θάλασσας

### Συντελεστής φορτίου

Οι καμπύλες του συντελεστή φορτίου για την πλωτή και χερσαία εγκατάσταση της ανοικτής θάλασσας παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.14. Αντίστοιχα με την ειδική παραγωγή ενέργειας, ο CF στα πλωτά φωτοβολταϊκά υπερτερεί των χερσαίων κατά περίπου 10%. Τα πλωτά Φ/Β αποδίδουν κατά 10% περισσότερο από τα χερσαία σε σχέση με το μέγιστη δυνατή ονομαστική εγκατεστημένη ισχύ της εγκατάστασης.

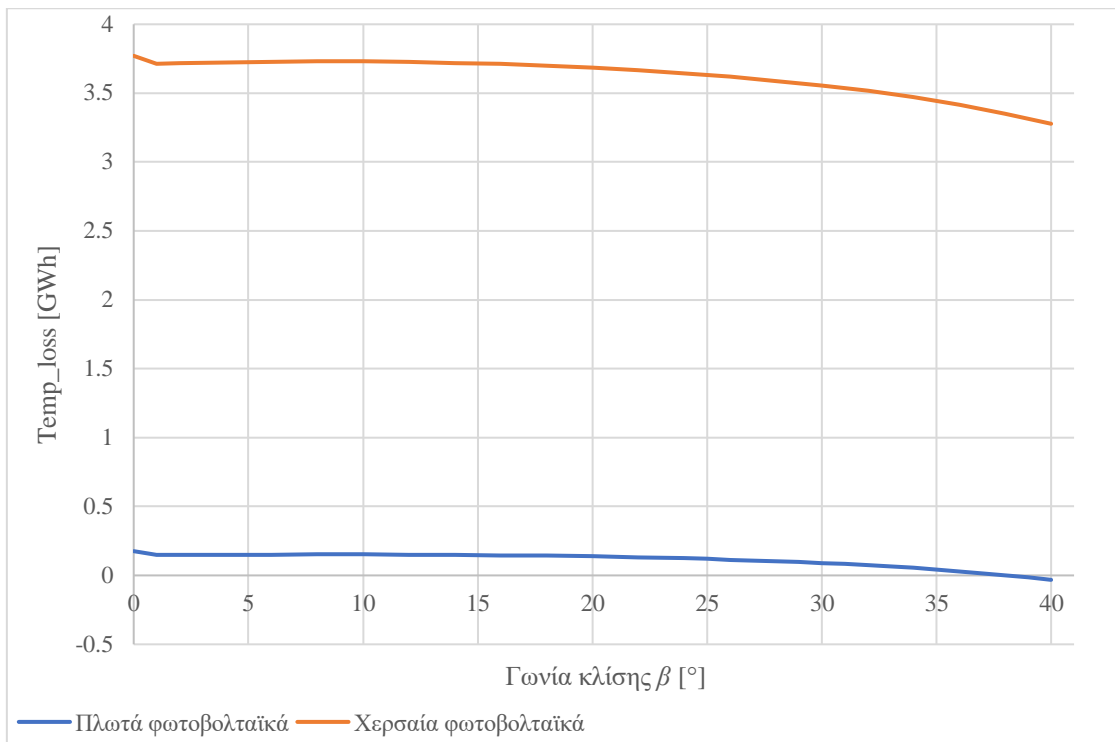


Διάγραμμα 8.14 Μεταβολές του συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της θάλασσας

### Απώλειες ενέργειας λόγω θερμοκρασίας

Το μέγεθος των απωλειών λόγω θερμοκρασίας υπολογίζεται ως μεταβλητή εξόδου των προσομοιώσεων και αντιπροσωπεύει τις απώλειες λόγω της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στη συστοιχία των συλλεκτών. Όπως αναφέρεται στο λογισμικό, οι απώλειες εξαρτώνται από το μοντέλο θερμοκρασιών του φωτοβολταϊκού πλαισίου και υπολογίζεται η απόδοση του σε δεδομένη θερμοκρασία από τις παραμέτρους της μονάδας. Το μοντέλο θερμοκρασίας του PVsyst εξαρτάται από την καθαρή προσπίπτουσα ακτινοβολία στα πλαίσια και έτσι στην περίπτωση μείωσης της, π.χ. λόγω των γωνιών (transposition angles) και των σκιάσεων, η θερμοκρασία θα είναι χαμηλότερη. Ανάλογα λοιπόν με τις παραμέτρους της φωτοβολταϊκής μονάδας, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερες απώλειες θερμοκρασίας συνολικά.

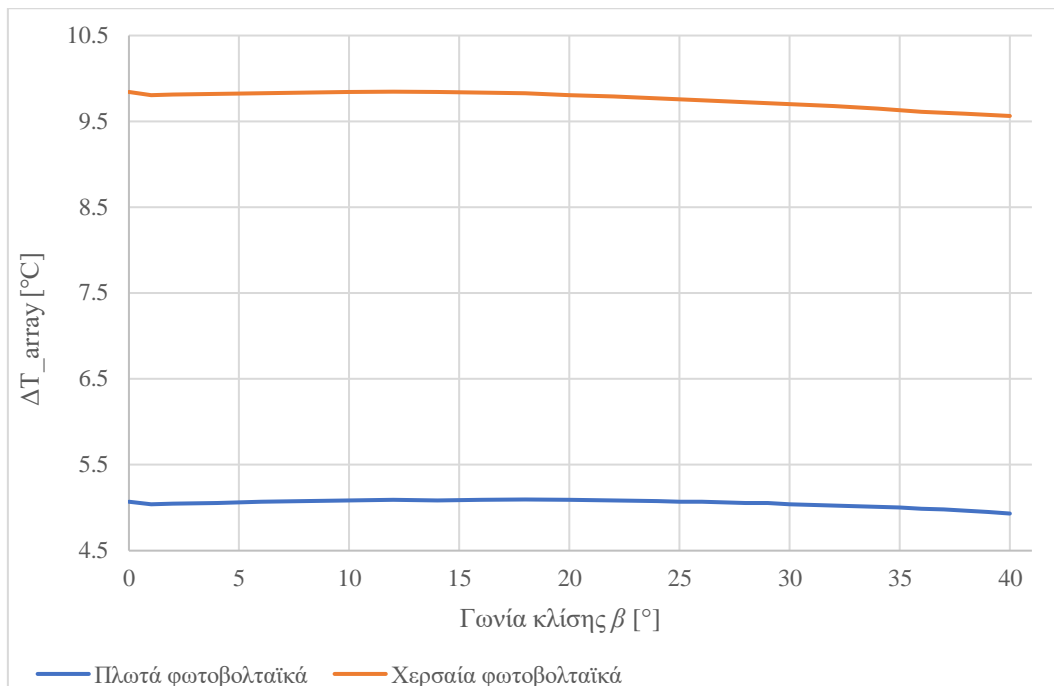
Οι μεταβολές των απωλειών λόγω θερμοκρασίας για τη χερσαία και πλωτή τοποθεσία της ανοικτής θάλασσας, συναρτήσει της γωνίας  $\beta$ , παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.15. Παρατηρούνται χαμηλότερες απώλειες στα πλωτά φωτοβολταϊκά συγκριτικά με τα χερσαία, με τις τιμές να είναι σχεδόν μηδενικές. Αυτό εξηγείται και από το επόμενο διάγραμμα της διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον (Διάγραμμα 8.16). Για μεγάλες γωνίες (35° και μετά) οι απώλειες στα πλωτά μηδενίζονται και κινούνται πολύ κοντά στο 0, με μικρές αρνητικές τιμές, γεγονός που δεν στάθηκε δυνατόν να αιτιολογηθεί και πιθανολογείται να οφείλεται σε εσωτερικά εσφαλμένες επιλύσεις εξισώσεων του λογισμικού.



Διάγραμμα 8.15 Μεταβολές των απωλειών λόγω θερμοκρασίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

#### **Διαφορά θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών και θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας**

Οι κατανομές της διαφοράς θερμοκρασίας των πλαισίων ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για την πλωτή και χερσαία εγκατάσταση, συναρτήσει της γωνίας κλίσης φαίνονται στο Διάγραμμα 8.16. Οι μορφές των δύο κατανομών είναι όμοιες. Συγκεκριμένα παραμένουν περίπου σταθερές έως τις 25° και έπειτα μειώνονται με τον ίδιο ρυθμό. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις συστοιχίες των χερσαίων φωτοβολταϊκών συλλεκτών είναι μεγαλύτερες από αυτές των πλωτών, μιας και η διαφορά θερμοκρασίας πλαισίων-περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από ότι στα πλωτά. Η διαφορά των δύο καμπυλών είναι αξιοσημείωτη, της τάξεως των 5°C. Αυτό συνεπάγεται και τις αυξημένες απώλειες λόγω αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στα χερσαία πάνελ, το οποίο δικαιολογεί και την μειωμένη ενεργειακή απόδοσή τους. Εμφανώς λοιπόν, τα πλωτά φωτοβολταϊκά ψύχονται καλύτερα από το χαμηλότερο θερμοκρασιακό περιβάλλον και το αιολικό δυναμικό της θάλασσας, διατηρώντας τη θερμοκρασία τους χαμηλότερη από αυτή των χερσαίων. Συμπερασματικά, αυτό οδηγεί και στην καλύτερη ενεργειακή απόδοση των πλωτών έναντι των χερσαίων φωτοβολταϊκών.

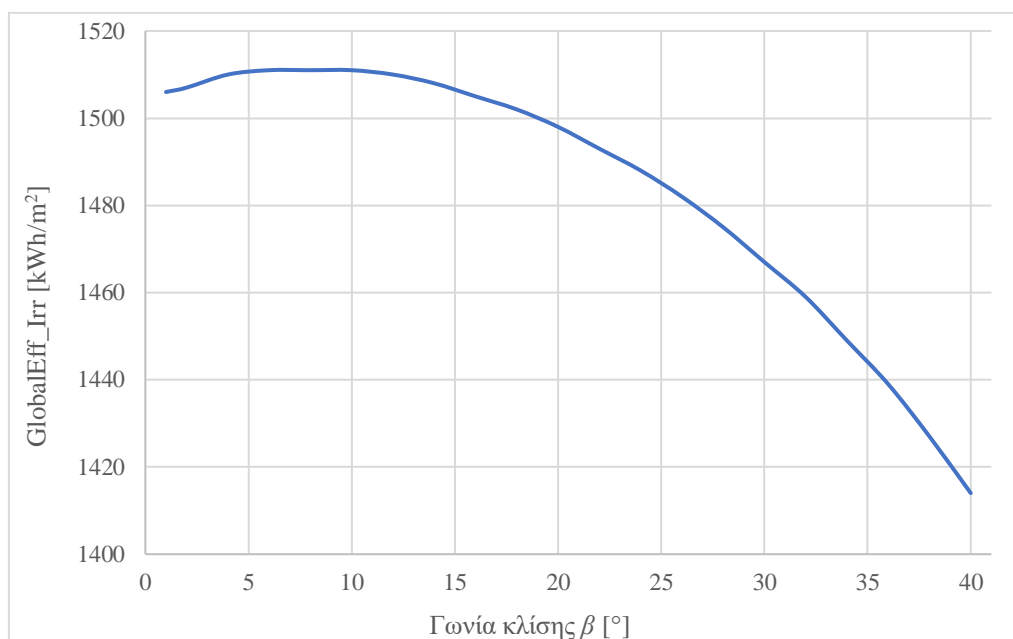


Διάγραμμα 8.16 Μεταβολές της διαφοράς θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών και περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

### 8.2.3 Λίμνη

#### Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη

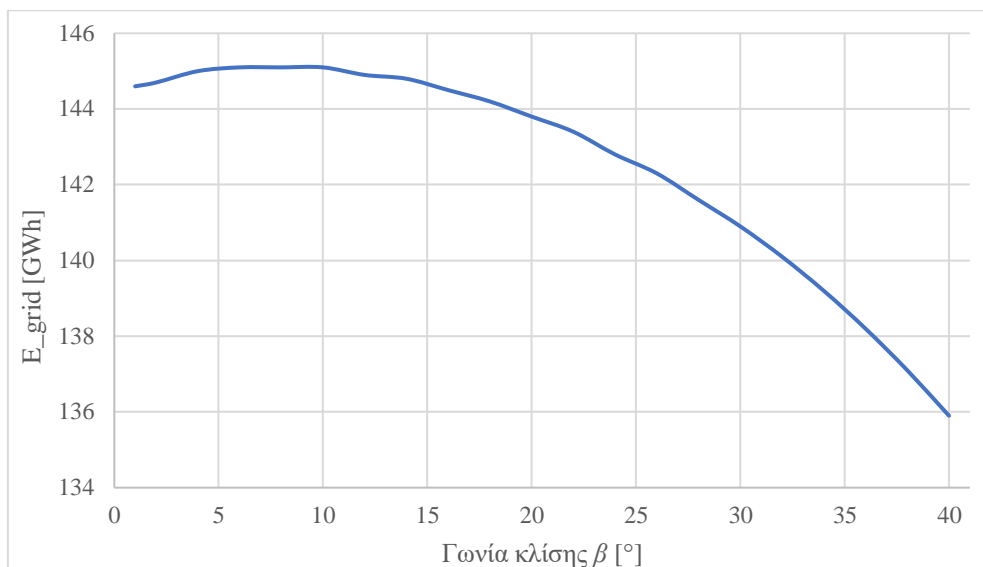
Η μεταβολή της καθαρής προσπίπτουσας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.17. Η μορφή της καμπύλης είναι και πάλι παραβολοειδής και το σημείο όπου η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται είναι τα 1511 kWh/m<sup>2</sup> υπό γωνία κλίσης συλλέκτη 6°.



Διάγραμμα 8.17 Μεταβολή της καθαρής προσπίπτουσας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης

### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια διαχεόμενη στο δίκτυο

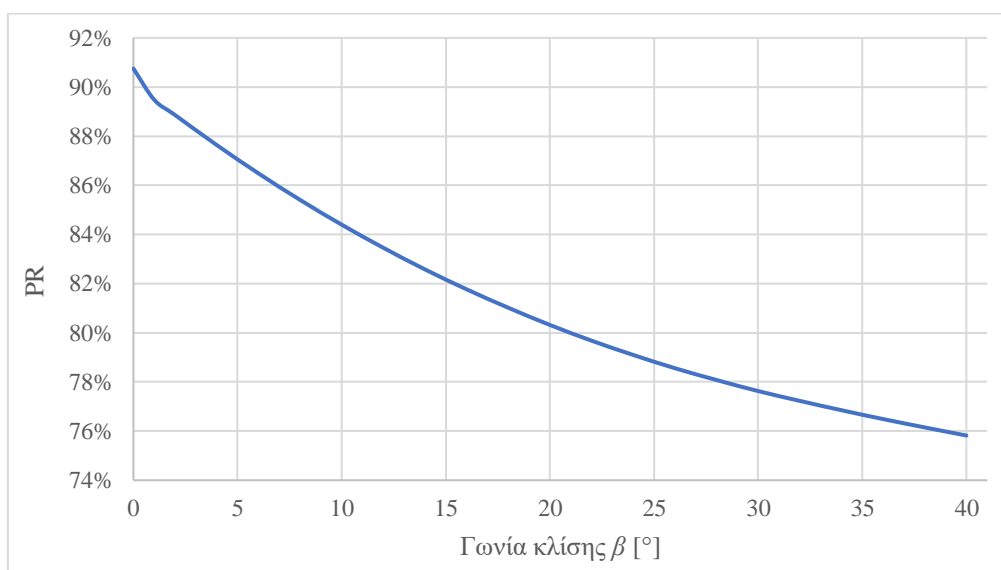
Η μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας διαχεόμενης στο δίκτυο συναρτήσει της γωνίας κλίσης των Φ/Β συλλεκτών για την περίπτωση της εγκατάστασης στην λίμνη παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.18. Ως αναμενόμενο, η καμπύλη ακολουθεί σε μορφή την καμπύλη της καθαρής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο Διάγραμμα 8.17. Στην περίπτωση της λίμνης, η βέλτιστη γωνία κλίσης, όπου παρουσιάζεται η μεγιστοποίηση τόσο της καθαρής προσπίπτουσας ακτινοβολίας όσο και της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο, είναι οι  $6^\circ$  και η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια ίση με 145.1 GWh/έτος.



Διάγραμμα 8.18 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας η οποία διαχέεται στο δίκτυο συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της λίμνης

### Λόγος απόδοσης

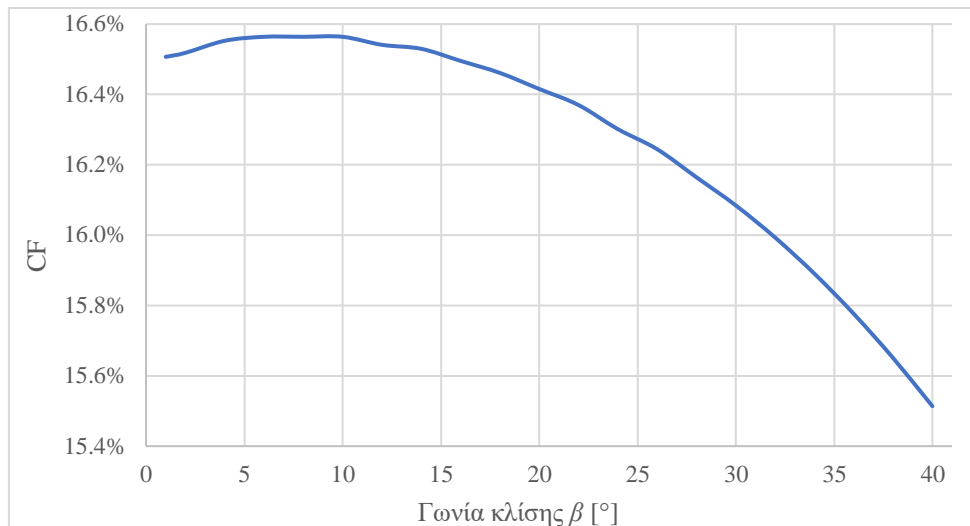
Η μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης συλλέκτη παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.19 και φθίνει καθώς η γωνία κλίσης αυξάνεται. Ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με την περίπτωση της θάλασσας.



Διάγραμμα 8.19 Μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της λίμνης

### Συντελεστής φορτίου

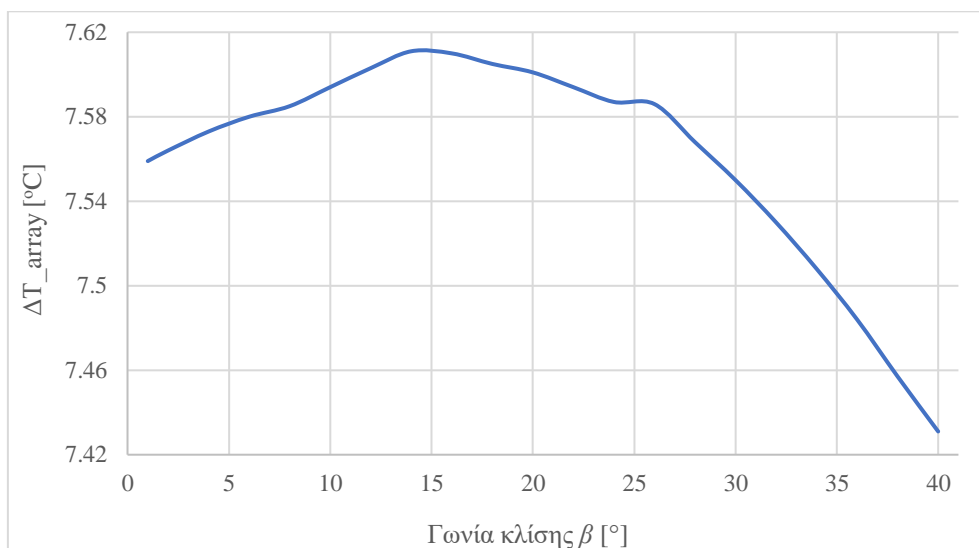
Η καμπύλη μεταβολής του CF για την περίπτωση της λίμνης απεικονίζεται πιο κάτω στο Διάγραμμα 8.20. Παρουσιάζει μέγιστη τιμή σε γωνία κλίσης  $\beta = 6^\circ$  ίση με  $CF = 16.6\%$ . Η τιμή αυτή είναι κατά 3% μικρότερη από τον συντελεστή φορτίου της πλωτής εγκατάστασης στη θάλασσα.



Διάγραμμα 8.20 Μεταβολή του συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της λίμνης

### Διαφορά θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών και θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας

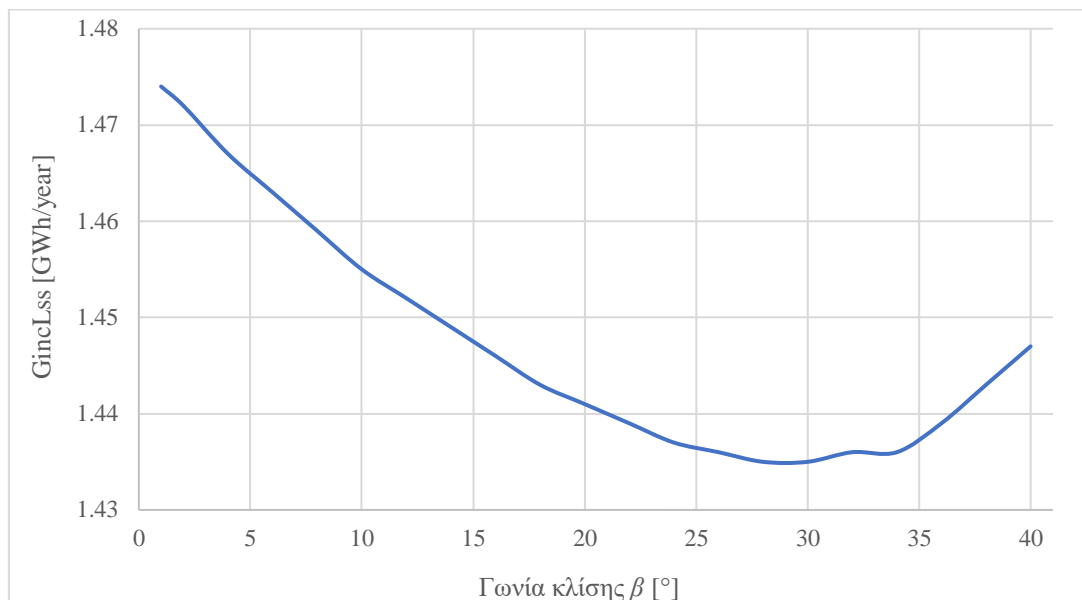
Η κατανομή της διαφοράς θερμοκρασίας των πλαισίων ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης φαίνεται στο Διάγραμμα 8.21. Η καμπύλη παρουσιάζει παραβολική συμπεριφορά, με μικρές διακυμάνσεις και η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στις  $14^\circ$ . Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη συστοιχία των πλωτών φωτοβολταϊκών της λίμνης είναι υψηλότερες από αυτές στην πλωτή εγκατάσταση της θάλασσας, καθώς οι θερμοκρασιακές διαφορές των δύο τοποθεσιών διαφέρουν κατά περίπου  $2^\circ\text{C}$  (βλ. Διάγραμμα 8.5).



Διάγραμμα 8.21 Μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας πλαισίων και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης

### Απώλειες λόγω ακτινοβολίας

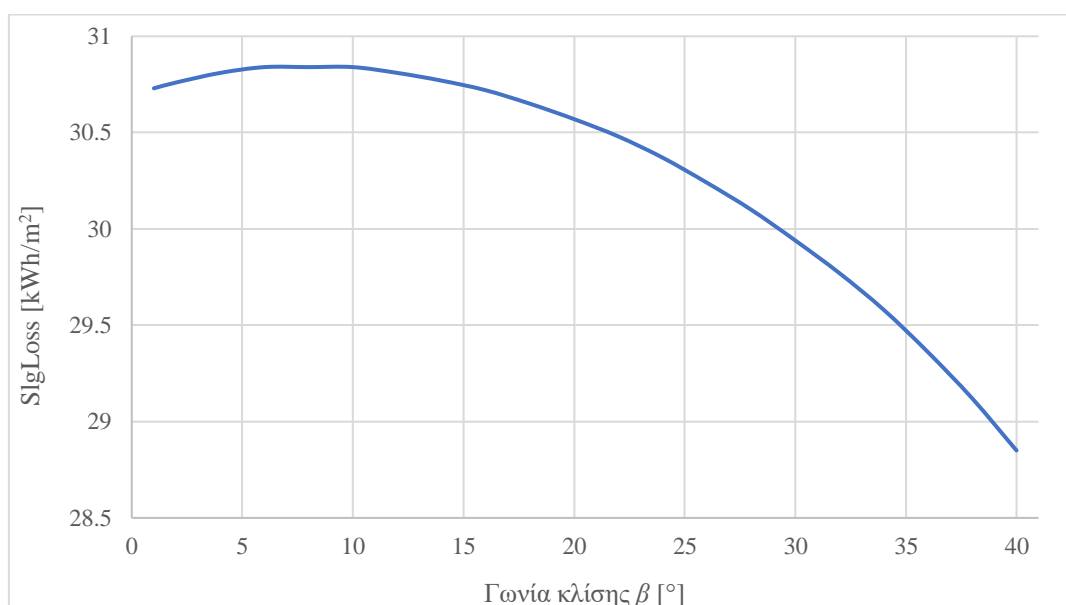
Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας στην πλωτή εγκατάσταση της λίμνης είναι σημαντικές και έχουν σχεδόν ίδιες τιμές με αυτές στη θάλασσα. Στο Διάγραμμα 8.22 παρουσιάζεται η κατανομή τους συναρτήσει της γωνίας κλίσης του συλλέκτη. Η κατανομή μειώνεται, με μερικές διακυμάνσεις, καθώς η γωνία κλίσης αυξάνεται, μέχρι τις  $30^\circ$  όπου εμφανίζει ελάχιστη τιμή ίση με  $1.44 \text{ GWh/year}$  και έπειτα αυξάνεται.



Διάγραμμα 8.22 Κατανομή των απωλειών ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης

### Απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης

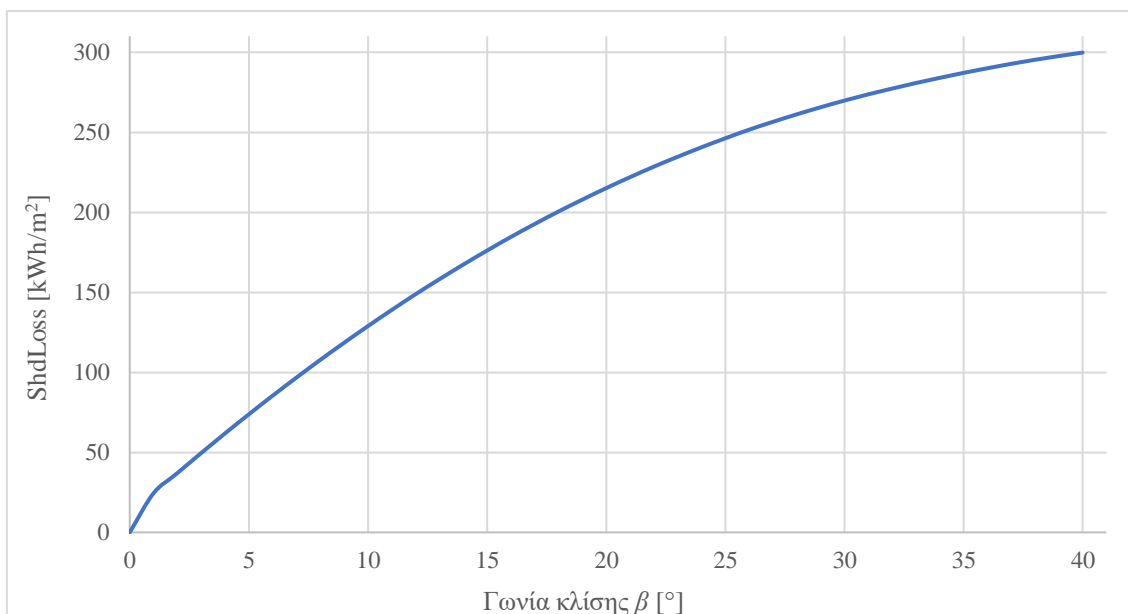
Η κατανομή των απωλειών λόγω κατακαθίσεων και σκόνης στα πλαίσια παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.23 και η μορφή της τους ακολουθεί την κατανομή της παραγόμενης ενέργειας (Διάγραμμα 8.18) με μέγιστη τιμή τις  $\beta = 6^\circ$ .



Διάγραμμα 8.23 Κατανομή των απωλειών λόγω κατακαθίσεων και σκόνης συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης

### Απώλειες λόγω σκιάσεων

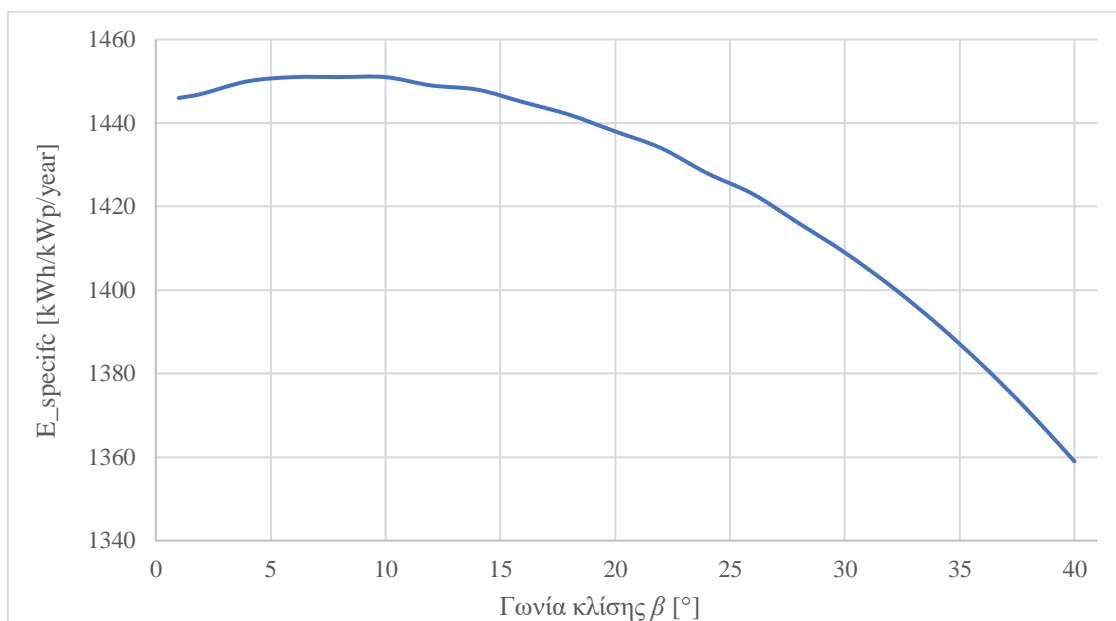
Στο Διάγραμμα 8.24 παρουσιάζεται η κατανομή των γραμμικών απωλειών σκίασης για διάφορες τιμές της γωνίας  $\beta$ . Η μορφή της κατανομής είναι παρόμοια με του Διάγραμμα 8.8 της περίπτωσης της θάλασσας όμως οι τιμές είναι μικρότερες.



Διάγραμμα 8.24 Κατανομή των απωλειών λόγω σκιάσεων συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης

### Ειδική παραγωγή ανά έτος

Η κατανομή της ειδικής παραγωγής ανά έτος για την εγκατάσταση της λίμνης, συναρτήσει της γωνίας κλίσης, ακολουθεί στο Διάγραμμα 8.25 και μεγιστοποιείται στις 6° με τιμή 1451 kWh/kWp/year.



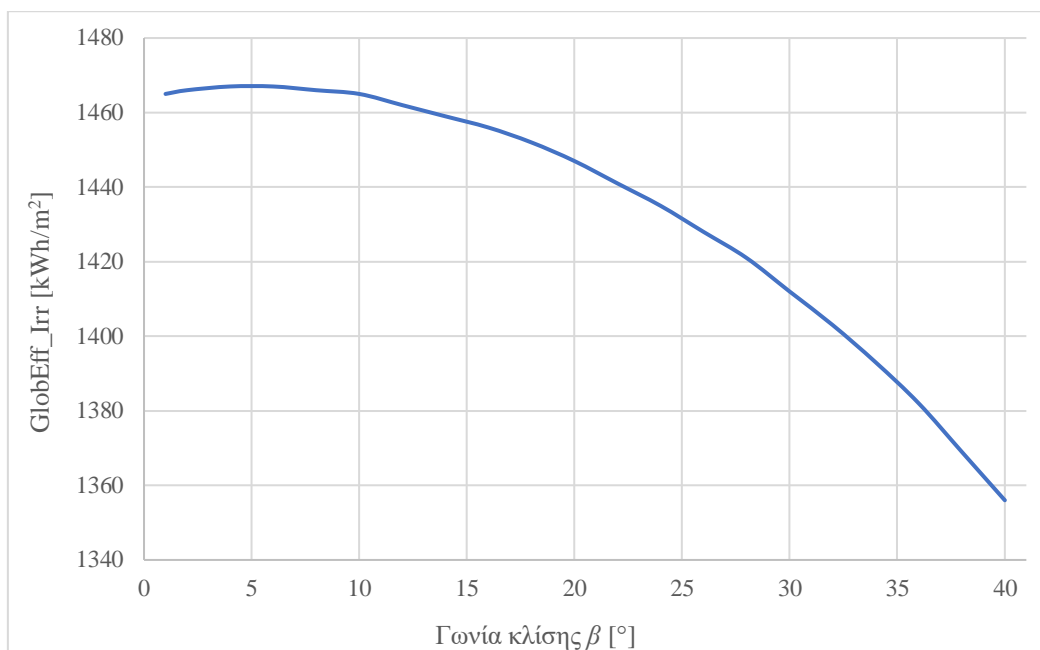
Διάγραμμα 8.25 Κατανομή της ετήσιας ειδικής παραγωγής ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης



## 8.2.4 Χερσαία τοποθεσία της περίπτωσης της λίμνης-Μοσχάτο

### Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη

Η μεταβολή της προσπίπτουσας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας στην χερσαία τοποθεσία εγκατάστασης στην περιοχή του Μοσχάτου, αναλόγως της γωνίας κλίσης των συλλεκτών, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.26. Η μορφή της καμπύλης είναι παραβολοειδής με μέγιστη τιμή τα 1467 kWh/m<sup>2</sup> υπό γωνία κλίσης 4°, σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Η καθαρή ακτινοβολία στην πλωτή εγκατάσταση της λίμνης είναι μεγαλύτερη από του Μοσχάτου κατά περίπου 3.6%.



Διάγραμμα 8.26 Μεταβολή της καθαής προσπίπτουσα παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της χερσαίας τοποθεσίας στο Μοσχάτο

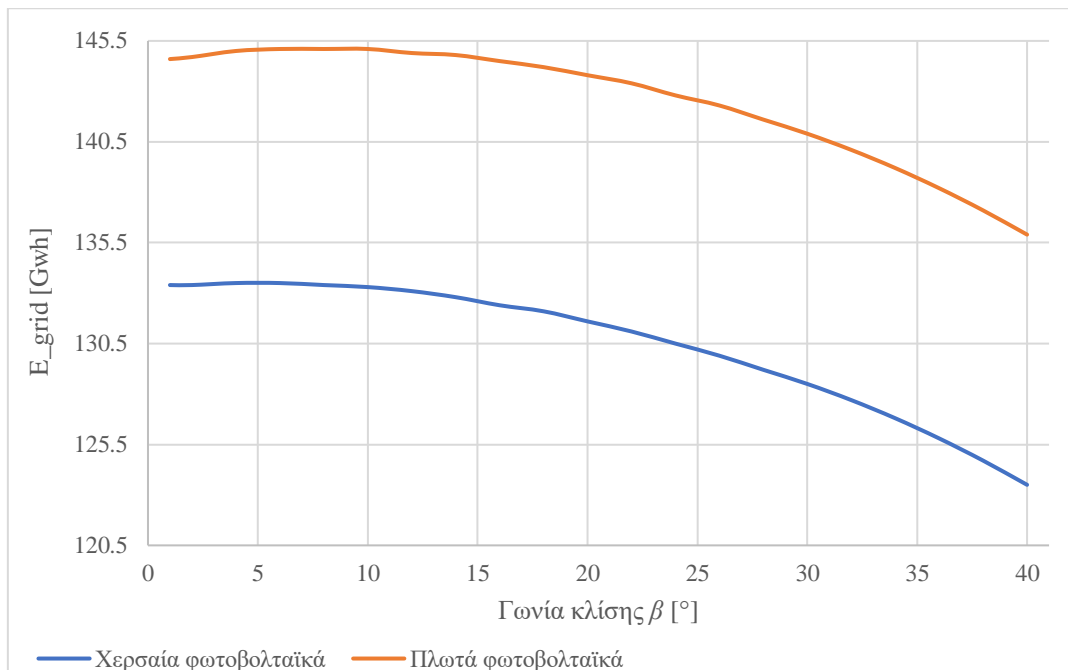
### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια διαχεόμενη στο δίκτυο

Οι μεταβολές της παραγόμενης διαχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας συναρτήσκει της γωνίας κλίσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση παρουσιάζονται συγκριτικά στο Διάγραμμα 8.27.

#### Παρατηρήσεις:

Ως αναμενόμενο, η καμπύλη της ενέργειας των χερσαίων πάνελ ακολουθεί σε μορφή την καμπύλη της καθαής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο Διάγραμμα 8.26.

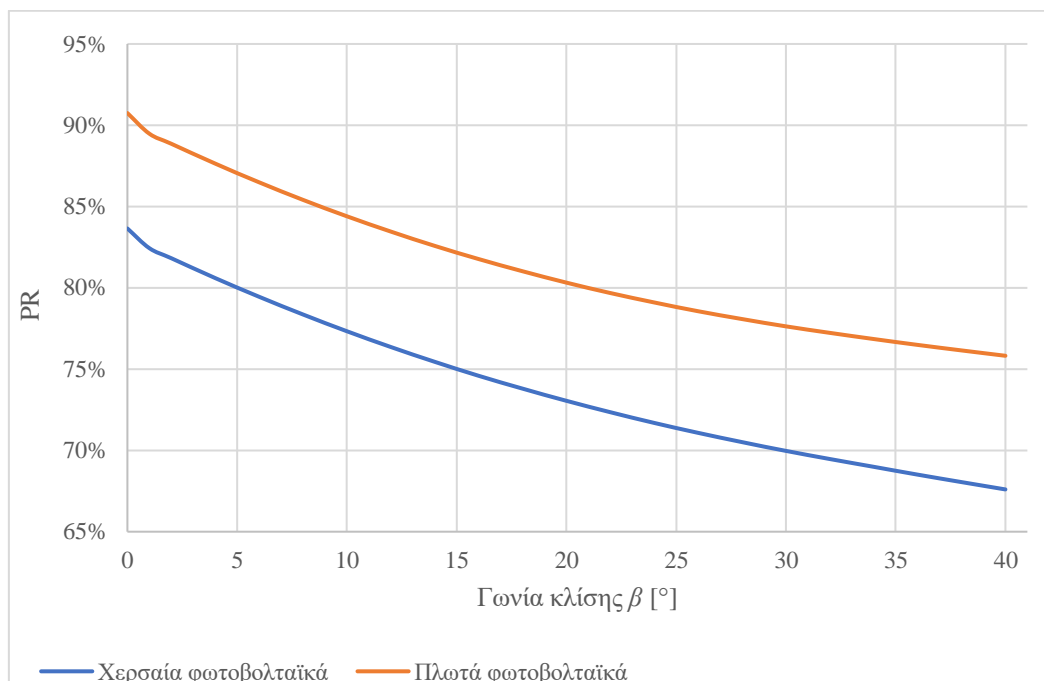
Οι δύο καμπύλες έχουν ίδια μορφή. Οι μέγιστες τιμές τους αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές κλίσης γωνίας β. Η μέγιστη τιμή στην περίπτωση των πλωτών συλλεκτών είναι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι ίση με 145.1 GWh και γωνία κλίσης 6°, ενώ των χερσαίων είναι ίση με 133.5 GWh για γωνία κλίσης 4°. Έτσι, η παραγόμενη ετήσια ενέργεια η οποία διαχέεται στο δίκτυο είναι μικρότερη κατά 8% στη χερσαία εγκατάσταση σε σχέση με την πλωτή.



Διάγραμμα 8.27 Μεταβολές της παραγόμενης διαχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης

### Λόγος απόδοσης

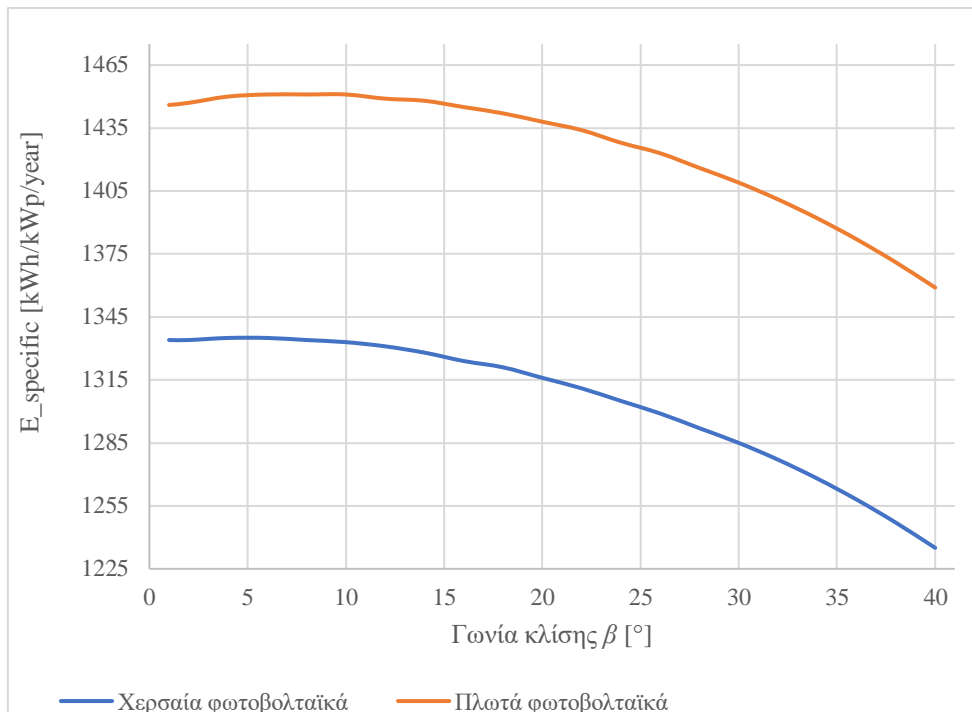
Στην περίπτωση της λίμνης, οι μεταβολές του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης συλλέκτη για τη χερσαία και την πλωτή εγκατάσταση παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.28. Οι δύο καμπύλες έχουν ίδια μορφή και μειώνονται καθώς η γωνία κλίσης αυξάνεται. Μεγαλύτερο λόγο απόδοσης εμφανίζει η πλωτή εγκατάσταση και έτσι η παραγωγή της είναι πλησιέστερη στην απόδοση σε συνθήκες STC παρά αυτή στη χερσαία εγκατάσταση και η πλωτή εγκατάσταση αποδίδει καλύτερα από τη χερσαία.



Διάγραμμα 8.28 Μεταβολές του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης

### Ειδική παραγωγή ανά έτος

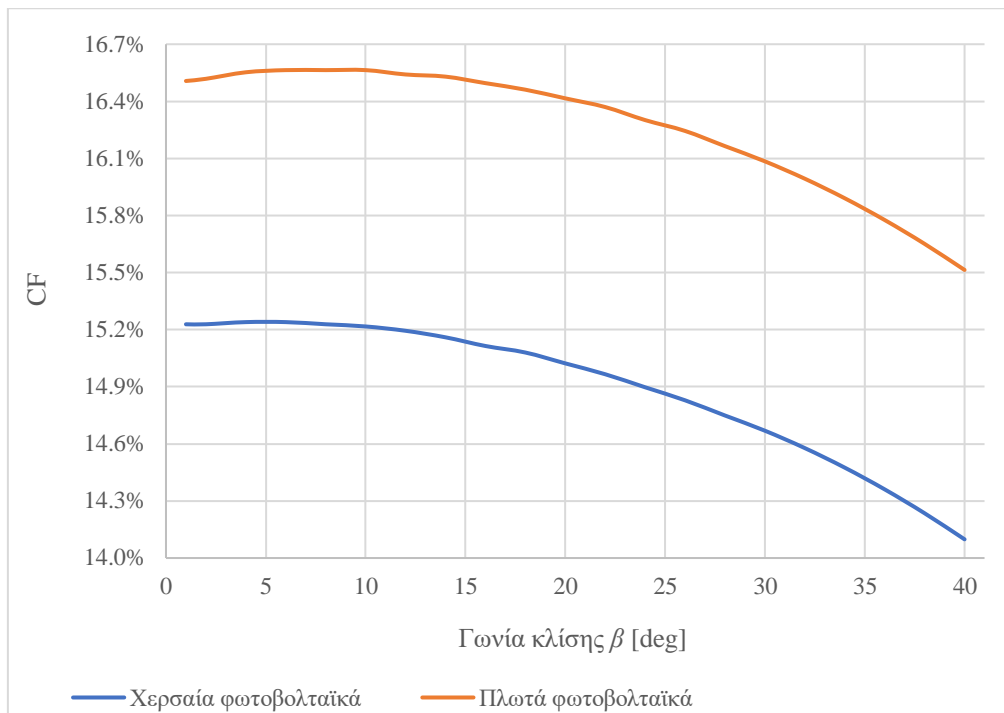
Οι καμπύλες της ετήσιας ειδικής παραγωγής ενέργειας για την πλωτή και χερσαία εγκατάσταση της λίμνης απεικονίζονται στο Διάγραμμα 8.29. Η ειδική παραγωγή ενέργειας στα χερσαία φωτοβολταϊκά υπολείπεται των πλωτών κατά περίπου 8%.



Διάγραμμα 8.29 Μεταβολές της ειδικής παραγωγής συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης

### Συντελεστής φορτίου

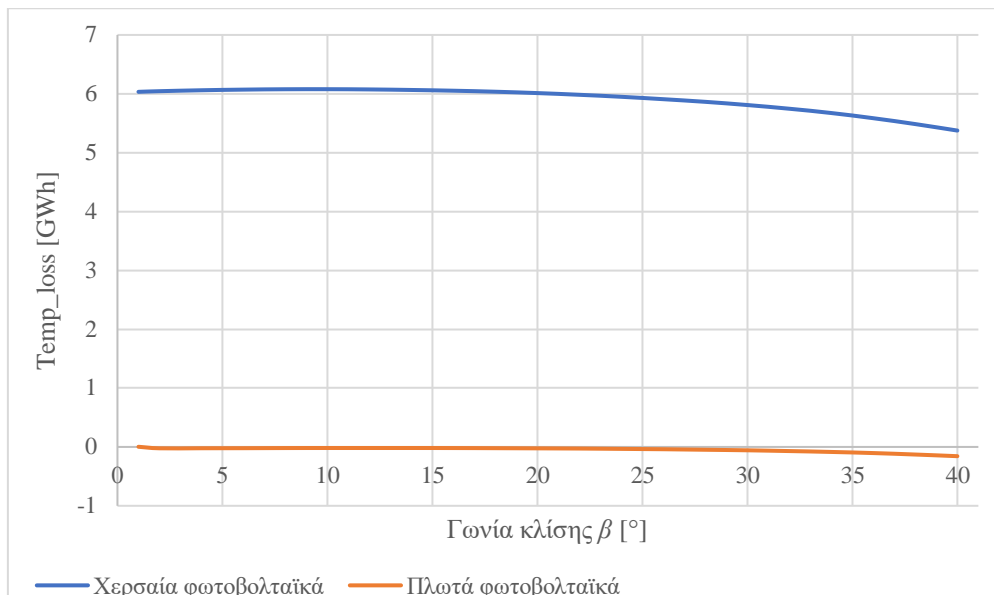
Οι καμπύλες του συντελεστή φορτίου για την πλωτή και χερσαία εγκατάσταση της λίμνης παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.30. Και πάλι, ο CF στα πλωτά φωτοβολταϊκά υπερτερεί των χερσαίων κατά περίπου 8%. Έτσι, τα πλωτά αποδίδουν κατά 8% περισσότερο από τα χερσαία σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή ονομαστική εγκατεστημένη ισχύ της εγκατάστασης.



Διάγραμμα 8.30 Μεταβολές του συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης

#### Απώλειες ενέργειας λόγω θερμοκρασίας

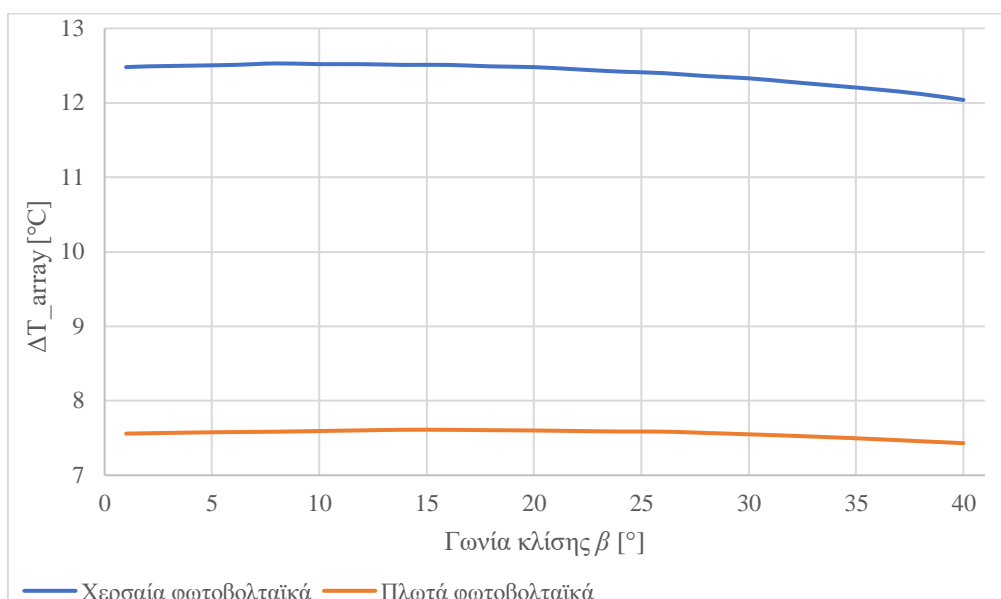
Οι μεταβολές των απωλειών λόγω θερμοκρασίας για τη χερσαία και πλωτή τοποθεσία της λίμνης, συναρτήσει της γωνίας  $\beta$ , παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.31. Είναι φανερό ότι οι απώλειες στα πλωτά φωτοβολταϊκά είναι πολύ χαμηλότερες συγκριτικά με τα χερσαία, σχεδόν μηδενικές. Για μεγάλες γωνίες ( $30^\circ$  και άνω) οι απώλειες στα πλωτά μηδενίζονται και κινούνται πολύ κοντά στο 0, με μικρές αρνητικές τιμές, τιμές που επίσης μπορεί να οφείλονται σε εσωτερικά εσφαλμένες επιλύσεις εξισώσεων του λογισμικού. Σε σύγκριση με την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας, οι απώλειες στην χερσαία εγκατάσταση του Μοσχάτου είναι μεγαλύτερες (σχεδόν διπλάσιες) από ότι στα Νέα Μεσάγκαλα, ενώ οι απώλειες στην πλωτή εγκατάσταση, ήταν πολύ μικρότερες σε σχέση με της θάλασσας, σχεδόν μηδενικές.



Διάγραμμα 8.31 Μεταβολές των απωλειών λόγω θερμοκρασίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης

#### Διαφορά θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών και θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας

Οι κατανομές της διαφοράς θερμοκρασίας των πλαισίων ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για την πλωτή και χερσαία εγκατάσταση στην λίμνη συναρτήσει της γωνίας  $\beta$  φαίνονται στο Διάγραμμα 8.32. Οι μορφές των δύο κατανομών είναι όμοιες. Παρατηρείται σχεδόν μηδενική μεταβολή τις  $28^\circ$  γωνίας  $\beta$  και έπειτα μειώνονται, με την χερσαία εγκατάσταση να μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό. Όπως και στην ανοικτή θάλασσα, οι θερμοκρασίες οι οποίες αναπτύσσονται στις συστοιχίες των πλωτών συλλεκτών είναι μικρότερες από αυτές των χερσαίων. Τα πλωτά φωτοβολταϊκά ψύχονται καλύτερα λόγω του χαμηλότερου θερμοκρασιακού περιβάλλοντος και του αιολικό δυναμικού της λίμνης. Η διαφορά των δύο καμπυλών είναι αξιοσημείωτη, ίση με  $5^\circ\text{C}$ . Αυτό συνεπάγεται και τις αυξημένες απώλειες λόγω αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στα χερσαία σε σύγκριση με τα πλωτά πάνελ, που δικαιολογεί και την μειωμένη ενεργειακή απόδοσή τους.



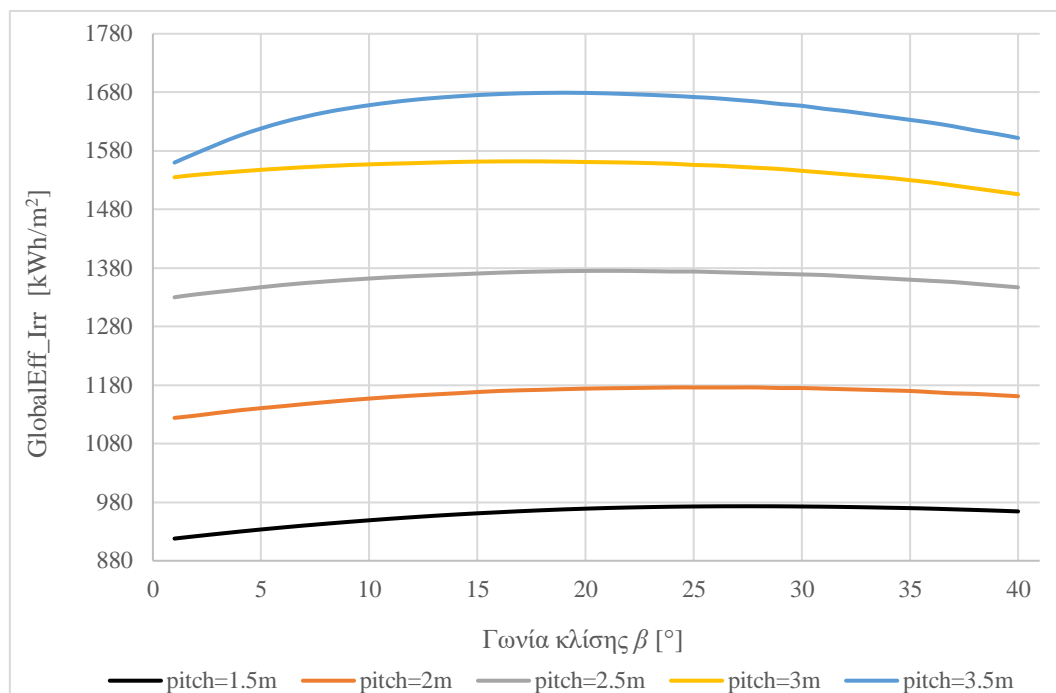
Διάγραμμα 8.32 Μεταβολές της διαφοράς θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών και περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης

## **8.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ διατάξεων με μεταβλητή γωνία κλίσης των συλλεκτών, μεταβλητή απόσταση βήματος (pitch) και σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$**

### **8.3.1 Ανοικτή θάλασσα**

#### ***Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη***

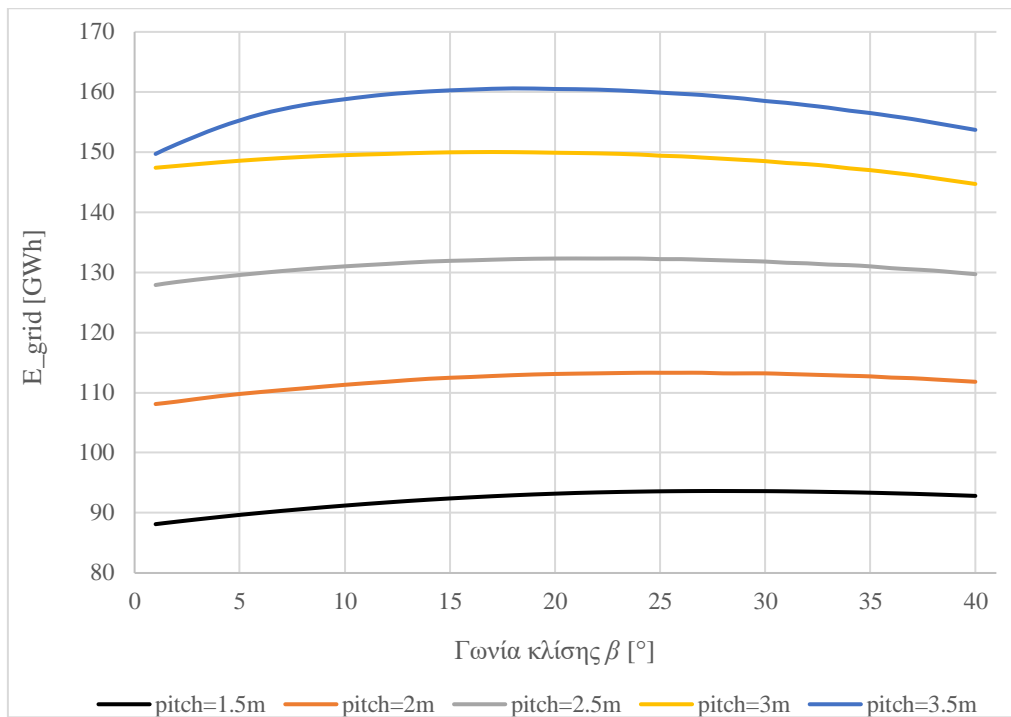
Στο Διάγραμμα 8.33 αναπαρίστανται οι καμπύλες μεταβολής της καθαρής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη για διατάξεις με διαφορετικές τιμές απόστασης βήματος για το εύρος γωνίας κλίσης  $1^\circ$  έως  $40^\circ$ . Παρατηρείται όμοια μορφή των καμπυλών για αποστάσεις βήματος από 1.5 έως 3 m, ενώ η καμπύλη με βήμα 3.5 m διαφέρει αρκετά, με μεγαλύτερες κλίσεις σε μικρές και μεγάλες γωνίες. Καθώς το βήμα αυξάνεται από 1.5 έως 3 m με βήμα 0.5 m, οι τιμές της ακτινοβολίας αυξάνονται σταθερά κατά  $200 \text{ kWh/m}^2$ . Η απόσταση όμως αυτών των τιμών μειώνεται σε απόσταση βήματος 3.5 m και οι καμπύλες για βήμα 3 m και 3.5 m πλησιάζουν μεταξύ τους. Προκύπτει έτσι ότι η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη αυξάνεται αυξανόμενης της απόστασης βήματος, λόγω της μείωσης των σκιάσεων, μέχρι όμως μια τιμή όπου μετέπειτα η μεταβολές γίνονται πιο ήπιες.



Διάγραμμα 8.33 Κατανομές της καθαρής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας κλίσης β για την περίπτωση της θάλασσας

#### ***Ετήσια παραγόμενη ενέργεια διαχεόμενη στο δίκτυο***

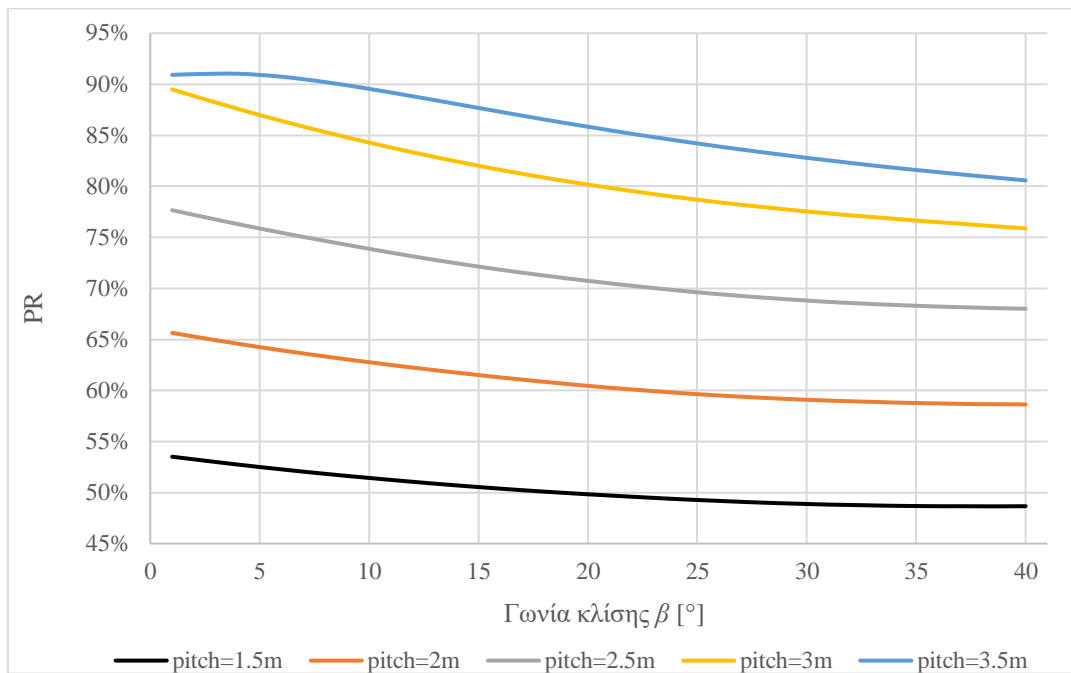
Στο Διάγραμμα 8.34 παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας η οποία διαχέεται στο δίκτυο για διάφορες τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών  $\beta$ . Εδώ ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις με την ακτινοβολία, όπου με αύξηση της απόστασης βήματος η παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται σημαντικά. Αυτό εξηγείται φυσικά από τις καμπύλες της ακτινοβολίας στο Διάγραμμα 8.33 και από τη μείωση των σκιάσεων (βλ. Διάγραμμα 8.36).



Διάγραμμα 8.34 Κατανομές της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της θάλασσας

### Λόγος απόδοσης

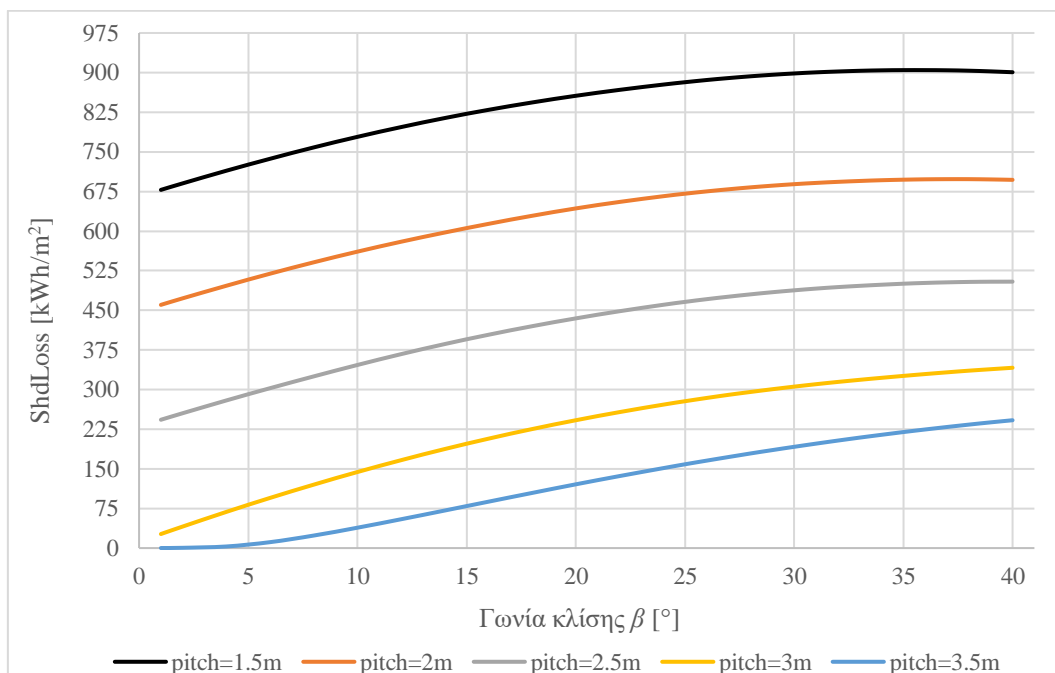
Στο Διάγραμμα 8.35 παρατηρείται ότι για αύξηση του βήματος η απόδοση της εγκατάστασης αυξάνεται σημαντικά και πλησιάζει την παραγωγή ενέργειας σε κανονικές συνθήκες STC. Εμφανώς χαμηλή απόδοση παρουσιάζει η περίπτωση του βήματος 1.5 m όπου ο λόγος απόδοσης πέφτει ακόμα και κάτω από την πολύ χαμηλή τιμή του 50%. Οι καμπύλες για 1.5 m έως 3 m έχουν ίδια μορφή ενώ η καμπύλη των 3.5 m διαφέρει, με σταθερή τιμή για γωνίες από 1° έως 5° και αυξημένη αρνητική κλίση με σχεδόν γραμμική συμπεριφορά για γωνίες μέχρι 40°.



Διάγραμμα 8.35 Κατανομές του λόγου απόδοσης για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της θάλασσας

### Απώλειες λόγω σκίασης

Εφόσον οι απώλειες λόγω σκίασης συμπεριλαμβάνουν τις αμοιβαίες απώλειες μεταξύ των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών, είναι αναμενόμενο πως με την αύξηση της απόστασης βήματος, οι απώλειες λόγω σκίασης μειώνονται σημαντικά. Αυτό γίνεται αντιληπτό και στο Διάγραμμα 8.36 όπου με την αύξηση της απόστασης βήματος οι απώλειες αυτές μειώνονται με γρήγορο ρυθμό και χαρακτηριστικά για αύξηση βήματος κατά 1 m (από 1.5 m σε 2.5 m) οι απώλειες μειώνονται κατά 50%.

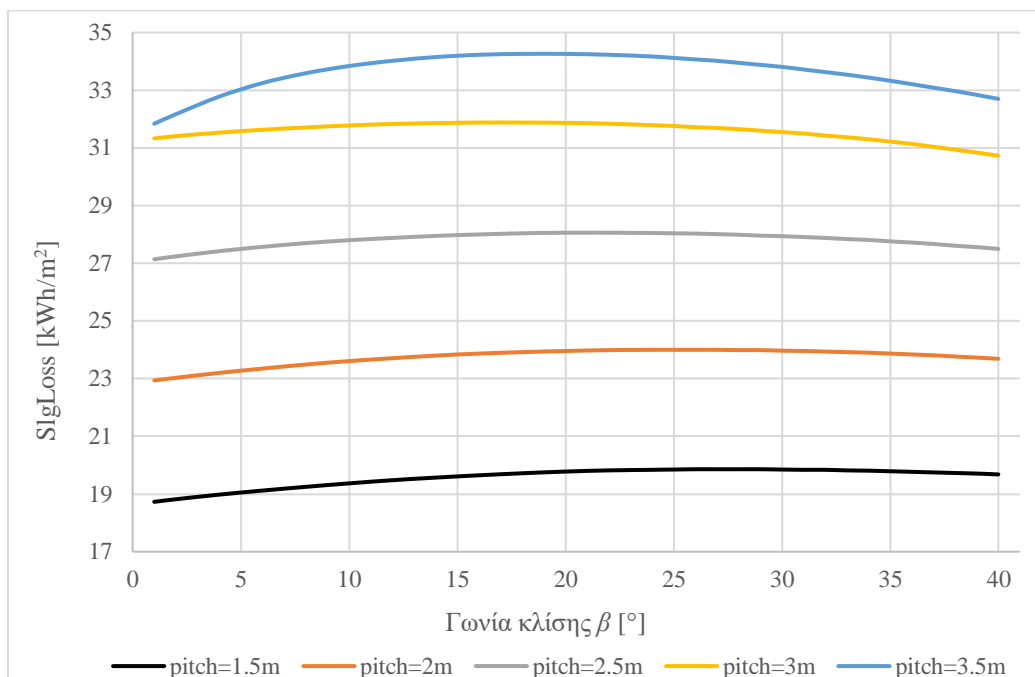


Διάγραμμα 8.36 Κατανομές των απωλειών λόγω σκιάσεων για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της θάλασσας



### Απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης

Οι απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης συναρτήσκει της γωνίας κλίσης των πλαισίων για διάφορες τιμές απόστασης βήματος παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.37. Όσο η απόσταση μεταξύ των σειρών των συλλεκτών αυξάνεται, οι απώλειες λόγω σκόνης και διάφορων κατακαθίσεων πληθαίνουν. Αυτό είναι λογικό μιας και σε μικρές αποστάσεις μεταξύ των σειρών, οι σειρές οι οποίες πρώτες εκτίθενται στον άνεμο δρουν ως «κάλυμμα» προστασίας για τις πίσω σειρές με αποτέλεσμα λιγότερη σκόνη να κατακάθεται σε όλα τα πλαίσια της εγκατάστασης συνολικά.

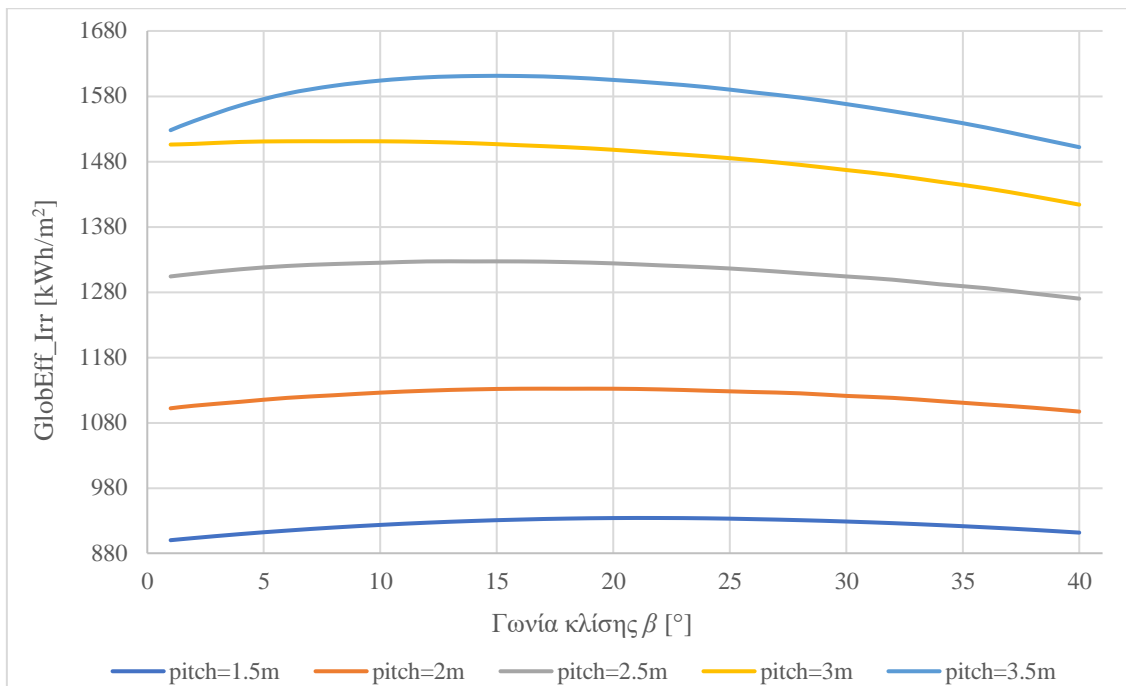


Διάγραμμα 8.37 Κατανομές των απωλειών λόγω κατακαθίσεων για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσκει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της θάλασσας

### 8.3.2 Λίμνη

#### Καθαρή προσπίπτουσα παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη

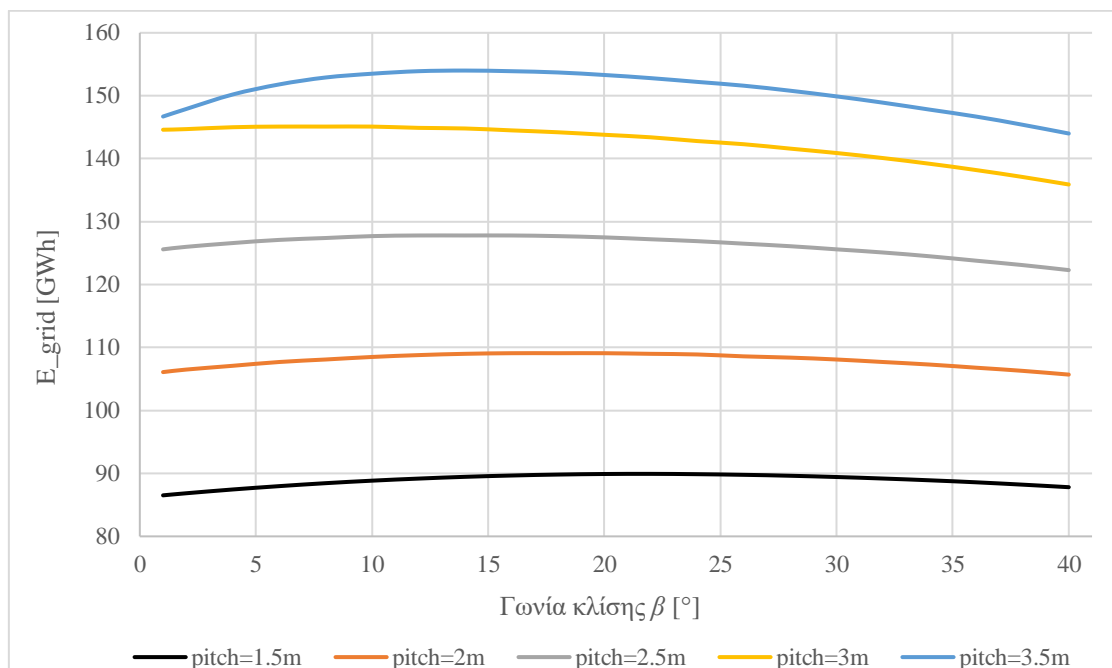
Στο Διάγραμμα 8.38 αναπαρίστανται, αντίστοιχα για την λίμνη, οι καμπύλες μεταβολής της καθαρής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στους συλλέκτες για διαφορετικές τιμές απόστασης βήματος συναρτήσκει γωνίας κλίσης. Ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις με την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας όσον αφορά τη μορφή των καμπυλών για τις διάφορες τιμές των αποστάσεων βήματος. Ομοίως πάλι, καθώς το βήμα αυξάνεται από 1.5 έως 3 m με βήμα 0.5 m, οι τιμές της ακτινοβολίας αυξάνονται σταθερά κατά 200 kWh/m<sup>2</sup>. Η απόσταση όμως αυτών των τιμών μειώνεται σε απόσταση βήματος 3.5 m και οι καμπύλες για βήμα 3 m και 3.5 m πλησιάζουν μεταξύ τους. Συμπεραίνεται έτσι ότι η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη αυξάνεται αυξανόμενης της απόστασης βήματος μέχρι όμως μια τιμή, μετά την οποία οι μεταβολές γίνονται πιο ήπιες.



Διάγραμμα 8.38 Κατανομές της καθαρής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης

### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια διαχεόμενη στο δίκτυο

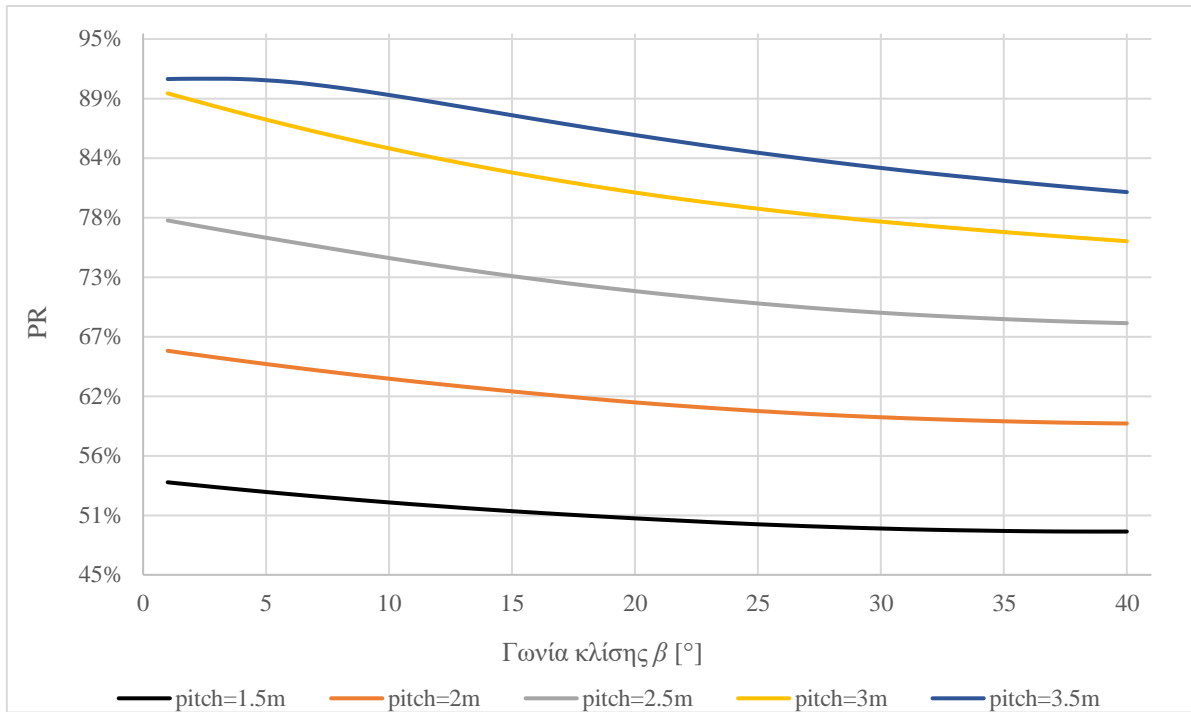
Στο Διάγραμμα 8.39 παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας που διαχέεται στο δίκτυο για διάφορες τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών β. Όσο η απόσταση βήματος αυξάνεται, η παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται επίσης σημαντικά και ρόλο έχουν οι καμπύλες της καθαρής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη (βλ. Διάγραμμα 8.38) και από τη μείωση των σκιάσεων (βλ. Διάγραμμα 8.41).



Διάγραμμα 8.39 Κατανομές της παραγόμενης ενέργειας η οποία διαχέεται στο δίκτυο για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης

### Λόγος απόδοσης

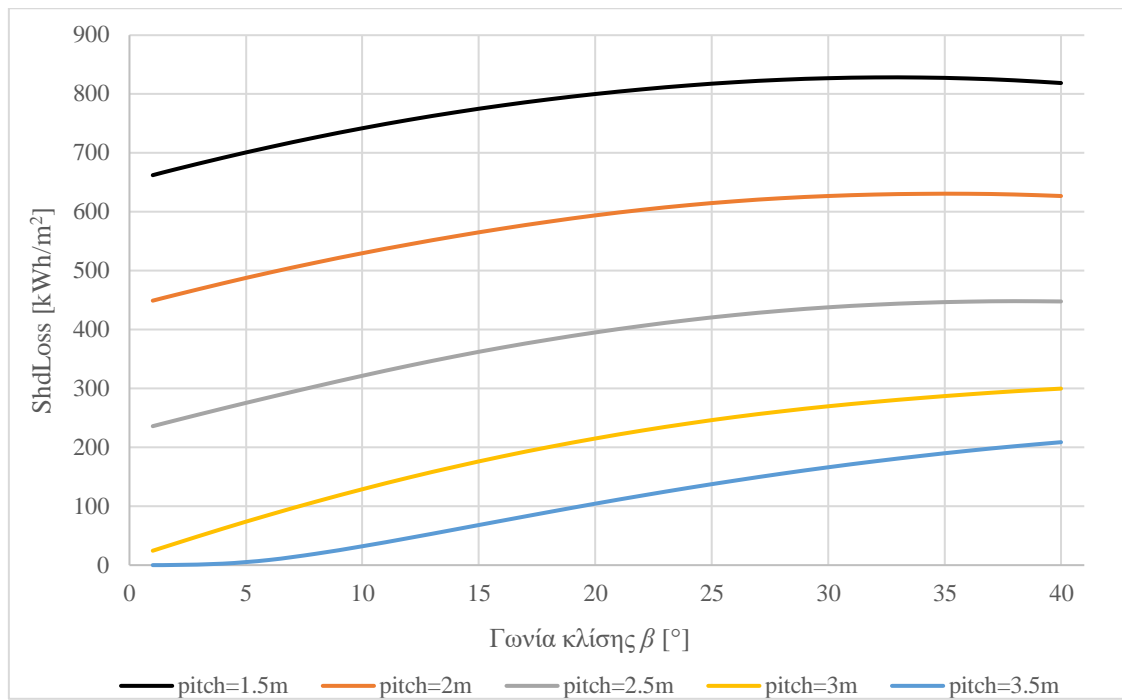
Το Διάγραμμα 8.40 περιλαμβάνει τις καμπύλες μεταβολής του λόγου απόδοσης για την λίμνη, μεταβαλλόμενων της απόστασης βήματος και της γωνίας κλίσης. Ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με την περίπτωση της θάλασσας.



Διάγραμμα 8.40 Κατανομές του λόγου απόδοσης για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης

### Απώλειες λόγω σκίασης

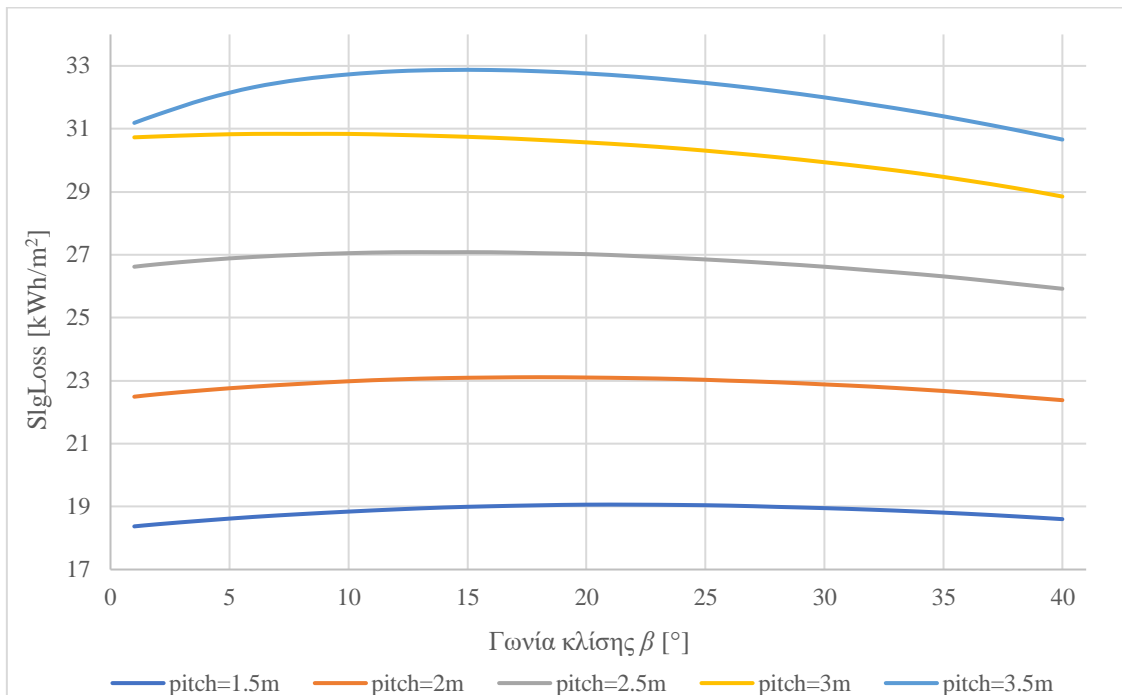
Στο Διάγραμμα 8.41 απεικονίζονται οι κατανομές των απωλειών λόγω σκίασης για διάφορες τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης. Η αύξηση της απόστασης βήματος προκαλεί μείωση των απωλειών με γρήγορο ρυθμό και χαρακτηριστικά για αύξηση βήματος κατά 1.5 m (από 1.5 m σε 3 m) οι τιμές τους μειώνονται κατά 75%.



Διάγραμμα 8.41 Κατανομές των απωλειών λόγω σκίασης για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης

#### Απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης

Οι απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης για την περίπτωση της λίμνης παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.42. Τα ίδια συμπεράσματα με την ανοικτή θάλασσα προκύπτουν και εδώ, όπου αυξανόμενη της απόστασης μεταξύ των σειρών των συλλεκτών αυξάνεται, οι απώλειες λόγω σκόνης και κατακαθίσεων πληθαίνουν.



Διάγραμμα 8.42 Κατανομές των απωλειών λόγω κατακαθίσεων για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης

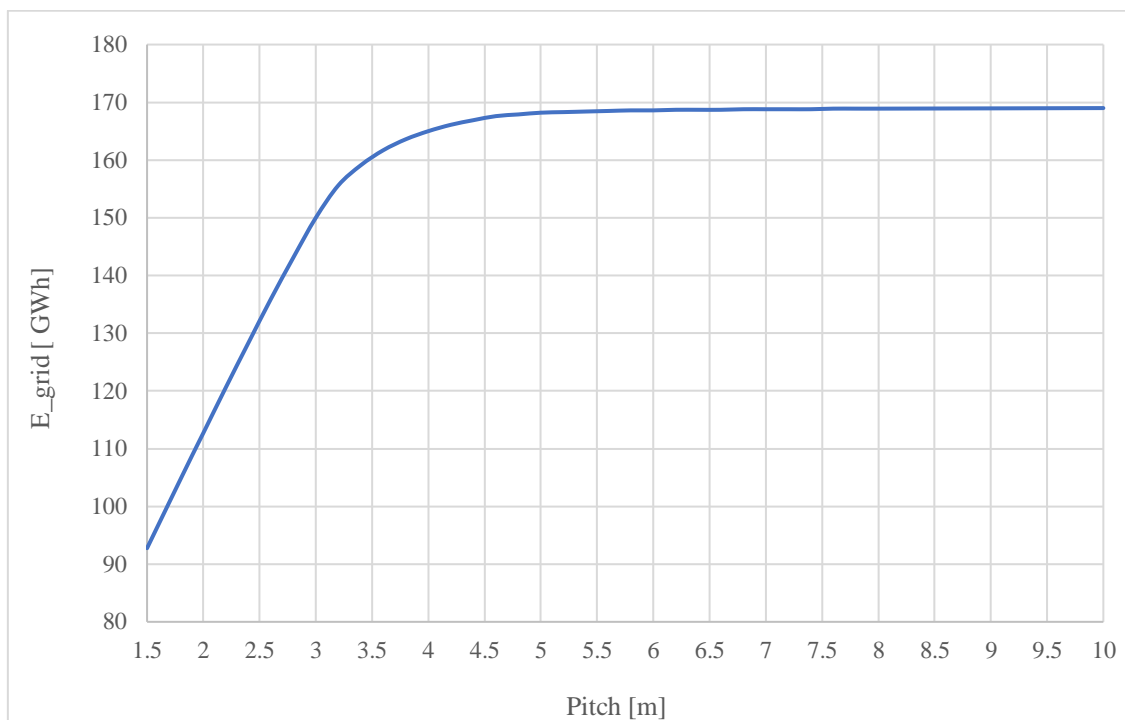
## 8.4 ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ διατάξεων με σταθερή γωνία κλίσης συλλεκτών, μεταβλητή απόσταση βήματος (pitch) και σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$

### 8.4.1 Ανοικτή θάλασσα

*Μέρος 1<sup>ο</sup>: Μεταβολή της απόστασης βήματος με σταθερή και βέλτιστη τιμή της γωνίας κλίσης από το 1<sup>ο</sup> Σενάριο*

#### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια που διαχέεται στο δίκτυο

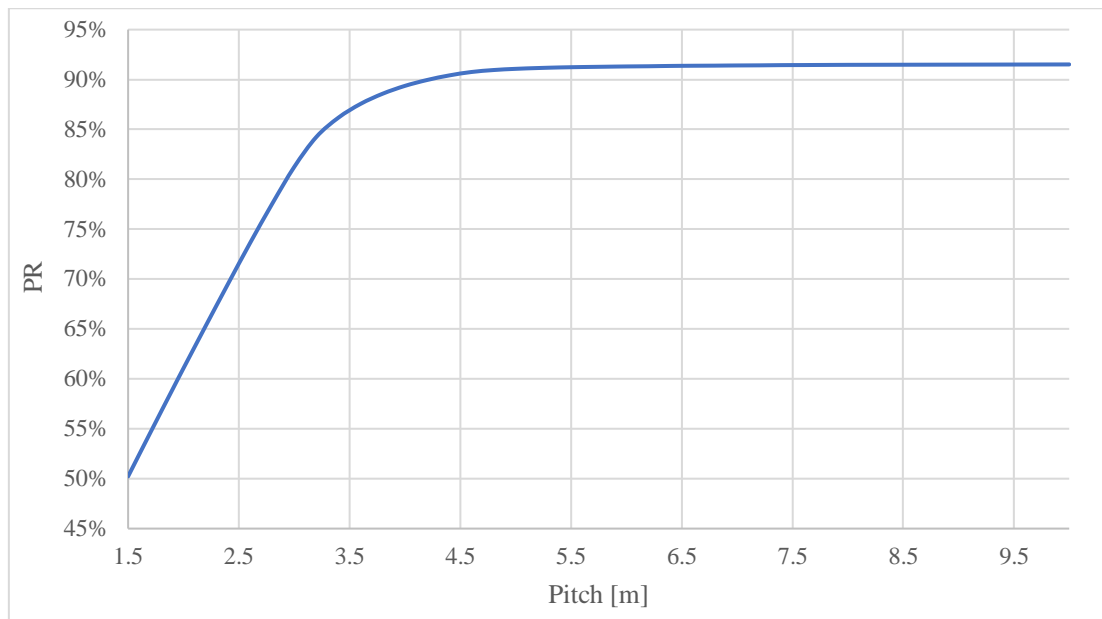
Το Διάγραμμα 8.43 απεικονίζει τη μεταβολή της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο για γωνία κλίσης συλλεκτών ίση με  $\beta = 17^\circ$  για μεταβαλλόμενη απόσταση βήματος μεταξύ των σειρών των πλαισίων. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, αύξηση του βήματος απόστασης προκαλεί αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από το Φ/Β πάρκο μέχρι μιας τιμής βήματος, όπου περαιτέρω αύξηση της απόστασης δεν μεταβάλλει την παραγόμενη ενέργεια. Αυτή η τιμή είναι περίπου στα 5.5 m όπου η μέγιστη ενέργεια είναι ίση με 168.2 GWh. Με την αύξηση της απόστασης βήματος, οι σκιάσεις λόγω των ίδιων των πλαισίων μειώνονται και στα 5.5 m αυτές μηδενίζονται, και έτσι όσο και να αυξάνεται παραπάνω η απόσταση μεταξύ τους, η παραγωγή παραμένει σταθερή.



Διάγραμμα 8.43 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας που διατίθεται στο δίκτυο συναρτήσει του βήματος για γωνία κλίσης  $\beta = 17^\circ$  για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

#### Λόγος απόδοσης

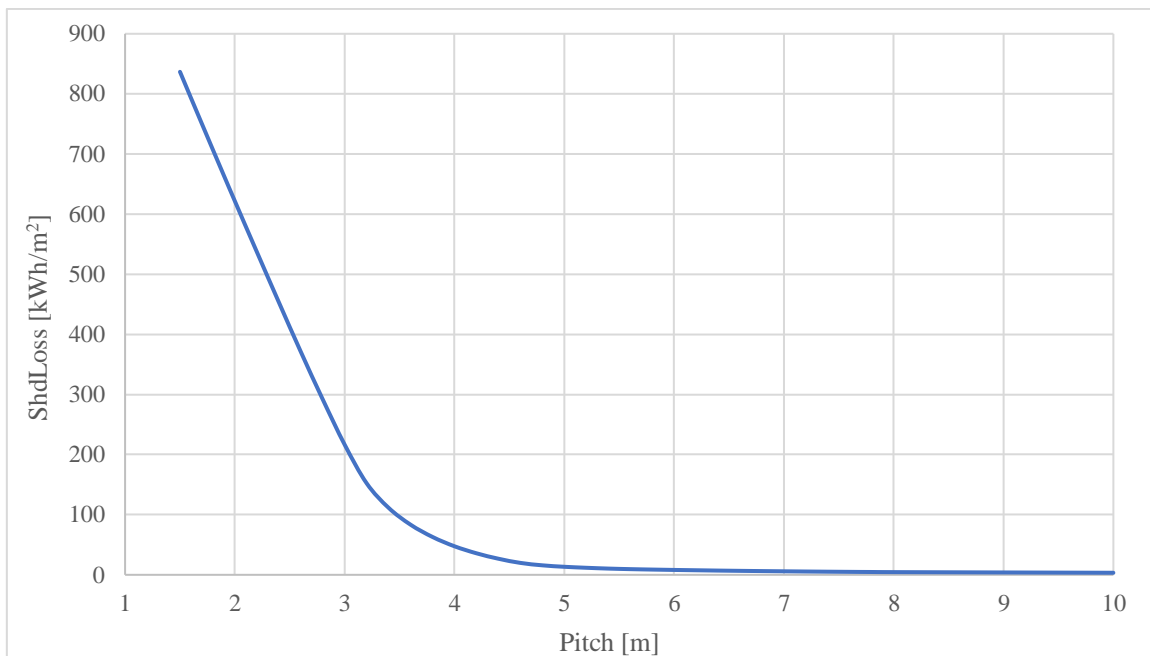
Το Διάγραμμα 8.44 παρουσιάζει τη μεταβολή του λόγου απόδοσης για διάφορες τιμές της απόστασης βήματος για την εγκατάσταση στη θάλασσα. Όσον αφορά τη μορφή της καμπύλης, ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με το προηγούμενο διάγραμμα της ενέργειας. Η κρίσιμη τιμή της απόστασης βήματος όπου σταθεροποιείται ο λόγος απόδοσης είναι πάλι τα 5.5 m και η τιμή του PR = 91%.



Διάγραμμα 8.44 Μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει του απόστασης βήματος για γωνία κλίσης  $\beta = 17^\circ$  για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

### Απώλειες λόγω σκιάσεων

Οι απώλειες λόγω σκιάσεων συναρτήσει της απόστασης βήματος απεικονίζονται στο Διάγραμμα 8.45. Πράγματι, όπως αναφέρθηκε και στην παραγόμενη ενέργεια, στην απόσταση 5.5 m οι απώλειες μηδενίζονται και μετά από αυτή την απόσταση τα πλαίσια πλέον δεν προκαλούν σκιάσεις το ένα στο άλλο.

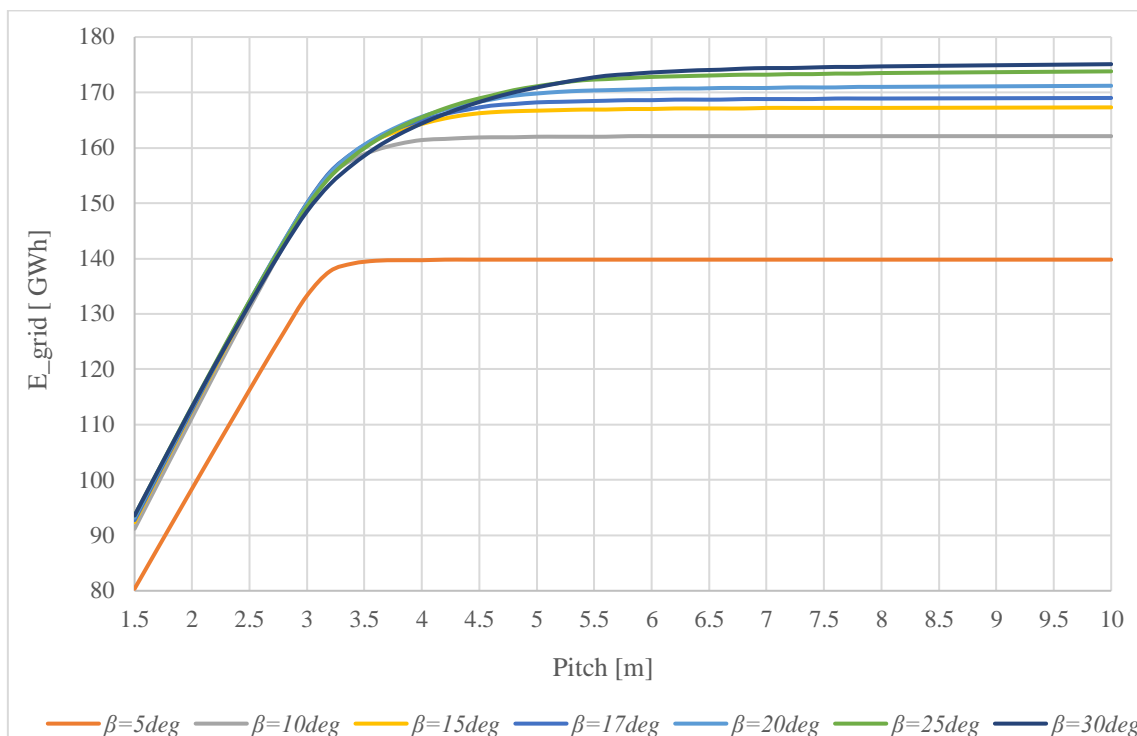


Διάγραμμα 8.45 Μεταβολή των απωλειών σκίασης συναρτήσει του απόστασης βήματος για γωνία κλίσης  $\beta = 17^\circ$  για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

## Μέρος 2<sup>ο</sup>: Μεταβολή της απόστασης βήματος για διάφορες τιμές της γωνίας κλίσης

### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια η οποία διαχέεται στο δίκτυο

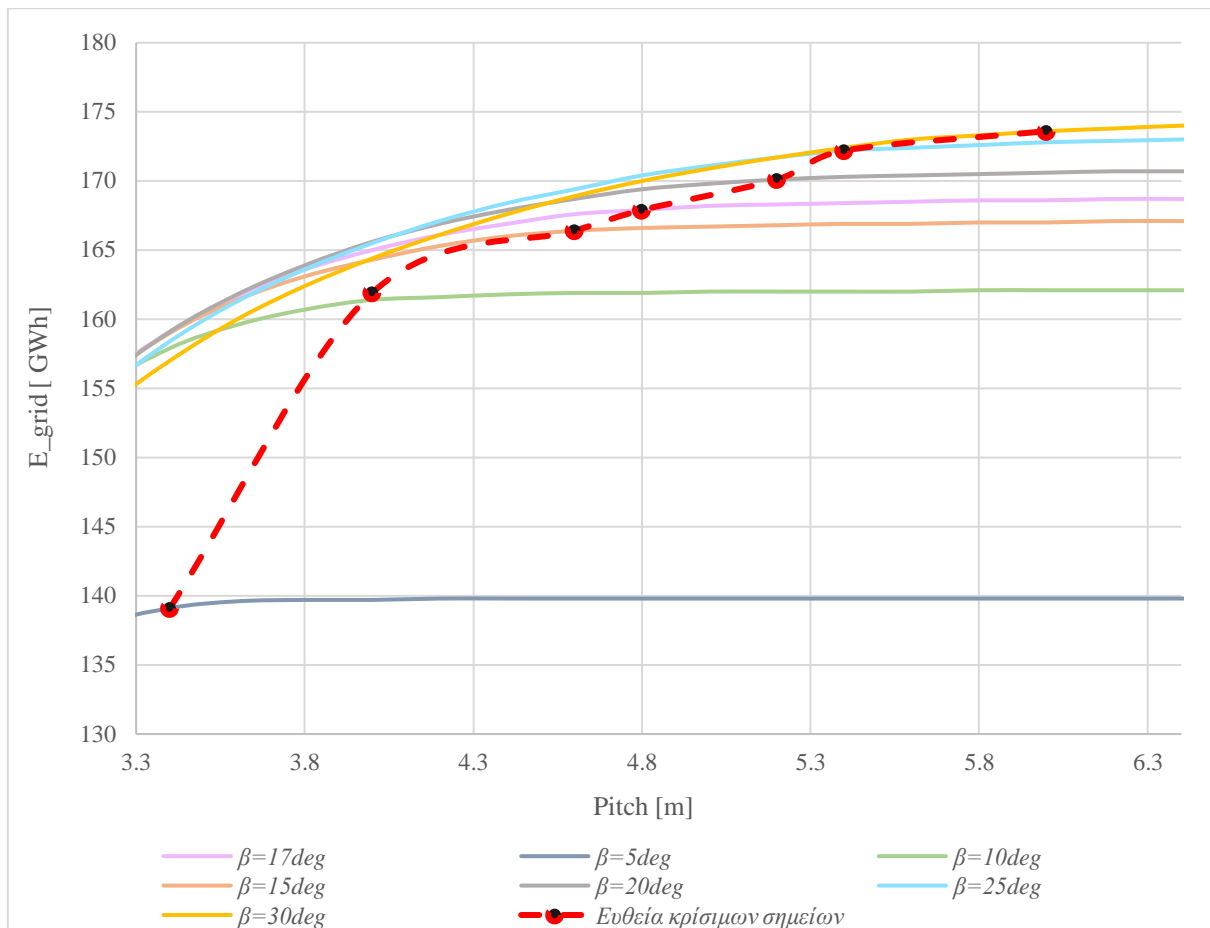
Οι καμπύλες της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας που διαχέεται στο δίκτυο συναρτήσει της απόστασης βήματος – pitch για διάφορες τιμές της γωνίας κλίσης των πλαισίων παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.46. Οι καμπύλες φέρουν την ίδια μορφή με την καμπύλη της ενέργειας για κλίση 17° (Διάγραμμα 8.43). Για κάθε απόσταση βήματος μπορεί να βρεθεί η γωνία κλίσης στην οποία τα πλαίσια παράγουν τη μέγιστη ενέργεια. Χαρακτηριστικά επιβεβαιώνεται και για το 1<sup>ο</sup> σενάριο, πως για απόσταση βήματος 3 m η γωνία των 17° έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Παρατηρείται επίσης πως η καμπύλη των 5° απέχει σημαντικά από όλες τις υπόλοιπες. Η μικρή γωνία κλίσης αυτή, έχει αρκετά χαμηλότερη ενεργειακή παραγωγή.



Διάγραμμα 8.46 Μεταβολές της παραγόμενης ενέργειας που διατίθεται στο δίκτυο συναρτήσει του βήματος απόστασης (pitch) για γωνίες κλίσης  $\beta = 5, 10, 17, 15, 20, 25, 30^\circ$  για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας

### **Καμπύλη κρίσιμων σημείων**

Έχοντας ορίσει, στο Κεφάλαιο 7.4, τα κρίσιμα σημεία, η καμπύλη των κρίσιμων σημείων παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.47. Η καμπύλη αυτή συνδέει τα κρίσιμα σημεία για κάθε καμπύλη ενέργειας μιας τιμής γωνίας κλίσης. Παρατηρείται αυξανόμενη τάση της καμπύλης σε αύξηση της απόστασης βήματος και της γωνίας κλίσης. Όσο η κλίση των συλλεκτών αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η απαιτούμενη απόσταση βήματος για σταθεροποίηση της ενέργειας. Αυτό είναι απολύτως λογικό μιας και με μεγαλύτερη κλίση αυξάνονται οι σκιάσεις μεταξύ των πλαισίων, οπότε για να εκμηδενιστούν οι σκιάσεις χρειάζονται μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους.



Διάγραμμα 8.47 Ευθεία κρίσιμων σημείων για την περίπτωση της θάλασσας

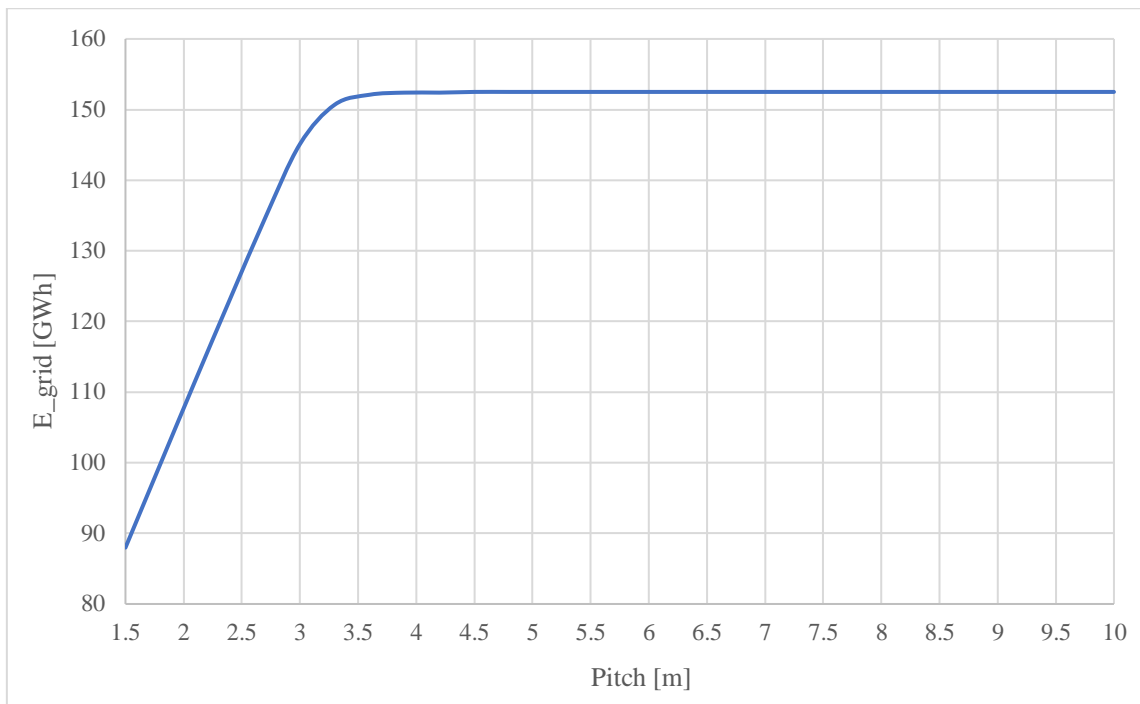
## 8.4.2 Λίμνη

**Μέρος 1<sup>ο</sup>: Μεταβολή της απόστασης βήματος με σταθερή και βέλτιστη τιμή της γωνίας κλίσης από το 1<sup>ο</sup> Σενάριο**

### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια που διαχέεται στο δίκτυο

Το Διάγραμμα 8.48 αφορά τη μεταβολή της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο για γωνία κλίσης συλλεκτών ίση με  $\beta = 6^\circ$  για μεταβαλλόμενη απόσταση βήματος μεταξύ των σειρών των πλαισίων. Ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με την ανοικτή θάλασσα και η τιμή της απόστασης βήματος όπου σταθεροποιείται η ενεργειακή παραγωγή είναι περίπου στα 3.5 m όπου η μέγιστη ενέργεια είναι ίση με 152.5 GWh.

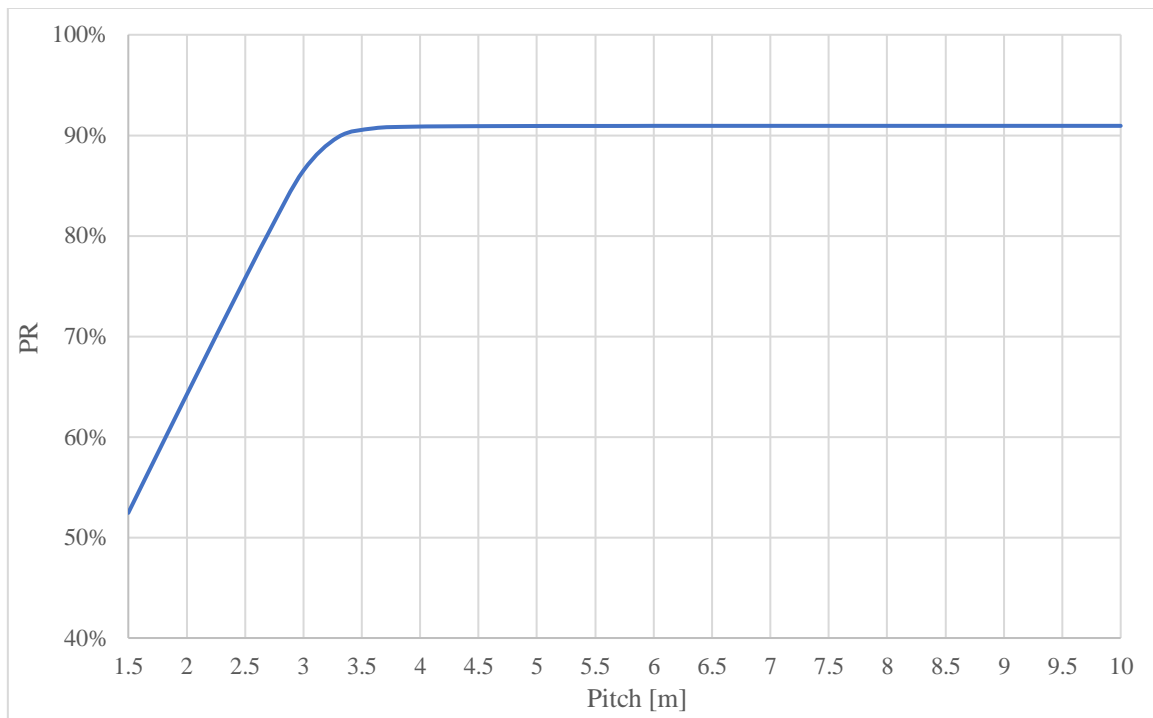




Διάγραμμα 8.48 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας που διατίθεται στο δίκτυο συναρτήσει του βήματος απόστασης για γωνία κλίσης  $\beta = 6^\circ$  για την περίπτωση της λίμνης

### Λόγος απόδοσης

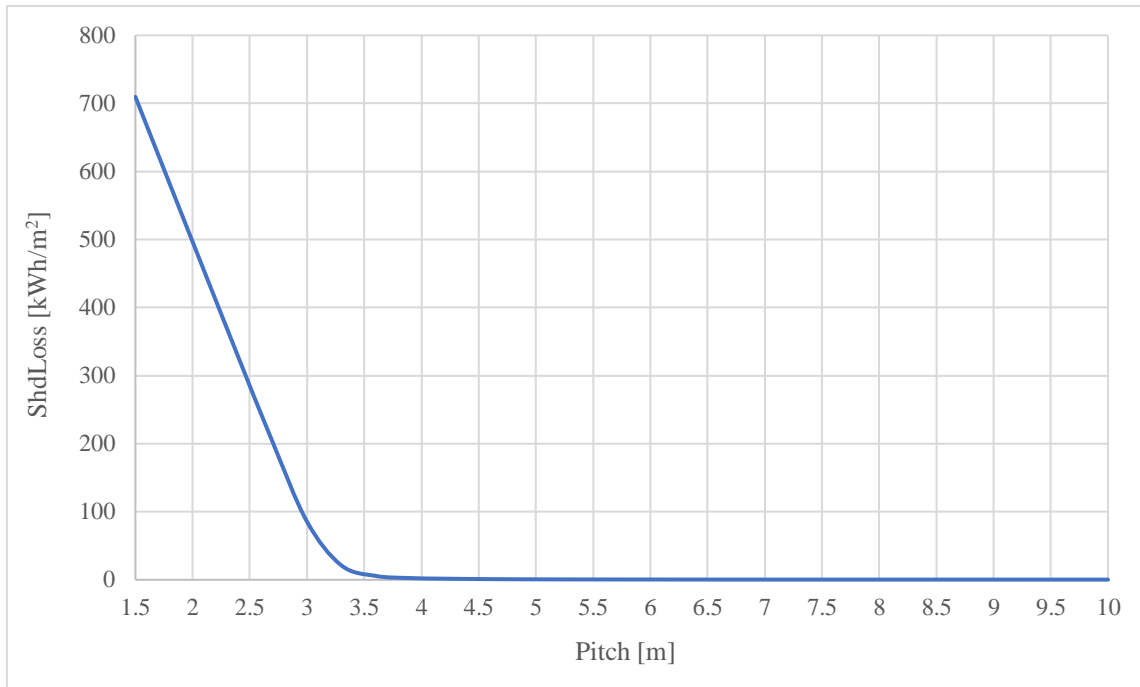
Το Διάγραμμα 8.49 παρουσιάζει τη μεταβολή του λόγου απόδοσης για διάφορες τιμές της απόστασης βήματος για την εγκατάσταση στην λίμνη. Η κρίσιμη τιμή της απόστασης βήματος όπου σταθεροποιείται ο λόγος απόδοσης είναι πάλι τα 3.5 m και η τιμή του PR = 91%.



Διάγραμμα 8.49 Μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει του βήματος απόστασης (pitch) για γωνία κλίσης  $\beta = 6^\circ$  για την περίπτωση της λίμνης

### Απώλειες λόγω σκιάσεων

Οι απώλειες λόγω σκιάσεων συναρτήσει της απόστασης βήματος απεικονίζονται στο Διάγραμμα 8.50. Και πάλι στην απόσταση 3.5 m οι απώλειες μηδενίζονται και μετά από αυτή την απόσταση τα πλαίσια πλέον δεν προκαλούν αμοιβαίες σκιάσεις.

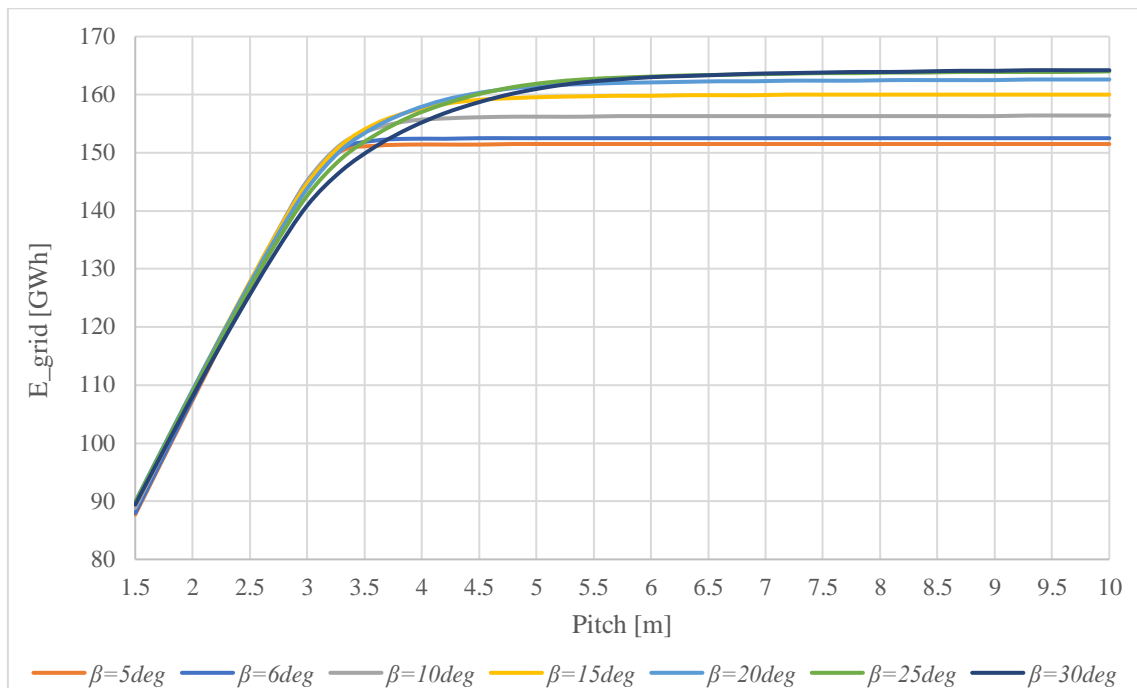


Διάγραμμα 8.50 Μεταβολή των απωλειών λόγω σκίασης συναρτήσει του βήματος απόστασης (pitch) για γωνία κλίσης  $\beta = 6^\circ$  για την περίπτωση της λίμνης

### **Μέρος 2<sup>ο</sup>: Μεταβολή της απόστασης βήματος για διάφορες τιμές της γωνίας κλίσης**

#### **Ετήσια παραγόμενη ενέργεια η οποία διαχέεται στο δίκτυο**

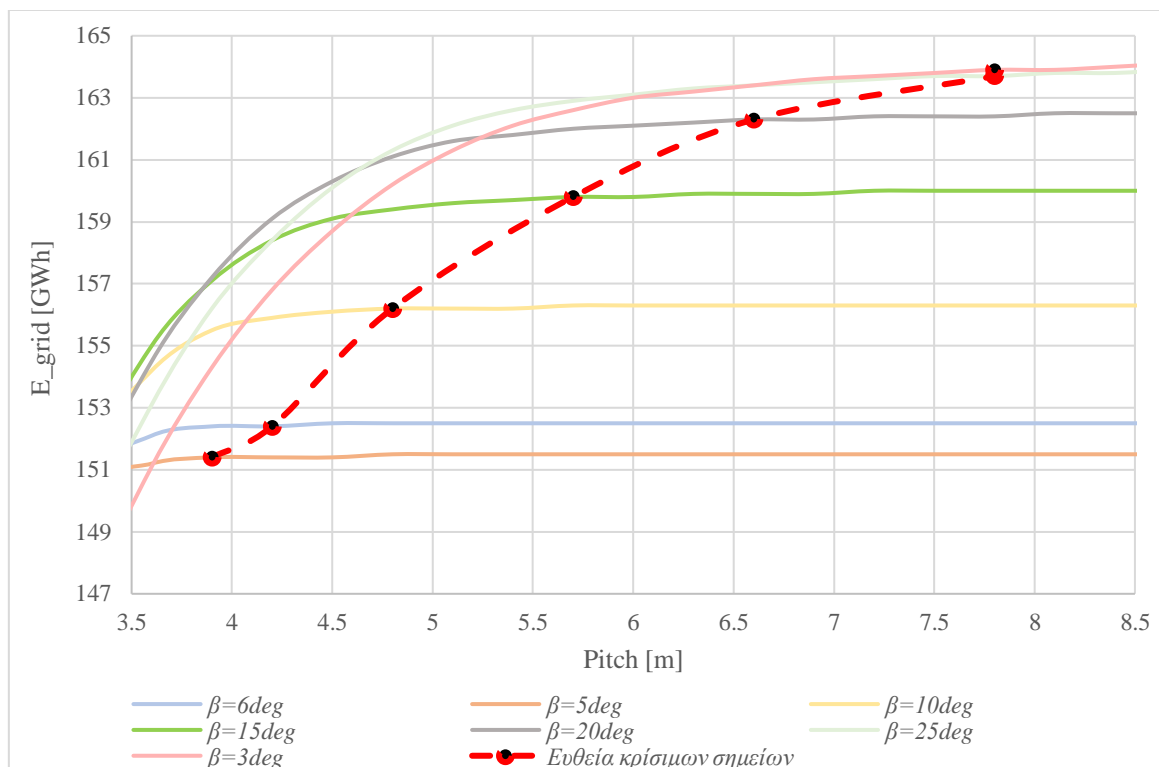
Οι καμπύλες της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας που διαχέεται στο δίκτυο συναρτήσει της απόστασης βήματος – pitch για διάφορες τιμές της γωνίας κλίσης των πλαισίων απεικονίζονται στο Διάγραμμα 8.51. Για κάθε απόσταση βήματος μπορεί να βρεθεί η γωνία κλίσης στην οποία τα πλαίσια παράγουν τη μέγιστη ενέργεια. Χαρακτηριστικά επιβεβαιώνεται και για το 1<sup>ο</sup> Σενάριο, πως για απόσταση βήματος 3 m η γωνία των  $6^\circ$  έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.



Διάγραμμα 8.51 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας που διατίθεται στο δίκτυο συναρτήσει του βήματος απόστασης (pitch) για διάφορες γωνίες κλίσης για την περίπτωση της λίμνης

### Καμπύλη κρίσιμων σημείων

Η καμπύλη των κρίσιμων σημείων για την περίπτωση της λίμνης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8.52. Η καμπύλη αυτή συνδέει τα κρίσιμα σημεία για κάθε καμπύλη ενέργειας μιας γωνίας κλίσης και παρουσιάζει αυξανόμενη τάση ομοίως με την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας.



Διάγραμμα 8.52 Καμπύλη κρίσιμων σημείων για την περίπτωση της λίμνης

## 8.5 ΣΕΝΑΡΙΟ 4: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών μεταξύ των διατάξεων με μεταβλητό συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$ και σταθερή γωνία κλίσης συλλεκτών και απόσταση βήματος (pitch)

### 8.5.1 Ανοικτή θάλασσα

Ο Πίνακας 8.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του 4<sup>ου</sup> σεναρίου, για την ανοικτή θάλασσα, το οποίο εξετάζει τα ενεργειακά και θερμοκρασιακά αποτελέσματα για διάφορες περιπτώσεις διατάξεων και τιμών του συντελεστή απωλειών θερμότητας. Για τα δύο είδη διατάξεων εξετάζονται δύο διαφορετικοί συνδυασμοί των τιμών των παραγόντων  $U_c$  και  $U_w$ .

Και για τα δύο είδη διατάξεων των πλαισίων, η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της μονοπαραγοντικής τιμής του συντελεστή απωλειών θερμότητας παρά στις περιπτώσεις όπου εξαρτάται και από τον παράγοντα της ταχύτητας του ανέμου. Πρέπει να σημειωθεί πως οι διαφορές αυτές είναι πολύ μικρές της τάξεως του 0.8% για την πρώτη διάταξη και 0.07% για τη δεύτερη. Επίσης σε αυτές τις περιπτώσεις χαμηλότερη είναι η υπολογιζόμενη θερμοκρασία συστοιχίας των πλαισίων και κατ' επέκτασιν της διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον.

Πίνακας 8.1 Αποτελέσματα 4<sup>ου</sup> σεναρίου για την ανοικτή θάλασσα

Τύπος διάταξης	$U_c$ [W/m <sup>2</sup> K]	$U_w$ [W/m <sup>2</sup> K]	E_grid [GWh]	E_specific [kWh/kWp]	T_Array [°C]	ΔT_Array [°C]
Μικρό αποτύπωμα στο νερό και ελεύθερη στάση	57.0	-	150.0	1500	21.69	5.09
	24.4	6.5	148.8	1480	23.15	6.55
Μεγάλο αποτύπωμα στο νερό και κλειστή κατασκευή	37.0	-	148.0	1488	24.13	7.53
	25.2	3.7	147.9	1479	24.26	7.66

### 8.5.2 Λίμνη

Ο Πίνακας 8.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της περίπτωσης της λίμνης. Στην περίπτωση της λίμνης, παρατηρούνται παρόμοιες σχέσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων. Και πάλι οι τιμές της ετήσιας καθαρής ενέργειας που διαχέεται στο δίκτυο είναι μεγαλύτερες στη διάταξη με μικρό αποτύπωμα στο νερό. Όμως, οι διαφορές αυτές μεταξύ των δύο τρόπων υπολογισμού είναι σημαντικά μεγαλύτερες δηλαδή 1.59% και 0.7% αντίστοιχα για τις δύο διατάξεις. Ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με τη θάλασσα αναφορικά με τη θερμοκρασία των πλαισίων και τη διαφορά της με την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Και στις δύο διατάξεις, η μονοπαραγοντική ανάλυση (δηλαδή απουσία της συνιστώσας που εξαρτάται από τον άνεμο) τα πλαίσια ψύχονται καλύτερα, καθώς οι απώλειες λόγω θερμότητας είναι μεγαλύτερες.

Πίνακας 8.2 Αποτελέσματα 4<sup>ου</sup> σεναρίου για την λίμνη

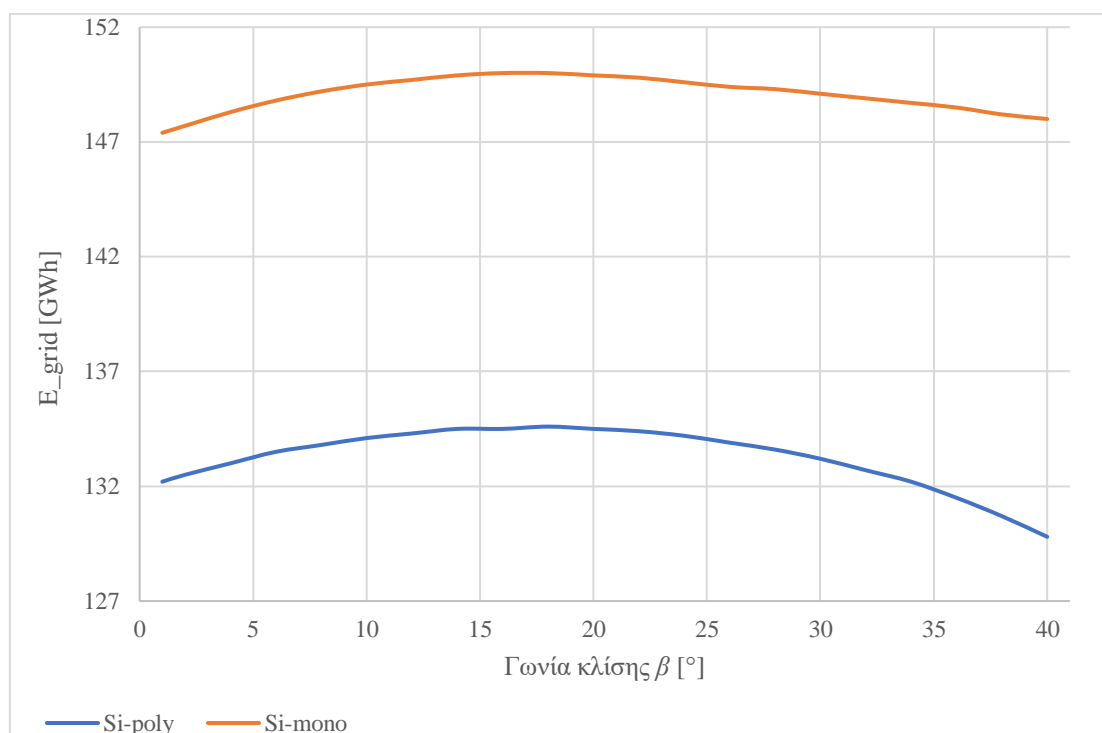
Τύπος διάταξης	$U_c$ [W/m <sup>2</sup> K]	$U_w$ [W/m <sup>2</sup> K]	E_grid [GWh]	E_specific [kWh/kWp]	T_Array [°C]	ΔT_Array [°C]
Μικρό αποτύπωμα στο νερό και ελεύθερη στάση	57.0	0.0	145.1	1451	19.83	7.58
	24.4	6.5	142.8	1433	22.91	10.66
Μεγάλο αποτύπωμα στο νερό και κλειστή κατασκευή	37.0	0.0	143.3	1428	22.25	10.00
	25.2	3.7	142.3	1423	23.61	11.36

## 8.6 ΣΕΝΑΡΙΟ 5: Μελέτη ενεργειακών μεγεθών των διατάξεων φωτοβολταϊκών συλλεκτών πολυκρυσταλλικού πυριτίου με σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$ , γωνία κλίσης συλλεκτών και απόσταση βήματος (pitch)

### 8.6.1 Ανοικτή θάλασσα

#### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια η οποία διαχέεται στο δίκτυο

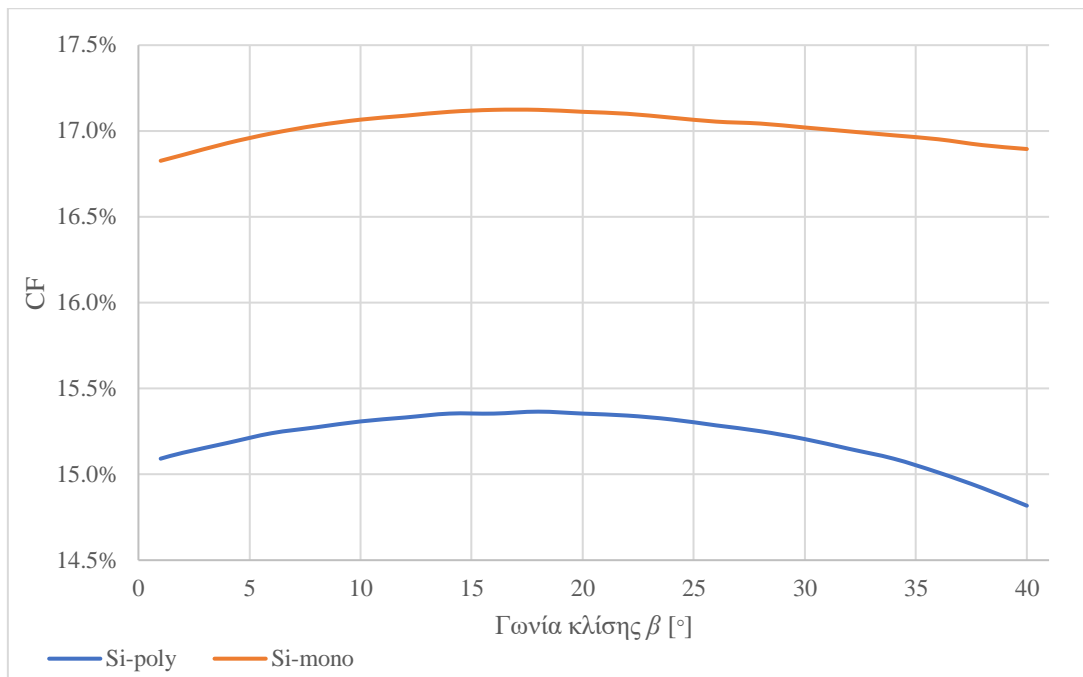
Το Διάγραμμα 8.53 περιλαμβάνει τις δύο καμπύλες της παραγόμενης ενέργειας για πάνελ πολυκρυσταλλικού και μονοκρυσταλλικού πυριτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης. Οι δύο καμπύλες απέχουν σημαντικά μεταξύ τους με την ενεργειακή παραγωγή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου να είναι κατά 11.4% μεγαλύτερη του πολυκρυσταλλικού.



Διάγραμμα 8.53 Κατανομές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της θάλασσας

#### Συντελεστής φορτίου

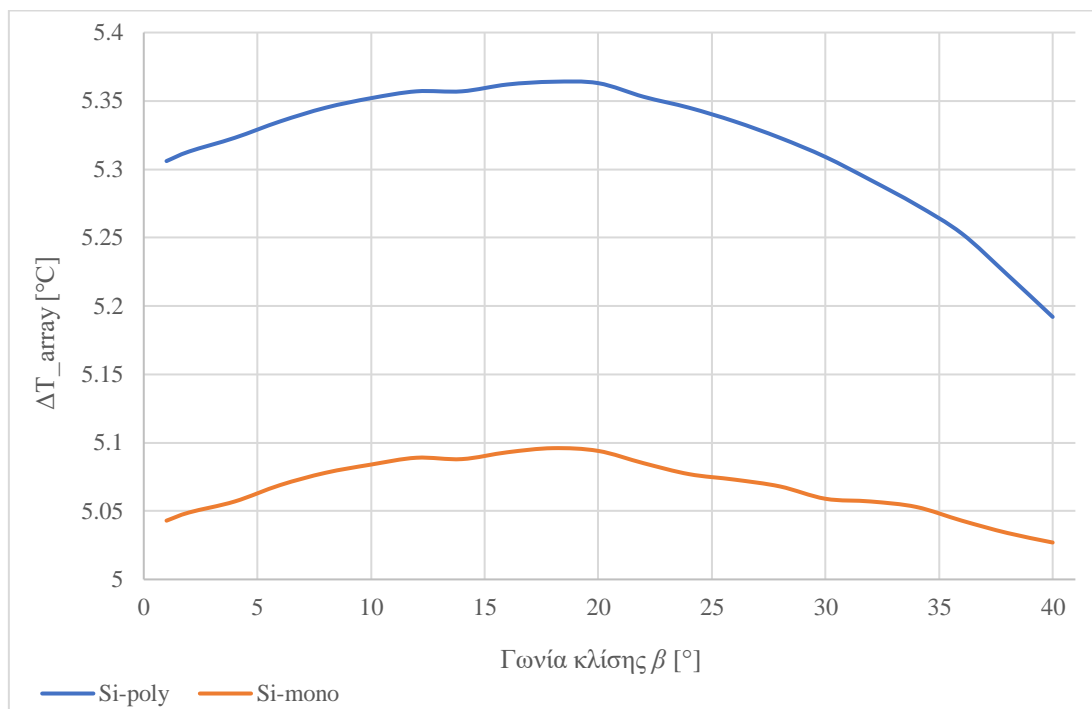
Οι καμπύλες των συντελεστών φορτίου για τις δύο δομές πυριτίου παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.54. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο αποδίδει καλύτερα από το μονοκρυσταλλικό κατά 10%. Η διαφορά είναι σημαντική αφού σημαίνει πως το Si-poly πυρίτιο πλησιάζει την ονομαστικά μέγιστη ενεργειακή παραγωγή καλύτερα από το Si-mono.



Διάγραμμα 8.54 Κατανομές συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της θάλασσας

#### Διαφορά θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος

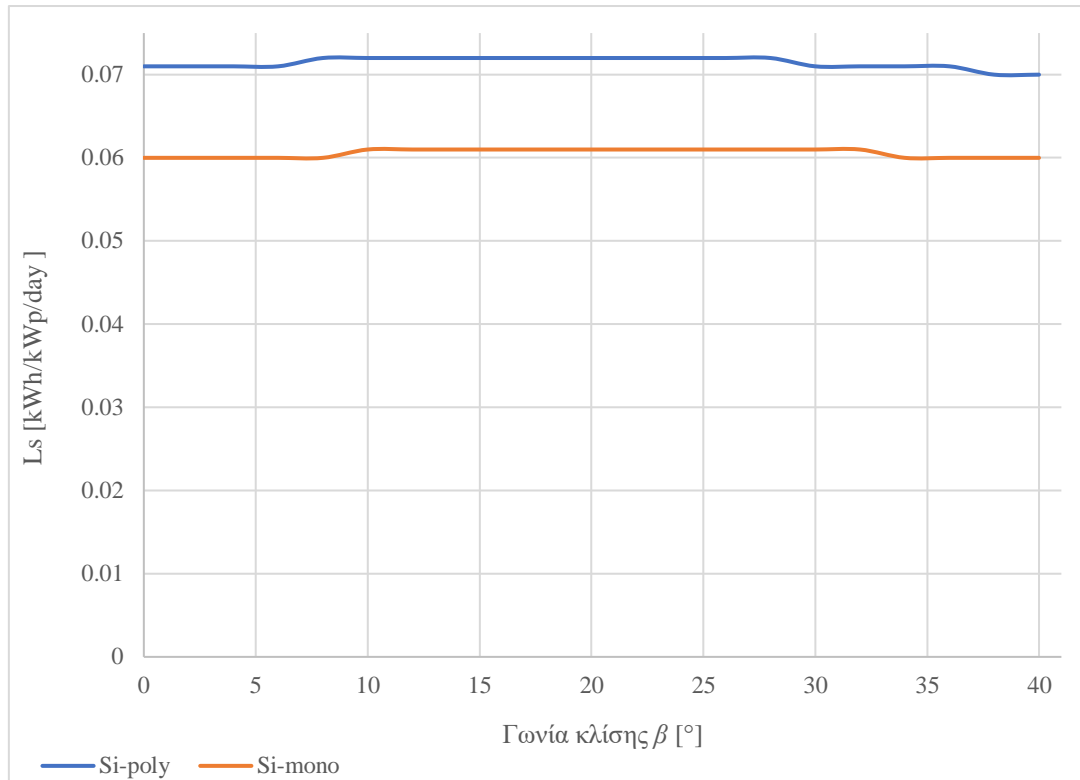
Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει καλύτερη θερμική συμπεριφορά. Στο Διάγραμμα 8.55 η διαφορά θερμοκρασίας πλαισίων και περιβάλλοντος στο Si-mono πυρίτιο αναδεικνύεται κατά 5% μικρότερη σε σχέση με το Si-poly.



Διάγραμμα 8.55 Κατανομές διαφοράς θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της θάλασσας

### Ανηγμένες απώλειες συστήματος

Οι ημερήσιες ανηγμένες απώλειες συστήματος για τις δύο δομές πυριτίου παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.56. Το Si-poly εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες κατά 18% (λόγω των υψηλότερων απωλειών θερμοκρασίας των πλαισίων) συγκριτικά με το Si-mono.

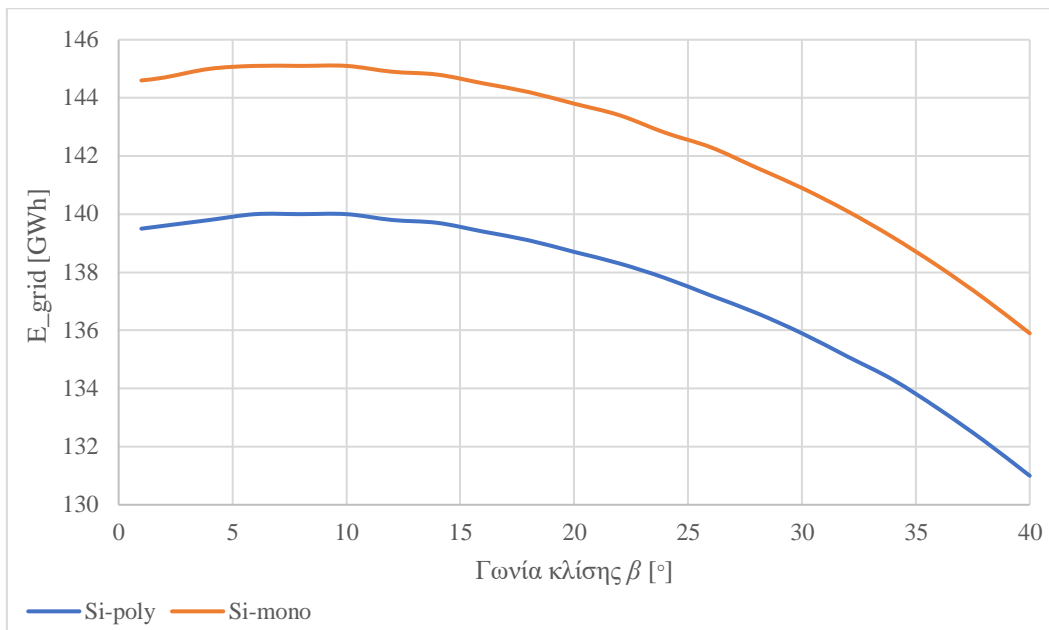


Διάγραμμα 8.56 Κατανομές ανηγμένων απωλειών συστήματος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της θάλασσας

### 8.6.2 Λίμνη

#### Ετήσια παραγόμενη ενέργεια η οποία διαχέεται στο δίκτυο

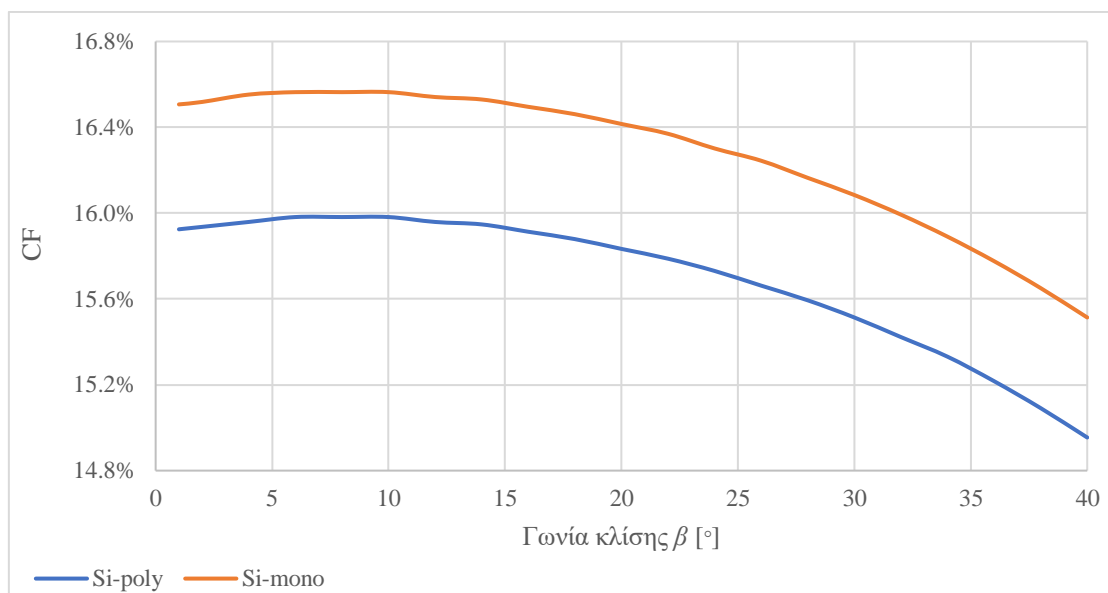
Στο Διάγραμμα 8.57 συγκρίνονται οι δύο καμπύλες της παραγόμενης ενέργειας για πάνελ πολυκρυσταλλικού και μονοκρυσταλλικού πυριτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης. Οι δύο καμπύλες απέχουν μεταξύ τους με την ενεργειακή παραγωγή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου να είναι 3.6% μεγαλύτερη του πολυκρυσταλλικού, διαφορά πολύ μικρότερη από ότι στη θάλασσα.



Διάγραμμα 8.57 Κατανομές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της λίμνης

### Συντελεστής φορτίου

Στο Διάγραμμα 8.58 περιέχονται οι καμπύλες των συντελεστών φορτίου για τις δύο δομές πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο αποδίδει καλύτερα από το μονοκρυσταλλικό κατά 3.6%. Η διαφορά είναι μικρότερη από την περίπτωση της θάλασσας.

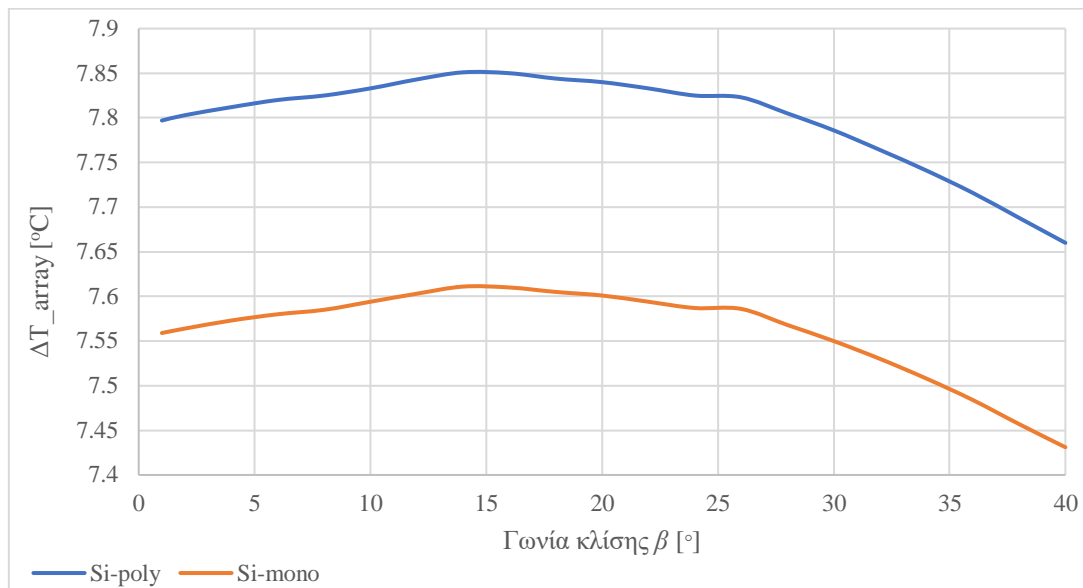


Διάγραμμα 8.58 Κατανομές συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της λίμνης



### Διαφορά θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος

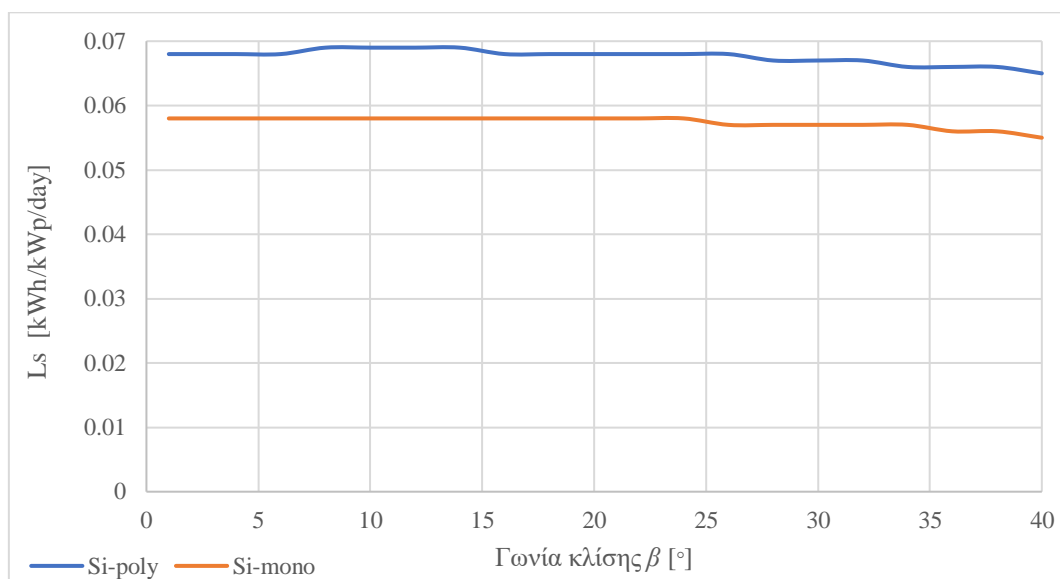
Το Διάγραμμα 8.59 συγκρίνει τις καμπύλες διαφοράς θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια των δύο τυριτίου για την περίπτωση της λίμνης όπου η διαφορά θερμοκρασίας πλαισίων και περιβάλλοντος στο Si-mono τυρίτιο είναι κατά 3.1% μικρότερη σε σχέση με το Si-poly.



Διάγραμμα 8.59 Κατανομές διαφοράς θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού τυριτίου για την περίπτωση της λίμνης

### Ανηγμένες απώλειες συστήματος

Το Διάγραμμα 8.60 παρουσιάζει τις ημερήσιες ανηγμένες απώλειες συστήματος για τις δύο δομές τυριτίου. Το Si-poly εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες (λόγω των υψηλότερων απωλειών θερμοκρασίας των πλαισίων) συγκριτικά με το Si-mono και η διαφορά μεταξύ τους είναι 17.2%.



Διάγραμμα 8.60 Κατανομές ανηγμένων απωλειών συστήματος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού τυριτίου για την περίπτωση της λίμνης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι αυξημένες παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες και οι στόχοι για μηδενικές εκπομπές άνθρακα μέχρι το 2050 καθορίζουν επιτακτική την περαιτέρω διεύρυνση των ΑΠΕ στα ενεργειακά συστήματα και την εύρεση εναλλακτικών λύσεων για τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των διαθέσιμων πηγών ενέργειας. Τα πλωτά φωτοβολταϊκά αποτελούν μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία των Φ/Β και η ενεργειακή τους απόδοση έχει αποδειχθεί πως είναι έντονα αυξημένη σε σχέση με τα χερσαία. Ήδη πληθώρα πλωτών εγκαταστάσεων πρωταγωνιστούν στον παγκόσμιο χάρτη και πολλές άλλες είναι στα μελλοντικά σχέδια χωρών που διαθέτουν μεγάλες υδάτινες εκτάσεις. Τέλος, όλο και περισσότερες εταιρείες αναπτύσσουν νέες διατάξεις και σχεδιασμούς πλωτών πάρκων καθώς και συστημάτων πρόσδεσης και αγκύρωσης.

Η εργασία στοχεύει στην προσομοίωση και στη μελέτη της ενεργειακής απόδοσης και των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας πλωτών φωτοβολταϊκών σε δύο τοποθεσίες, ανοικτής θάλασσας και λίμνης. Χρησιμοποιείται το ευρέως γνωστό λογισμικό προσομοίωσης Φ/Β, το PVsyst όπου εισάγονται τα μετεωρολογικά δεδομένα και μεταβάλλονται οι κατάλληλες παράμετροι ώστε να προσομοιωθούν τα πλωτά Φ/Β. Γίνεται επίσης σύγκριση των δύο εγκαταστάσεων με δύο χερσαίες εγκαταστάσεις πλησίον ώστε να συγκριθούν μεταξύ τους.

Αρχικό βήμα αποτέλεσε η επιλογή των δύο πλωτών τοποθεσιών κάτι το οποίο απαιτεί πολυκριτηριακή ανάλυση. Επιλέχθηκαν επτά κριτήρια σε αυτή την εργασία και μελετήθηκαν πολλές πιθανές τοποθεσίες. Σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα μετρούμενα μετεωρολογικά δεδομένα επιλέχθηκαν οι τελικές τοποθεσίες στη θάλασσα και στην λίμνη. Για τα δεδομένα της λίμνης λήφθηκαν οι μετρήσεις στο σημείο δειγματοληψίας του Τομέα Υδρολογίας της ΔΕΗ, ενώ για τα δεδομένα της ανοικτής θάλασσας τα δεδομένα δόθηκαν μέσω του υπολογιστικού εργαλείου ERA5 (μέρος της βάσης δεδομένων Copernicus) σε συνεργασία με το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Αφότου επεξεργάστηκαν, τα μετεωρολογικά δεδομένα εισήχθησαν με τους κατάλληλους τρόπους στη μετεωρολογική βάση δεδομένων του λογισμικού PVsyst.

Για κάθε τοποθεσία μελετήθηκαν πέντε σενάρια και εξήχθησαν τα ανάλογα αποτελέσματα. Στο πρώτο σενάριο, συγκριτικά μελετήθηκαν η απόδοση και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των πλωτών και των χερσαίων συστημάτων σε θάλασσα και λίμνη. Και στις δύο εγκαταστάσεις ορίστηκαν οι βέλτιστες γωνίες κλίσης των συλλεκτών όπου δηλαδή γίνεται η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Στη θάλασσα, η πλωτή εγκατάσταση αποδίδει 10.4% περισσότερο συγκριτικά με τη χερσαία (η ετήσια παραγόμενη ενέργεια διαχεόμενη στο δίκτυο είναι ίση με 150 GWh στην πλωτή και 135.9 GWh στη χερσαία εγκατάσταση). Ο λόγος απόδοσης του πλωτού έργου είναι 4% μεγαλύτερος συγκριτικά με το χερσαίο και ο συντελεστής φορτίου κατά 10% μεγαλύτερος αντίστοιχα. Επίσης στα πλωτά πλαίσια αναπτύσσονται αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες και ως αποτέλεσμα οι απώλειες λόγω των επιπέδων της θερμοκρασίας είναι πολύ υψηλότερες στα χερσαία (περίπου 3.7 GWh στα χερσαία και 0.15 GWh στα πλωτά). Στην περίπτωση της λίμνης, τα πλωτά Φ/Β αποδίδουν 8.7% περισσότερο σε σχέση με τα χερσαία (145.1 GWh στην πλωτή και 133.5 GWh στη χερσαία εγκατάσταση). Ο λόγος απόδοσης του πλωτού έργου είναι περίπου 7% μεγαλύτερος συγκριτικά με το χερσαίο και ο συντελεστής φορτίου κατά 8% μεγαλύτερος αντίστοιχα. Οι απώλειες λόγω της θερμοκρασίας είναι πολύ υψηλότερες στα χερσαία (περίπου 6 GWh στα χερσαία και 0.05 GWh στα πλωτά). Συμπερασματικά, τα πλωτά Φ/Β αποδίδουν εμφανώς καλύτερα από τα χερσαία και αυτό οφείλεται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα πλαίσια.

Στο δεύτερο σενάριο μελετήθηκαν τα ενεργειακά μεγέθη στις πλωτές εγκαταστάσεις για μεταβαλλόμενη απόσταση βήματος, σταθερό συντελεστή απωλειών θερμότητας και μεταβλητή γωνία συλλέκτη. Τα αποτελέσματα δείχνουν, εξίσου και στις δύο τοποθεσίες, πως η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη, η παραγόμενη ενέργεια και ο λόγος απόδοσης αυξάνονται αυξανόμενης της απόστασης βήματος, λόγω της μείωσης των σκιάσεων, μέχρι όμως μια τιμή όπου μετέπειτα η μεταβολές γίνονται πιο ήπιες. Επιπρόσθετα, οι απώλειες λόγω κατακαθίσεων και σκόνης αυξάνονται ενώ οι απώλειες λόγω σκίασης μειώνονται καθώς αυξάνεται η απόσταση του βήματος.

Στο πρώτο μέρος του τρίτου σεναρίου αναλύθηκαν οι μεταβολές των ενεργειακών μεγεθών συναρτήσει της απόστασης βήματος για σταθερή γωνία κλίσης συλλεκτών (ίση με τη βέλτιστη) για τις πλωτές εγκαταστάσεις. Εξίσου για τη θάλασσα και την λίμνη, η παραγόμενη ενέργεια η οποία διαχέεται στο δίκτυο και ο λόγος απόδοσης αυξάνονται καθώς αυξάνεται η τιμή της απόστασης βήματος, μέχρι μια τιμή όπου έπειτα σταθεροποιούνται. Αναλόγως οι απώλειες λόγω σκιάσεων μειώνονται μέχρι την ίδια τιμή απόστασης βήματος όπου μηδενίζονται. Η κρίσιμη αυτή τιμή είναι για τη θάλασσα είναι τα 5.5 m και την λίμνη τα 3.5 m. Στο δεύτερο μέρος του σεναρίου, έγινε η ίδια ανάλυση με το 1<sup>ο</sup> μέρος όμως με μεταβαλλόμενη και την κλίση των συλλεκτών. Από τα αποτελέσματα χαράχθηκε η καμπύλη των κρίσιμων σημείων της απόστασης βήματος συναρτήσει της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος. Η καμπύλη των κρίσιμων σημείων έχει αυξανόμενη τάση με την αύξηση της απόστασης βήματος και της γωνίας κλίσης. Δηλαδή όσο η κλίση των συλλεκτών αυξάνεται τόσο η απαιτούμενη απόσταση βήματος για σταθεροποίηση της ενέργειας αυξάνεται. Με μεγαλύτερη κλίση αυξάνονται οι σκιάσεις μεταξύ των πλαισίων, οπότε για να εκμηδενιστούν οι σκιάσεις χρειάζονται μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους.

Στο τέταρτο σενάριο εξετάστηκε η επιρροή του συντελεστή απωλειών θερμότητας για δύο διαφορετικά ήδη διατάξεων στην παραγόμενη ενέργεια και τη θερμοκρασία της συστοιχίας των Φ/Β. Συγκεκριμένα, στη διάταξη με το μικρό αποτύπωμα στο νερό και την ελεύθερη στάση των πλαισίων η παραγόμενη ενέργεια είναι ελάχιστα μεγαλύτερη και η θερμοκρασία συστοιχίας μικρότερη σε σχέση με τα πλαίσια με μεγάλο αποτύπωμα στο νερό και κλειστή κατασκευή. Αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο συντελεστή απωλειών θερμότητας του πρώτου συστήματος σε σχέση με το δεύτερο. Τέλος, εκτός από τον σταθερό συντελεστή απωλειών έγινε επίσης υπολογισμός των μεγεθών και με χρήση του παράγοντα θερμικών απωλειών που εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και οι διαφορές στα υπολογιζόμενα μεγέθη ήταν πολύ μικρές.

Στο τελευταίο σενάριο, εξετάστηκαν όλα τα μεγέθη του σεναρίου 1 για υλικό Φ/Β κελιού πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Για τη θάλασσα τα αποτελέσματα για τα δύο υλικά έδειξαν ότι, η ενεργειακή παραγωγή του Si-mono είναι 11.4% περισσότερη και ο συντελεστής φορτίου είναι 10% μεγαλύτερος του Si-poly. Επίσης, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι 5% μικρότερες στο Si-mono και οι ανηγμένες απώλειες είναι 18% μεγαλύτερες στο Si-poly συγκριτικά με το Si-mono. Στην λίμνη οι διαφορές ήταν μικρότερες στην ενέργεια, όπου το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο η παραγόμενη ενέργεια είναι 3.6% μεγαλύτερη του πολυκρυσταλλικού και η διαφορά του συντελεστή φορτίου ίση με 3.6%. Τέλος, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι 3.1% μικρότερες στο Si-mono και οι ανηγμένες απώλειες είναι 17.2% μεγαλύτερες στο Si-poly συγκριτικά με το Si-mono.

Μελλοντικά προτείνεται να πραγματοποιηθεί οικονομική ανάλυση των πλωτών έργων μιας και παρουσιάζουν καλύτερη μεν ενεργειακή απόδοση, αυξημένα κόστη συντήρησης και λειτουργίας δε. Τα μεγέθη αναφορικά με τα κόστη είναι δυσεύρετα στη βιβλιογραφία και πρέπει να σημειωθεί πως τέτοιες τεχνολογίες συνεχώς αναπτύσσονται. Ως αποτέλεσμα, δεν έχει καθιερωθεί μια ευρέως κοινή σχεδιαστική διάταξη η οποία να ομογενοποιεί το κόστος των υλικών, αλλά αντιθέτως το κόστος των πλωτών μερών εξαρτάται από την κάθε εταιρεία κατασκευής. Επίσης κρίνεται σκόπιμο να ενταχθούν στο λογισμικό οι μεταβολές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας λόγω μεταβολής της γωνίας κλίσης των πλαισίων από τους κυματισμούς. Όπως έχει αναλυθεί, η μεταβολή της γωνίας προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην ακτινοβολία του συλλεκτικού επιπέδου. Στο λογισμικό δυστυχώς ακόμη δεν διατίθεται η επιλογή για εισαγωγή και εκτέλεση προσομοιώσεων βάση και της κατεύθυνσης του ανέμου, κάτι το οποίο θα βοηθούσε στην πιο ρεαλιστική προσέγγιση των φαινομένων φύξης και καταπόνησης των πλωτών κατασκευών.

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1 Παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η προβλεπόμενη μείωση τους για το σενάριο των μηδενικών εκπομπών το 2050 [3].....	12
Διάγραμμα 1.2 Μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο μηδενικών εκπομπών,2010-2030 [6] .....	13
Διάγραμμα 1.3 Αθροιστική ικανότητα ισχύος ανά τεχνολογία για τα έτη 2010-2027 [4].....	14
Διάγραμμα 1.4 Παραγωγή ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας βάσει του Σεναρίου Καθαρών Μηδενικών εκπομπών, 2010-2030 [9] .....	14
Διάγραμμα 1.5 Μεταβολή της ακτινοβολίας καθέτου επιπέδου εκτός ατμόσφαιρας συναρτήσει των μηνών του έτους [12].....	15
Διάγραμμα 1.6 Προσομοίωση αίθριου καιρού [14] .....	17
Διάγραμμα 1.7 Προσομοίωση συννεφιασμένου καιρού [14].....	17
Διάγραμμα 1.8 (Α) Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκής μονάδας (Β) Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V συναρτήσει της ηλιακής ισχύος και της αντίστασης λόγω φορτίου [11].....	24
Διάγραμμα 1.9 Χαρακτηριστικές καμπύλες μιας φωτοβολταϊκής μονάδας συναρτήσει της θερμοκρασίας της για προσπίπτουσα κάθετη ακτινοβολία ίση με $1\text{kW/m}^2$ : (Α) καμπύλη I-V (Β) καμπύλη P-V [10].....	26
Διάγραμμα 1.10 Χαρακτηριστικές καμπύλες της φωτοβολταϊκής μονάδας συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας με θερμοκρασία μονάδας $T_c=25^\circ\text{C}$ : (Α) καμπύλη I-V (Β) καμπύλη P-V [10].....	26
Διάγραμμα 1.11 (α) Διάγραμμα του ωριαίου προφίλ ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας της ημέρας για σύστημα με παρακολούθηση του ήλιου και σύστημα με σταθερή κλίση συλλεκτών (β) Διάγραμμα της ημερήσιας ακτινοβολίας συναρτήσει του μήνα για διάφορες κλίσεις συλλέκτη [11] .....	27
Διάγραμμα 2.1 Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς πλωτών Φ/Β [24] .....	29
Διάγραμμα 2.2 (α) Θερμοκρασία περιβάλλοντος και ηλιακή ακτινοβολία την ημέρα της δοκιμής (β) Διαφορά θερμοκρασίας λειτουργίας μεταξύ επίγειων και πλωτών φωτοβολταϊκών πάνελ [29].....	32
Διάγραμμα 2.3 Διάγραμμα χερσαίου Φ/Β συστήματος συγκρινόμενο με τις θερμοκρασίες του πλωτού συστήματος Φ/Β [23].....	33
Διάγραμμα 2.4 (c) Διακύμανση τάσης και ρεύματος για τα χερσαία και πλωτά Φ/Β (d) Διακύμανση ισχύος και απόδοσης χερσαίων και πλωτών Φ/Β [29].....	34
Διάγραμμα 2.5 Παραγωγή ενέργειας για διαφορετικές ημέρες δοκιμών μεταξύ 10 π.μ. και 2 μ.μ [29] .....	34
Διάγραμμα 2.6 Πειραματικά δεδομένα της ακτινοβολίας ως αποτέλεσμα των κινήσεων του βήματος [14] ..	52
Διάγραμμα 2.7 Επί τοις εκατόν μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ πλωτών και χερσαίων Φ/Β κατά τη διάρκεια ενός έτους για κλίση $\beta=5^\circ$ και $\alpha=0^\circ$ [14] .....	53
Διάγραμμα 2.8 Επί τοις εκατό μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ πλωτών και χερσαίων Φ/Β κατά τη διάρκεια ενός έτους για κλίση $\beta=30^\circ$ και $\alpha=0^\circ$ [14].....	53
Διάγραμμα 7.1 Κατανομές του συντελεστή απωλειών θερμότητας U για τέσσερις διαφορετικούς τύπους διατάξεων φωτοβολταϊκών (πλωτών και χερσαίων) .....	93
Διάγραμμα 7.2 Κατανομές του συντελεστή $U_r$ για τις διάφορες διατάξεις συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου [23].....	94
Διάγραμμα 7.3 GHI για τα 10 έτη στη θάλασσα και τα δύο TMY μοντέλων NSRDB και Sandia.....	100
Διάγραμμα 7.4 DHI για τα 10 έτη στη θάλασσα και τα δύο TMY μοντέλων NSRDB και Sandia.....	101
Διάγραμμα 7.5 Θερμοκρασία για τα 10 έτη στη θάλασσα και τα δύο TMY μοντέλων NSRDB και Sandia	101
Διάγραμμα 7.6 Ταχύτητα ανέμου για τα 10 έτη στη θάλασσα και τα δύο TMY μοντέλων NSRDB και Sandia .....	102
Διάγραμμα 7.7 Περιγραφή καιρού για τα έτη 2003-2012 για την λίμνη.....	103
Διάγραμμα 7.8 Κατανομές της GHI για το τυπικό έτος στην λίμνη και στο Μοσχάτο.....	106
Διάγραμμα 7.9 Κατανομές της DHI για το τυπικό έτος στην λίμνη και στο Μοσχάτο.....	107
Διάγραμμα 7.10 Κατανομές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το τυπικό έτος στην λίμνη και στο Μοσχάτο .....	107
Διάγραμμα 7.11 Κατανομές της ταχύτητας ανέμου για το τυπικό έτος στην λίμνη και στο Μοσχάτο.....	108
Διάγραμμα 7.12 Κατανομή της GHI για το τυπικό έτος στην ανοικτή θάλασσα και στα Νέα Μεσάγκαλα	108

Διάγραμμα 7.13 Κατανομές της DHI για το τυπικό έτος στην ανοικτή θάλασσα και στα Νέα Μεσάγκαλα	109
Διάγραμμα 7.14 Κατανομές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το τυπικό έτος στην ανοικτή θάλασσα και στα Νέα Μεσάγκαλα	109
Διάγραμμα 7.15 Κατανομές της ταχύτητας ανέμου για το τυπικό έτος στην ανοικτή θάλασσα και στα Νέα Μεσάγκαλα	110
Διάγραμμα 8.1 Μεταβολή της καθαρής προσπίπτουσα παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	119
Διάγραμμα 8.2 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας η οποία διαχέεται στο δίκτυο συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	120
Διάγραμμα 8.3 Μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	121
Διάγραμμα 8.4 Καμπύλη συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της θάλασσας	122
Διάγραμμα 8.5 Μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας πλαισίων και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	123
Διάγραμμα 8.6 Κατανομή των απωλειών ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	123
Διάγραμμα 8.7 Κατανομή των απωλειών κατακαθίσεων και σκόνης συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	124
Διάγραμμα 8.8 Κατανομή των απωλειών λόγω σκιάσεων συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	125
Διάγραμμα 8.9 Κατανομή της ετήσιας ειδικής παραγωγής ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	125
Διάγραμμα 8.10 Μεταβολή της καθαρής προσπίπτουσα παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της χερσαίας τοποθεσίας στα Νέα Μεσάγκαλα	126
Διάγραμμα 8.11 Μεταβολές της παραγόμενης διαχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	127
Διάγραμμα 8.12 Μεταβολές του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	127
Διάγραμμα 8.13 Μεταβολές της ειδικής παραγωγής συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της θάλασσας	128
Διάγραμμα 8.14 Μεταβολές του συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της θάλασσας	129
Διάγραμμα 8.15 Μεταβολές των απωλειών λόγω θερμοκρασίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	130
Διάγραμμα 8.16 Μεταβολές της διαφοράς θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών και περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας	131
Διάγραμμα 8.17 Μεταβολή της καθαρής προσπίπτουσα παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης	131
Διάγραμμα 8.18 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας η οποία διαχέεται στο δίκτυο συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της λίμνης	132
Διάγραμμα 8.19 Μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της λίμνης	132
Διάγραμμα 8.20 Μεταβολή του συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την περίπτωση της λίμνης	133
Διάγραμμα 8.21 Μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας πλαισίων και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης	133
Διάγραμμα 8.22 Κατανομή των απωλειών ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης	134

Διάγραμμα 8.23 Κατανομή των απωλειών λόγω κατακαθίσεων και σκόνης συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης.....	134
Διάγραμμα 8.24 Κατανομή των απωλειών λόγω σκιάσεων συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης.....	135
Διάγραμμα 8.25 Κατανομή της ετήσιας ειδικής παραγωγής ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της λίμνης.....	135
Διάγραμμα 8.26 Μεταβολή της καθαρής προσπίπτουσα παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για την περίπτωση της χερσαίας τοποθεσίας στο Μοσχάτο.....	136
Διάγραμμα 8.27 Μεταβολές της παραγόμενης διαχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης.....	137
Διάγραμμα 8.28 Μεταβολές του λόγου απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης.....	137
Διάγραμμα 8.29 Μεταβολές της ειδικής παραγωγής συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης.....	138
Διάγραμμα 8.30 Μεταβολές του συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης.....	139
Διάγραμμα 8.31 Μεταβολές των απωλειών λόγω θερμοκρασίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης.....	140
Διάγραμμα 8.32 Μεταβολές της διαφοράς θερμοκρασίας φωτοβολταϊκών και περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας συναρτήσει της γωνίας κλίσης των συλλεκτών για την χερσαία και πλωτή εγκατάσταση για την περίπτωση της λίμνης.....	140
Διάγραμμα 8.33 Κατανομές της καθαρής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της θάλασσας.....	141
Διάγραμμα 8.34 Κατανομές της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της θάλασσας.....	142
Διάγραμμα 8.35 Κατανομές του λόγου απόδοσης για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της θάλασσας.....	143
Διάγραμμα 8.36 Κατανομές των απωλειών λόγω σκιάσεων για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της θάλασσας.....	143
Διάγραμμα 8.37 Κατανομές των απωλειών λόγω κατακαθίσεων για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της θάλασσας.....	144
Διάγραμμα 8.38 Κατανομές της καθαρής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης.....	145
Διάγραμμα 8.39 Κατανομές της παραγόμενης ενέργειας η οποία διαχέεται στο δίκτυο για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης.....	145
Διάγραμμα 8.40 Κατανομές του λόγου απόδοσης για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης.....	146
Διάγραμμα 8.41 Κατανομές των απωλειών λόγω σκίασης για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης.....	147
Διάγραμμα 8.42 Κατανομές των απωλειών λόγω κατακαθίσεων για πέντε τιμές απόστασης βήματος συναρτήσει της γωνίας βήματος για την περίπτωση της λίμνης.....	147
Διάγραμμα 8.43 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας που διατίθεται στο δίκτυο συναρτήσει του απόστασης βήματος για γωνία κλίσης $\beta = 17^\circ$ για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας.....	148
Διάγραμμα 8.44 Μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει του απόστασης βήματος για γωνία κλίσης $\beta = 17^\circ$ για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας.....	149
Διάγραμμα 8.45 Μεταβολή των απωλειών σκίασης συναρτήσει του απόστασης βήματος για γωνία κλίσης $\beta = 17^\circ$ για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας.....	149
Διάγραμμα 8.46 Μεταβολές της παραγόμενης ενέργειας που διατίθεται στο δίκτυο συναρτήσει του βήματος απόστασης (pitch) για γωνίες κλίσης $\beta = 5, 10, 17, 15, 20, 25, 30^\circ$ για την περίπτωση της ανοικτής θάλασσας.....	150
Διάγραμμα 8.47 Ευθεία κρίσιμων σημείων για την περίπτωση της θάλασσας.....	151
Διάγραμμα 8.48 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας που διατίθεται στο δίκτυο συναρτήσει του βήματος απόστασης για γωνία κλίσης $\beta = 6^\circ$ για την περίπτωση της λίμνης.....	152

Διάγραμμα 8.49 Μεταβολή του λόγου απόδοσης συναρτήσει του βήματος απόστασης (pitch) για γωνία κλίσης $\beta = 6^\circ$ για την περίπτωση της λίμνης.....	152
Διάγραμμα 8.50 Μεταβολή των απωλειών λόγω σκίασης συναρτήσει του βήματος απόστασης (pitch) για γωνία κλίσης $\beta = 6^\circ$ για την περίπτωση της λίμνης.....	153
Διάγραμμα 8.51 Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας που διατίθεται στο δίκτυο συναρτήσει του βήματος απόστασης (pitch) για διάφορες γωνίες κλίσης για την περίπτωση της λίμνης .....	154
Διάγραμμα 8.52 Καμπύλη κρίσιμων σημείων για την περίπτωση της λίμνης .....	154
Διάγραμμα 8.53 Κατανομές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της θάλασσας.....	156
Διάγραμμα 8.54 Κατανομές συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της θάλασσας.....	157
Διάγραμμα 8.55 Κατανομές διαφοράς θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της θάλασσας	157
Διάγραμμα 8.56 Κατανομές ανηγμένων απωλειών συστήματος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της θάλασσας.....	158
Διάγραμμα 8.57 Κατανομές ετήσιας παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της λίμνης.....	159
Διάγραμμα 8.58 Κατανομές συντελεστή φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της λίμνης.....	159
Διάγραμμα 8.59 Κατανομές διαφοράς θερμοκρασίας συλλεκτών και περιβάλλοντος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της λίμνης.....	160
Διάγραμμα 8.60 Κατανομές ανηγμένων απωλειών συστήματος συναρτήσει της γωνίας κλίσης για πλαίσια μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την περίπτωση της λίμνης.....	160

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Μέση απόκλιση της προσομοίωσης των δύο μοντέλων από πραγματικές μετρήσεις ακτινοβολίας [14].....	18
Πίνακας 1.2 Ηλιακή μετάδοση και είδος επιφάνειας [18] .....	18
Πίνακας 2.1 Κόστος ανά $m^2$ για διάφορα είδη πλωτών πλατφόρμων [36].....	41
Πίνακας 2.2 Τριμηνιαία μέση ισχύς ανά εγκατεστημένο $W_p$ της φωτοβολταϊκής μονάδας λεπτού φιλμ για την πλωτή και χερσαία εγκατάσταση [36] .....	42
Πίνακας 2.3 Ημερήσια μέση παραγόμενη ισχύς και ενέργεια πλωτών Φ/Β μονάδων ανά $W_p$ εγκατεστημένο [36].....	43
Πίνακας 2.4 Φορτία λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών στις 3 διατάξεις της έρευνας των Ikhennicheu κ.ά.[40] .....	58
Πίνακας 4.1 Κριτήρια και περιγραφή για τη χωροθέτηση των πλωτών φωτοβολταϊκών .....	79
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά της επιλεχθείσας τοποθεσίας χωροθέτησης των πάνελ στην ανοικτή θάλασα	80
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά της επιλεχθείσας τοποθεσίας χωροθέτησης των πάνελ στην λίμνη.....	83
Πίνακας 7.1 Μέσες τιμές του συντελεστή απωλειών θερμότητας $U$ για τέσσερις διαφορετικούς τύπους διατάξεων φωτοβολταϊκών (πλωτών και χερσαίων) .....	93
Πίνακας 7.2 Συντελεστής $U_v$ για διάφορα συστήματα [23] .....	94
Πίνακας 7.3 Εκτιμώμενη ετήσια ειδική παραγωγή ενέργειας των διαφορετικών συστημάτων για διαφορετικές τιμές εισόδου του συντελεστή απωλειών $U$ [23].....	95
Πίνακας 7.4 Στατιστικοί παράγοντες στάθμισης μετεωρολογικών μεγεθών για κάθε μοντέλο TMY [65] .....	98
Πίνακας 7.5 Μέσες τιμές μέγιστων, ελαχίστων της θερμοκρασίας και μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου για την τοποθεσία της λίμνης.....	104
Πίνακας 7.6 Δεδομένα εισόδου στο 1 <sup>ο</sup> σενάριο για πλωτά φωτοβολταϊκά.....	112
Πίνακας 7.7 Δεδομένα εισόδου στο 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	113
Πίνακας 7.8 Δεδομένα εισόδου στο πρώτο μέρος του 3 <sup>ου</sup> σεναρίου .....	114
Πίνακας 7.9 Δεδομένα εισόδου στο δεύτερο μέρος του 3 <sup>ου</sup> σεναρίου .....	114
Πίνακας 7.10 Δεδομένα εισόδου στο 4 <sup>ο</sup> σενάριο .....	115
Πίνακας 7.11 Δεδομένα εισόδου στο 5 <sup>ο</sup> σενάριο.....	116
Πίνακας 7.12 Κόστος σταθερού κεφαλαίου για τα ηλιακά εξαρτήματα [21] .....	117
Πίνακας 7.13 Κόστος σταθερού κεφαλαίου για τα πλωτά εξαρτήματα [21] .....	118
Πίνακας 8.3 Αποτελέσματα 4 <sup>ου</sup> σεναρίου για την ανοικτή θάλασσα .....	155
Πίνακας 8.4 Αποτελέσματα 4 <sup>ου</sup> σεναρίου για την λίμνη.....	155



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Χαρακτηριστικές γωνίες μεταξύ ηλίου και φωτοβολταϊκού συλλέκτη [10] .....	20
Εικόνα 1.2 Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας οι οποίες αλληλοεπιδρούν με τον φωτοβολταϊκό συλλέκτη [10].....	21
Εικόνα 1.3 Φωτοβολταϊκή συσκευή και επαφή p-n [11] .....	22
Εικόνα 1.4 Σχηματική όψη ενός εξωτερικά βραχυκυκλωμένου ηλιακού κυττάρου [11] .....	23
Εικόνα 1.5 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτρικής φωτοβολταϊκής μονάδας μονής διόδου [10].....	23
Εικόνα 1.6 Ροές θερμότητας στον φωτοβολταϊκό συλλέκτη [19].....	25
Εικόνα 1.7 Γωνία κλίσης πλαισίων και απόσταση βήματος για αποφυγή σκιάσεων .....	28
Εικόνα 2.1 Παγκόσμια δυνατή ετήσια παραγωγή πλωτών φωτοβολταϊκών με κάλυψη δεξαμενής 30% (μικρότερη από 30 km <sup>2</sup> ) [26].....	30
Εικόνα 2.2 Εκτιμώμενη παγκόσμια εξοικονόμηση νερού από την ανάπτυξη πλωτών φωτοβολταϊκών με κάλυψη ταμιευτήρα 30% (μικρότερη από 30 km <sup>2</sup> ) [26] .....	30
Εικόνα 2.3 Ισορροπία ροών σε α) ακάλυπτη δεξαμενή β) πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα κάλυψης [27].....	32
Εικόνα 2.4 Παράδειγμα ανατροπής πλωτής πλατφόρμας σε πλωτό Φ/Β πάρκο στην Ιαπωνία [10].....	36
Εικόνα 2.5 (Α) Ανάπτυξη βλάστησης στις πλωτές κατασκευές (Β) Περιπτώματα πουλιών σε πλωτά πλαίσια [31].....	37
Εικόνα 2.6 Θερμό σημείο από περιπτώματα πουλιών [31] .....	37
Εικόνα 2.7 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β σε λίμνη άρδευσης στην Ιαπωνία ισχύος 1.23 MWp [32] .....	38
Εικόνα 2.8 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β σε θάλασσα στην Ταϊβάν ισχύος 88 MWp [32] .....	38
Εικόνα 2.9 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β σε υδάτινα σώματα παλιών λατομείων και μεταλλουργείων στην Κίνα ισχύος 70 MWp [33].....	39
Εικόνα 2.10 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β σε φράγμα στην Ταϊβάν ισχύος 22.75 MWp [34] .....	39
Εικόνα 2.11 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β στη θάλασσα στα ανοικτά της δυτικής ακτής της Νορβηγίας [24] .....	40
Εικόνα 2.12 Εφαρμογή πλωτών Φ/Β στη θάλασσα στα ανοικτά των Μαλβίδων [10].....	40
Εικόνα 2.13 Υπεράκτιο αιολικό και Φ/Β πάρκο [35].....	40
Εικόνα 2.14 Πλωτή πλατφόρμα από διογκωμένο πολυστυρένιο [36] .....	42
Εικόνα 2.15 Πλέουσα Φ/Β μονάδα [36] .....	43
Εικόνα 2.16 Φωτοβολταϊκή συσκευή με πλωτό θόλο [36].....	44
Εικόνα 2.17 Υπεράκτια κατασκευή της εταιρείας SolarinBlue [37] .....	45
Εικόνα 2.18 Υπεράκτια κατασκευή της εταιρείας Tractebel [38].....	45
Εικόνα 2.19 Υπεράκτια εγκατάσταση της Oceans of Energy [39].....	46
Εικόνα 2.20 Διάταξη πλωτών Φ/Β της Ciel&Terre [10] .....	47
Εικόνα 2.21 Άκαμπτα συστήματα πρόσδεσης [42].....	48
Εικόνα 2.22 Εφαρμογή συστήματος πρόσδεσης μονού πασσάλου [42].....	48
Εικόνα 2.23 Τεταμένο σύστημα πρόσδεσης [42].....	49
Εικόνα 2.24 Αλυσοειδές σύστημα πρόσδεσης [42].....	50
Εικόνα 2.25 Συμβατό σύστημα πρόσδεσης [42] .....	50
Εικόνα 2.26 Μεταβολή της γωνίας κλίσης των πλωτών Φ/Β λόγω των κυμάτων [14].....	51
Εικόνα 2.27 Κινήσεις Pitch, Yaw και Roll σε ένα Φ/Β πλαίσιο [14].....	51
Εικόνα 2.28 Επίδραση δυνάμεων ανέμου στα πλωτά πλαίσια (α) στην μπροστινή όψη (β) στην οπίσθια όψη [44].....	54
Εικόνα 2.29 (α) Σχέδιο πειραματικού μοντέλου (β) Πειραματικό μοντέλο στο τούνελ [44] .....	55
Εικόνα 2.30 Κατανομές τοπικών συντελεστών αντίστασης σε διάφορες γωνίες εισόδου:(α) 0°, (β)30°, (c)150° και (d)180° [44].....	56
Εικόνα 2.31 Κατανομές τοπικών συντελεστών άνωσης σε διάφορες γωνίες εισόδου:(α) 0°, (b)30°, (c)150° και (d)180° [44].....	57
Εικόνα 3.1 Αρχική σελίδα του λογισμικού .....	61
Εικόνα 3.2 Καθορισμός προσανατολισμού της εγκατάστασης του έργου.....	61
Εικόνα 3.3 Ορισμός του συστήματος .....	62

Εικόνα 3.4 Καθορισμός απωλειών συστήματος.....	62
Εικόνα 3.5 Καθορισμός τροχιάς του ορίζοντα.....	63
Εικόνα 3.6 Βάσεις δεδομένων του λογισμικού .....	64
Εικόνα 3.7 Επιλογή μεγεθών εξόδου από τους υπολογισμούς του Batch simulation .....	64
Εικόνα 3.8 Μορφή αρχείου εισόδου στο Batch simulation .....	65
Εικόνα 3.9 Μορφή αρχείου εξόδου στο Batch simulation.....	65
Εικόνα 4.1 Οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα [48].....	71
Εικόνα 4.2 Αιολικό δυναμικό (σε ύψος 10 m) στην Ελλάδα [51].....	72
Εικόνα 4.3 Χωρική κατανομή μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου $U_w$ στην Ελλάδα [50].....	72
Εικόνα 4.4 Ισοσταθμικές καμπύλες σημαντικού ύψους κύματος στην Ελλάδα [50].....	73
Εικόνα 4.5 Χωρική κατανομή μέσης τιμής της περιόδου κύματος στην Ελλάδα [50].....	74
Εικόνα 4.6 Βαθυμετρικός χάρτης Ελλάδας.....	75
Εικόνα 4.7 Προστατευόμενες περιοχές Natura στην Ελλάδα [52].....	76
Εικόνα 4.8 Κατελιημμένες περιοχές από διεθνείς συνθήκες στην Ελλάδα [53] .....	76
Εικόνα 4.9 Κατελιημμένες περιοχές ιχθυοκαλλιέργειας στην Ελλάδα [46] .....	77
Εικόνα 4.10 Χάρτης διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα [57].....	78
Εικόνα 4.11 Επιλεχθείσα τοποθεσία των πλωτών φωτοβολταϊκών στην ανοικτή θάλασσα .....	80
Εικόνα 4.12 Αιολικό δυναμικό τοποθεσίας των πάνελ στην ανοικτή θάλασσα [51] .....	81
Εικόνα 5.1 Επιλεχθείσα τοποθεσία για την περίπτωση της λίμνης.....	82
Εικόνα 5.2 Αιολικό δυναμικό τοποθεσίας στην περίπτωση της λίμνης .....	83
Εικόνα 5.3 Πλησιέστερο σημείο δικτύου τάσης ως προς την τοποθεσία της λίμνης .....	84
Εικόνα 6.1 Επιλεχθείσα τοποθεσία των πλωτών φωτοβολταϊκών στην ανοικτή θάλασσα .....	85
Εικόνα 6.2 Συντεταγμένες της τοποθεσίας λήψης μετρήσεων για την περίπτωση της λίμνης .....	86
Εικόνα 6.3 Τυπικό σχήμα της περιοχής εγκατάστασης στην περίπτωση της λίμνης .....	87
Εικόνα 7.1 Χερσαία τοποθεσία στην περίπτωση της ανοικτής θάλασσας.....	89
Εικόνα 7.2 Χερσαία τοποθεσία στην περίπτωση της λίμνης .....	89
Εικόνα 7.3 Διάταξη πλωτών φωτοβολταϊκών σε ελεύθερη στάση [21] .....	92
Εικόνα 7.4 Διάταξη πλωτών φωτοβολταϊκών με μικρό αποτύπωμα στο νερό [21].....	92
Εικόνα 7.5 Διάταξη πλωτών φωτοβολταϊκών με μεγάλο αποτύπωμα στο νερό [21].....	92
Εικόνα 7.6 Εργαλείο custom meteo file import στο PVsyst .....	99
Εικόνα 7.7 Μετατροπή και αναγνώριση δεδομένων μετεωρολογικών αρχείων στο λογισμικό .....	99
Εικόνα 7.8 Μορφή .MET αρχείου στο PVsyst.....	100
Εικόνα 7.9 ΤΜΥ για την περίπτωση της θάλασσας .....	103
Εικόνα 7.10 Μετεωρολογικά δεδομένα για την τοποθεσία της λίμνης .....	104
Εικόνα 7.11 Μετεωρολογικό αρχείο για την τοποθεσία των Νέων Μεσαγκαλών.....	105
Εικόνα 7.12 Μετεωρολογικό αρχείο για την τοποθεσία του Μοσχάτου .....	105
Εικόνα 7.13 Γεωμετρικά μεγέθη της μελέτης απόστασης βήματος [68] .....	111

## Βιβλιογραφία

- [1] ‘Goal 7 | Department of Economic and Social Affairs’. <https://sdgs.un.org/goals/goal7> (ημερομηνία πρόσβασης 6 Ιούνιος 2023).
- [2] ‘Electricity - Fuels & Technologies - IEA’. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity> (ημερομηνία πρόσβασης 6 Ιούνιος 2023).
- [3] ‘Electricity Sector – Analysis - IEA’. <https://www.iea.org/reports/electricity-sector> (ημερομηνία πρόσβασης 6 Ιούνιος 2023).
- [4] I. - International Energy Agency, ‘Renewables 2022’, 2022, Ημερομηνία πρόσβασης: 6 Ιούνιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [5] ‘Annual variable renewable energy share and corresponding system integration phase in selected countries/regions, 2018 – Charts – Data & Statistics - IEA’, 2018. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-variable-renewable-energy-share-and-corresponding-system-integration-phase-in-selected-countries-regions-2018> (ημερομηνία πρόσβασης 5 Ιούνιος 2023).
- [6] ‘Renewable Electricity – Analysis - IEA’. <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity> (ημερομηνία πρόσβασης 6 Ιούνιος 2023).
- [7] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, και R. Gorini, ‘The role of renewable energy in the global energy transformation’, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- [8] X. Wang και A. Barnett, ‘The Evolving Value of Photovoltaic Module Efficiency’, *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 1227, τ. 9, τχ. 6, σ. 1227, Μαρτίου 2019, doi: 10.3390/APP9061227.
- [9] ‘Solar - Fuels & Technologies - IEA’. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar#key-findings> (ημερομηνία πρόσβασης 6 Ιούνιος 2023).
- [10] M. Rosa-Clot και G. M. Tina, ‘Submerged PV Systems’, *Submerged and Floating Photovoltaic Systems*, σσ. 65–87, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-812149-8.00004-1.
- [11] D. Yogi Goswami, *ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*, 3η έκδοση. Εκδόσεις Τζιόλα, 2020.
- [12] Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, *ΘΕΡΜΙΚΑ-ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ*, τ. 1. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015.
- [13] Αρθούρος Ζερβός, *ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.
- [14] R. Bugeja, L. Mule’ Stagno, και N. Branche, ‘The effect of wave response motion on the insolation on offshore photovoltaic installations’, *Solar Energy Advances*, τ. 1, σ. 100008, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1016/J.SEJA.2021.100008.
- [15] E. D. Mehleri, P. L. Zervas, H. Sarimveis, J. A. Palyvos, και N. C. Markatos, ‘Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays’, *Renew Energy*, τ. 35, τχ. 11, σσ. 2468–2475, Νοεμβρίου 2010, doi: 10.1016/j.renene.2010.03.006.
- [16] B. Y. H. Liu και R. C. Jordan, ‘The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. With design data for the U.S., its outlying possessions and Canada’, *Solar Energy*, τ. 7, τχ. 2, σσ. 53–74, 1963, doi: 10.1016/0038-092X(63)90006-9.
- [17] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, και R. Stewart, ‘Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance’, *Solar Energy*, τ. 44, τχ. 5, σσ. 271–289, 1990, doi: 10.1016/0038-092X(90)90055-H.

- [18] W. A. Beckman, ‘Solar Engineering of Thermal Processes’, 2013, Ημερομηνία πρόσβασης: 1 Μάιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [www.wiley.com/go/permissions](http://www.wiley.com/go/permissions).
- [19] ‘Project design > Array and system losses > Array Thermal losses’. [https://www.pvsyst.com/help/thermal\\_loss.htm](https://www.pvsyst.com/help/thermal_loss.htm) (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [20] J. D. Mondol, Y. G. Yohanis, και B. Norton, ‘The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system’, *Renew Energy*, τ. 32, τχ. 1, σσ. 118–140, Ιανουαρίου 2007, doi: 10.1016/J.RENENE.2006.05.006.
- [21] S. Oliveira-Pinto και J. Stokkermans, ‘Assessment of the potential of different floating solar technologies – Overview and analysis of different case studies’, *Energy Convers Manag*, τ. 211, Μαΐου 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112747.
- [22] K. Trapani και M. Redón Santafé, ‘A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013’, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, τ. 23, τχ. 4. John Wiley and Sons Ltd, σσ. 524–532, 1 Απρίλιος 2015. doi: 10.1002/rip.2466.
- [23] M. Dörenkämper, A. Wahed, A. Kumar, M. de Jong, J. Kroon, και T. Reindl, ‘The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore’, *Solar Energy*, τ. 219, σσ. 15–23, Μαΐου 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.03.051.
- [24] ‘Where Sun Meets Water FLOATING SOLAR MARKET REPORT EXECUTIVE SUMMARY’, 2018, Ημερομηνία πρόσβασης: 11 Ιούνιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)
- [25] ‘DNV aims to achieve FPV-specific reference standards for floating solar PV – pv magazine International’. <https://www.pv-magazine.com/2022/05/13/dnv-aims-to-achieve-fpv-specific-reference-standards-for-floating-solar-pv/> (ημερομηνία πρόσβασης 11 Ιούνιος 2023).
- [26] ‘Floating solar photovoltaic systems on global reservoirs hold great potential for enormous energy production and water savings’. <https://newshub.sustech.edu.cn/en/html/202303/39031.html> (ημερομηνία πρόσβασης 11 Ιούνιος 2023).
- [27] M. Redón Santafé, J. B. Torregrosa Soler, F. J. Sánchez Romero, P. S. Ferrer Gisbert, J. J. Ferrán Gozávez, και C. M. Ferrer Gisbert, ‘Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs’, *Energy*, τ. 67, σσ. 246–255, Απριλίου 2014, doi: 10.1016/J.ENERGY.2014.01.083.
- [28] J. Corominas, ‘Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad’, *Ingeniería del agua*, τ. 17, τχ. 3, Σεπτεμβρίου 2010, doi: 10.4995/IA.2010.2977.
- [29] M. Al-Widyan, M. Khasawneh, και M. Abu-Dalo, ‘Potential of Floating Photovoltaic Technology and Their Effects on Energy Output, Water Quality and Supply in Jordan’, *Energies 2021, Vol. 14, Page 8417*, τ. 14, τχ. 24, σ. 8417, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.3390/EN14248417.
- [30] N. Dang και A. Thi, ‘The global evolution of floating solar PV THE EVOLUTION OF FLOATING SOLAR PHOTOVOLTAICS’, 2017. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.researchgate.net/publication/321461989>
- [31] ‘Where Sun Meets Water FLOATING SOLAR HANDBOOK FOR PRACTITIONERS’, 2019. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)
- [32] ‘Changbing, TAIWAN - Ciel et Terre’. <https://ciel-et-terre.net/project/changbing/> (ημερομηνία πρόσβασης 12 Ιούνιος 2023).
- [33] ‘Anhui CECEP, CHINA - Ciel et Terre’. <https://ciel-et-terre.net/project/anhui-cecep/> (ημερομηνία πρόσβασης 12 Ιούνιος 2023).

- [34] ‘Wanxing, TAIWAN - Ciel et Terre’. <https://ciel-et-terre.net/project/wanxing/> (ημερομηνία πρόσβασης 12 Ιούνιος 2023).
- [35] I. A. Daroen, ‘Risk Assessment of Offshore Floating Photovoltaic Systems Methodology for Technological Risks’. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://repository.tudelft.nl/>.
- [36] M. Grech και M. Cadamuro, ‘FLOATING PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS IN MALTESE SEA WATERS’.
- [37] ‘SolarinBlue - Offshore floating solar photovoltaics pioneer - SolarinBlue’. <https://solarinblue.com/en/home/> (ημερομηνία πρόσβασης 15 Ιούνιος 2023).
- [38] ‘Tractebel and partners present SEAVOLT© offshore floating solar technology | Tractebel’. <https://tractebel-engie.com/en/news/2023/tractebel-and-partners-present-seavolt-offshore-floating-solar-technology> (ημερομηνία πρόσβασης 16 Ιούνιος 2023).
- [39] ‘North Sea 1 Offshore Solar Project - Oceans of Energy’. <https://oceansofenergy.blue/north-sea-1/> (ημερομηνία πρόσβασης 17 Ιούνιος 2023).
- [40] M. Ikhennicheu, B. Danglade, R. Pascal, V. Arramounet, Q. Trébaol, και F. Gorintin, ‘Analytical method for loads determination on floating solar farms in three typical environments’, *Solar Energy*, τ. 219, σσ. 34–41, Μαΐου 2021, doi: 10.1016/j.solener.2020.11.078.
- [41] ‘ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗ ΚΑΙ ΠΛΩΤΟΥΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΣΤΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ’.
- [42] Marco. Rosa-Clot και Giuseppe. Marco Tina, ‘Floating PV Plants’, σ. 140, 2020.
- [43] W. P. Warsido, G. T. Bitsuamlak, J. Barata, και A. Gan Chowdhury, ‘Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array’, *J Fluids Struct*, τ. 48, σσ. 295–315, Ιουλίου 2014, doi: 10.1016/J.JFLUIDSTRUCTS.2014.03.005.
- [44] S. M. Choi, C. D. Park, S. H. Cho, και B. J. Lim, ‘Effects of wind loads on the solar panel array of a floating photovoltaic system – Experimental study and economic analysis’, *Energy*, τ. 256, σ. 124649, Οκτωβρίου 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.124649.
- [45] M. Ikhennicheu, B. Danglade, R. Pascal, V. Arramounet, Q. Trébaol, και F. Gorintin, ‘Analytical method for loads determination on floating solar farms in three typical environments’, *Solar Energy*, τ. 219, σσ. 34–41, Μαΐου 2021, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.11.078.
- [46] D. G. Vagiona, G. Tzekakis, E. Loukogeorgaki, και N. Karanikolas, ‘Site Selection of Offshore Solar Farm Deployment in the Aegean Sea, Greece’, *Journal of Marine Science and Engineering 2022, Vol. 10, Page 224*, τ. 10, τχ. 2, σ. 224, Φεβρουαρίου 2022, doi: 10.3390/JMSE10020224.
- [47] E. Noorollahi, D. Fadai, M. A. Shirazi, και S. H. Ghodsipour, ‘Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) - A case study of Iran’, *Energies (Basel)*, τ. 9, τχ. 8, Αυγούστου 2016, doi: 10.3390/en9080643.
- [48] T. Katopodis, I. Markantonis, N. Politi, D. Vlachogiannis, και A. Sfetsos, ‘High-Resolution Solar Climate Atlas for Greece under Climate Change Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model’, *Atmosphere 2020, Vol. 11, Page 761*, τ. 11, τχ. 7, σ. 761, Ιουλίου 2020, doi: 10.3390/ATMOS11070761.
- [49] M. Deveci, D. Pamucar, και E. Oguz, ‘Floating photovoltaic site selection using fuzzy rough numbers based LAAW and RAFSI model’, *Appl Energy*, τ. 324, σ. 119597, Οκτωβρίου 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.119597.

- [50] T. Soukissian και M. Hatzinaki, 'Wind and Wave Atlas of the Hellenic Seas Anastasios Papadopoulos Hellenic Centre for Marine Research', 2007. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://www.mdpi.com/journal/processes/special\\_issues/Marine\\_Renewable\\_Energy](https://www.mdpi.com/journal/processes/special_issues/Marine_Renewable_Energy)
- [51] 'Global Wind Atlas'. <https://globalwindatlas.info/en> (ημερομηνία πρόσβασης 18 Μάρτιος 2023).
- [52] 'ArcGIS Web Application'. <https://natura2000.eea.europa.eu/> (ημερομηνία πρόσβασης 7 Μάρτιος 2023).
- [53] 'Περιοχές προστατευόμενες από διεθνείς συνθήκες - Δεδομένα - GEODATA.gov.gr'. <http://geodata.gov.gr/dataset/periokhes-prostateuomenes-apo-diethneis-suntheke> (ημερομηνία πρόσβασης 29 Μάρτιος 2023).
- [54] Τ. Δευτερο, 'ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ'.
- [55] S. Spyridonidou, D. G. Vagiona, και E. Loukogeorgaki, 'Strategic planning of offshore wind farms in Greece', *Sustainability (Switzerland)*, τ. 12, τχ. 3, Φεβρουαρίου 2020, doi: 10.3390/su12030905.
- [56] T. Kim, J. Il Park, και J. Maeng, 'Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea', *Renew Energy*, τ. 94, σσ. 619–628, Αυγούστου 2016, doi: 10.1016/J.RENENE.2016.03.083.
- [57] 'Χάρτης Γραμμών Μεταφοράς | ΑΔΜΗΕ'. <https://www.admie.gr/systima/perigrafi/hartis-grammon> (ημερομηνία πρόσβασης 22 Μάρτιος 2023).
- [58] T. Kim, J. Il Park, και J. Maeng, 'Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea', *Renew Energy*, τ. 94, σσ. 619–628, Αυγούστου 2016, doi: 10.1016/J.RENENE.2016.03.083.
- [59] R. Sistema Energetico, 'Site Selection Analysis for Offshore Combined Resource Projects in Europe Results of the FP7 ORECCA Project Work Package 2 Site Selection Analysis For Offshore Combined Resource Projects in Europe Site Selection Analysis for Offshore Combined Resource Projects in Europe Results of the FP7 ORECCA Project Work Package 2', 2011.
- [60] H. Liu, V. Krishna, J. Lun Leung, T. Reindl, και L. Zhao, 'Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, τ. 26, τχ. 12, σσ. 957–967, Δεκεμβρίου 2018, doi: 10.1002/PIP.3039.
- [61] D. Dahlioui, B. Laarabi, και A. Barhdadi, 'Investigation of soiling impact on PV modules performance in semi-arid and hyper-arid climates in Morocco', *Energy for Sustainable Development*, τ. 51, σσ. 32–39, Αυγούστου 2019, doi: 10.1016/J.ESD.2019.05.001.
- [62] 'Homepage | Copernicus'. <https://www.copernicus.eu/en> (ημερομηνία πρόσβασης 28 Μάιος 2023).
- [63] 'ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present'. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (ημερομηνία πρόσβασης 28 Μάιος 2023).
- [64] D. S. Renné, 'Resource assessment and site selection for solar heating and cooling systems', *Advances in Solar Heating and Cooling*, σσ. 13–41, Ιανουαρίου 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100301-5.00002-3.
- [65] 'Meteo Database > TMY data generation > TMY generation algorithms'. [https://www.pvsyst.com/help/meteo\\_tmy\\_algorithms.htm](https://www.pvsyst.com/help/meteo_tmy_algorithms.htm) (ημερομηνία πρόσβασης 30 Μάιος 2023).
- [66] D. Pissimanis, G. Karras, V. Notaridou, και K. Gavra, 'THE GENERATION OF A 'TYPICAL METEOROLOGICAL YEAR' FOR THE CITY OF ATHENS', τ. 40, τχ. 5, σσ. 405–411, 1988.
- [67] Ivona Kocheva, 'Typical Meteorological Year, a brief review...', 26 Απρίλιος 2020. <https://www.linkedin.com/pulse/typical-meteorological-year-brief-review-ivona-ristova/> (ημερομηνία πρόσβασης 31 Μάιος 2023).

- [68] G. M. Tina, F. Bontempo Scavo, L. Merlo, και F. Bizzarri, ‘Comparative analysis of monofacial and bifacial photovoltaic modules for floating power plants’, *Appl Energy*, τ. 281, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116084.
- [69] ‘(34) Floatovoltaics – Thinking Beyond the Cost of Floating Solar PV | LinkedIn’. <https://www.linkedin.com/pulse/floatovoltaics-thinking-beyond-cost-floating-solar-pv-mark-leybourne/> (ημερομηνία πρόσβασης 4 Ιούνιος 2023).