

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΛΩΤΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ



Συγγραφέας: Γιαουζάκης Γεώργιος

Επιβλέποντες:

Καραπιδάκης Εμμανουήλ, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Κατσαμάκη Αναστασία, Μέλος ΕΔΙΠ ΕΛΜΕΠΑ

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής:

Κατσίγιαννης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Μεταπτυχιακή Εργασία που υποβλήθηκε για την εκπλήρωση των απαιτήσεων για το Μεταπτυχιακό
στα «Ηλεκτρονικά Συστήματα Τηλεπικοινωνιών και Αυτοματισμού»

Copyright © <Γιαουζάκης Γεώργιος>, 24/6/ 2024

Εγώ, ο Γιαουζάκης Γεώργιος του Εμμανουήλ, με Αριθμό Μητρώου ΜΤΤ79, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρονικά Συστήματα Τηλεπικοινωνιών και Αυτοματισμού» του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, πιστοποιώ ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας με Τίτλο «Πλωτά Θαλάσσια Φωτοβολταϊκά Προκλήσεις και Προοπτικές» και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος».

Ο Δηλών: Γιαουζάκης Γεώργιος

Ημερομηνία: Ιούνιος Ιούνιος, 2024

Συντομογραφίες

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ

ΦΒ – Φωτοβολταϊκό

ΑΓΓΛΙΚΕΣ

SIDS - Small Island Developing States - (Μικρά Νησιωτικά Αναπτυσσόμενα Κράτη)

LDC - Least Developed Countries – (Λιγότερο Ανεπτυγμένα Κράτη)

EGD – European Green Deal – (Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία)

HDPE - High Density Polyethylene – (Υψηλής Πυκνότητας Πολυαιθυλένιο)

TRL – Technology Readiness Levels – (Επίπεδα Τεχνολογικής Ετοιμότητας)

PS - Polystyrene – (Πολυστυρένιο)

FLS – Fatigue Limit State – (Οριακή Κατάσταση Κόπωσης)

ULS – Ultimate Limit State - (Οριακή Κατάσταση Λειτουργίας)

SLS – Serviceability Limit State – (Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας)

ALS – Accidental Limit State – (Οριακή Κατάσταση Ατυχήματος)

PVC- Polyvinyl chloride –(Πολυβινυλοχλωρίδιο)

IP – International Protection – (Διεθνής Προστασία)

LCOE- Levelized Cost Of Energy (Ισοσταθμισμένο Κόστος Ενέργειας)

CAPEX- Capital Expenditures – (Κεφαλαιουχικές Δαπάνες)

OPEX – Operating Expenses – (Λειτουργικές Δαπάνες)

EYA – Energy Yield Analysis – (Ανάλυση Ενεργειακής Απόδοσης)

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	8
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Κατηγορίες ΦΒ συστημάτων.....	8
2. ΠΛΩΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	10
2.1 Έννοια του πλωτού ΦΒ συστήματος.....	10
2.2 Ιστορική αναδρομή πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	12
2.3 Κατηγορίες πλωτών ΦΒ συστημάτων θαλάσσια ΦΒ.....	14
2.4 Κατευθύνσεις συστημάτων.....	16
2.5 Σύνοψη κατασκευαστών θαλάσσιων πλωτών ΦΒ συστημάτων στην Ευρώπη.....	20
2.5.1 Bluewater.....	22
2.5.2 Solar Duck.....	22
2.5.3 Oceans of Energy.....	23
2.5.4 Swimsol.....	24
2.5.5 Ocean Sun.....	25
2.5.6 SINN Power.....	26
3. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	27
3.1 Σχεδιασμός και κατασκευή.....	27
3.2 Επιλογή υλικών και αντοχή.....	28
3.3 Σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης.....	30
3.3.1 Διατάξεις πρόσδεσης.....	31
3.3.2 Γραμμές Πρόσδεσης.....	33
3.3.3 Σύστημα αγκύρωσης.....	35
3.4 Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός – σύνδεση με το δίκτυο.....	37
3.4.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	38
3.4.2 Αντιστροφεείς.....	41
3.4.3 Καλώδια.....	42
3.5 Λειτουργία και συντήρηση.....	43
3.6 Κοινωνική αποδοχή.....	43
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	45
4.1 Ισοσταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE).....	45
4.2 Εκτιμήσεις Ισοσταθμισμένου Κόστους Ενέργειας Πλωτών ΦΒ Συστημάτων.....	49
4.3 Προοπτική μείωσης του LCOE των υπεράκτιων πλωτών ΦΒ έργων.....	51
5. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	53
5.1 Παραδείγματα Χωρών της Ευρώπης.....	53
5.2 Η Περίπτωση της Ελλάδας.....	55
5.3 Προοπτικές για την Ελλάδα.....	59
6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	62
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	64
7.1 Βιβλία- Επιστημονικά Άρθρα.....	64
7.2 Ηλεκτρονικές Πηγές/ Ιστοσελίδες.....	65
7.3 Νομοθεσίες.....	66

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Παγκόσμια εγκατεστημένη πλωτή ΦΒ ισχύς και ετήσιες προσθήκες.	12
Σχήμα 2-2: Κυματικό Φάσμα, (ECMWF, Ocean Wave Model ECWAM)	15
Σχήμα 3-1: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού πλωτού ΦΒ συστήματος μεγάλης κλίμακας με τα βασικά του μέρη.	38
Σχήμα 3-2 Διάγραμμα Pareto των πιο συχνών τρόπων υποβάθμισης α) για όλα τα χρόνια β) συστήματα εγκατεστημένα για 10 χρόνια.....	40
Σχήμα 4-1:Ενεργειακό μοντέλο παραγωγής ενέργειας	48
Σχήμα 4-2: Μοντέλο LCOE, Μείωσης κόστους έως το 2030. (Oceans of Energy)	50

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1-1: Χερσαίο ΦΒ σύστημα	8
Εικόνα 1-2: ΦΒ σύστημα σε οροφή.....	9
Εικόνα 2-1: Κύρια μέρη ενός πλωτού ΦΒ συστήματος,(Series,WBG and IFC 2018).	10
Εικόνα 2-2: Πλωτή ΦΒ εγκατάσταση στην Ιαπωνία.	13
Εικόνα 2-3: Πρώτο πλωτό ΦΒ σε υδροηλεκτρικό ταμιευτήρα, Montalegre, Πορτογαλία.	13
Εικόνα 2-4: Σχέδιο συστήματος “Pontoon”.	16
Εικόνα 2-5: Σχέδιο συστήματος “Truss”	17
Εικόνα 2-6: Σχέδιο συστήματος “Soft and Flex”	18
Εικόνα 2-7: Σχέδιο συστήματος “Fish Farm”.	19
Εικόνα 2-8: 20KW σύστημα της εταιρείας Bluewater στο Oostvoornse Meer.	22
Εικόνα 2-9: 65KW σύστημα της εταιρείας Solar Duck στο Gelderland.....	23
Εικόνα 2-10: 50KW σύστημα της εταιρείας Oceans of Energy στο Scheveningen	23
Εικόνα 2-11: Το σύστημα της εταιρείας Swimsol στις Μαλδίβες.	24
Εικόνα 2-12: α) 2MW Σύστημα στην Αλβανία, β) 500KW Σύστημα ενσωματωμένο σε υπεράκτια Α/Γ στην Κίνα.	25
Εικόνα 2-13: 80KW σύστημα της εταιρείας SINN Power στο Ηράκλειο Κρήτης.	26
Εικόνα 3-1: α) διάβρωση β) κόπωση γ) θαλάσσια ανάπτυξη.	30
Εικόνα 3-2: Διάταξη πρόσδεσης “Catenary”.	31
Εικόνα 3-3:Διάταξη πρόσδεσης “Taunt”	32
Εικόνα 3-4: Διάταξη πρόσδεσης “Hybrid”	33
Εικόνα 3-5: α) Αλυσίδες με ενισχυμένους κρίκους β) Χωρίς ενισχυμένους κρίκους.	34
Εικόνα 3-6: Συρματόσχοινό.	34
Εικόνα 3-7: Συνθετικό σχοινί.	35
Εικόνα 3-8: Άγκυρες νεκρού βάρους.	36
Εικόνα 3-9: Συρτή άγκυρα.	36
Εικόνα 3-10: α) Άγκυρα Πάσσαλος β) Άγκυρά Τορπίλη γ) Βιδωτή ή Ελικοειδής Άγκυρα.	37
Εικόνα 3-11: Ενσωμάτωση πλωτού ΦΒ σταθμού με άλλες τεχνολογίες.	43
Εικόνα 5-1: Παγκόσμια ακτινοβολία και δυναμικό ηλιακής ενέργειας(PVGIS,2019)	60

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1: Κατηγορίες πλωτών Φ/Β.....	15
Πίνακας 2-2: Επίπεδα Τεχνολογικής Ετοιμότητας TRL , (Horizon 2020-Work program, General Annexes).....	21
Πίνακας 2-3: Κατασκευαστές θαλάσσιων πλωτών ΦΒ συστημάτων στην Ευρώπη.....	21
Πίνακας 4-1:Σύνοψη εκτιμήσεων TRL και LCOE για τα πλωτά ΦΒ. (πηγή: TNO,2022).	51

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες απειλές του αιώνα που διανύουμε και επηρεάζει ήδη πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο. Οι επιπτώσεις αυτές οφείλονται στην αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως από τον ενεργειακό τομέα, ο οποίος ευθύνεται για τα δύο τρίτα του παγκόσμιου συνόλου (IRENA,2019a). Η παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια αυξάνεται συνεχώς και προβλέπεται να αυξηθεί κατά 28% μεταξύ του 2015 και 2040 (IEA,2017a) κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία όπου η έντονη οικονομική ανάπτυξη οδηγεί στην αυξημένη ζήτηση ενέργειας (IEA,2017b). Οι περισσότερες από αυτές τις αναπτυσσόμενες οικονομίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο), για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ως εκ τούτου, τα ενεργειακά συστήματα παγκοσμίως πρέπει να μεταβούν σε ανανεώσιμες και καθαρές πηγές ενέργειας και να υποστούν ριζικές αλλαγές, καθοδηγούμενα από έναν συνδυασμό τεχνολογικών καινοτομιών, την ανάγκη παροχής προσιτών πηγών ενέργειας και την επιτακτική ανάγκη να δοθεί τέλος στην κλιματική αλλαγή.

Για τον μετασχηματισμό του ενεργειακού τομέα απαιτείται στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι ωκεανοί του πλανήτη αποτελούν πηγή άφθονης ενέργειας η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί από τις υπεράκτιες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως των τεχνολογιών υπεράκτιων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας (σταθερής στήριξης, πλωτών), των τεχνολογιών ωκεάνιας ενέργειας (κυματική, παλιρροϊκή), και των πλωτών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, οι οποίες θα συμβάλουν στην απαλλαγή του ενεργειακού τομέα από τον άνθρακα.

Οι κυβερνήσεις έχοντας κατανοήσει την επιτακτική ανάγκη του μετασχηματισμού του ενεργειακού τομέα, κάνουν σημαντικές προσπάθειες για την αναζήτηση βιώσιμων πηγών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε ως στόχο την κλιματική ουδετερότητά της έως το 2050, βασίζοντας την επίτευξη αυτού του φιλόδοξου στόχου στην αύξηση των υπεράκτιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα οφέλη των υπεράκτιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν περιορίζονται μόνο στον ενεργειακό τομέα, καθώς η ενέργεια που αξιοποιείται από τους ωκεανούς έχει τη δυνατότητα να προωθήσει μια δυναμική παγκόσμια γαλάζια οικονομία για μια μεγάλη σειρά εφαρμογών, όπως η ναυτιλία, η ψύξη, η υδατοκαλλιέργεια και η αφαλάτωση νερού. Οι υπεράκτιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναμένεται να προσφέρουν σημαντικά κοινωνικοοικονομικά οφέλη και να βελτιώσουν τους πόρους διαβίωσης των νησιών και ιδίως των μικρών νησιωτικών αναπτυσσόμενων κρατών (SIDS) και των λιγότερο ανεπτυγμένων χωρών (LDC), μέσω της δημιουργίας θέσεων εργασίας, των τοπικών αξιακών αλυσίδων και των συνεργειών μεταξύ των διαφόρων φορέων της γαλάζιας οικονομίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας στον ωκεανό αξιοποιώντας την τεχνολογία των πλωτών φωτοβολταϊκών. Το αυξημένο ενδιαφέρον των Ευρωπαϊκών χωρών για τη συγκεκριμένη τεχνολογία ώστε να αντιμετωπίσουν την κλιματική αλλαγή και τις αυξημένες ενεργειακές τους ανάγκες την καθιστούν ιδιαίτερα σημαντική παρόλο που δεν βρίσκεται σε τελικό στάδιο αξιοποίησης. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστεί η συγκεκριμένη τεχνολογία και το στάδιο ανάπτυξης στο οποίο βρίσκεται σήμερα. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει στην εφαρμογή της, τα πλεονεκτήματα της καθώς και οι προοπτικές βιωσιμότητας της. Τέλος θα παρουσιαστούν στοιχεία, που θα προκύψουν μέσα από αναζήτηση βιβλιογραφίας και ηλεκτρονικών πηγών, για το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η Ελλάδα καθώς και οι υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες τόσο σε θέματα νομοθεσίας όσο και σε πιλοτικά προγράμματα.

1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυξάνονται ραγδαία σε όλο τον κόσμο. Η ηλιακή ενέργεια θεωρείται μία από τις πιο ελκυστικές ανανεώσιμες πηγές καθώς αποτελεί μια πηγή η οποία είναι καθαρή και ανεξάντλητη σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα. Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

1.2 Κατηγορίες ΦΒ συστημάτων

Η χρήση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων συναντάται σε διάφορες εφαρμογές και κλίμακες όπως μικροϋπολογιστές τσέπης, φωτεινούς σηματοδότες, οδικές πινακίδες, και τηλέφωνα έκτακτης ανάγκης στους αυτοκινητόδρομους. Όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τα ευρέως διαδεδομένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι α) τα χερσαία συστήματα (ground mounted), και β) τα συστήματα εγκατεστημένα σε στέγες κτιρίων (roof-top).

- α) Τα **χερσαία συστήματα** είναι συνήθως μεγάλης κλίμακας και εγκαθίστανται στο έδαφος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε βάσεις αλουμινίου οι οποίες στηρίζονται σταθερά στο έδαφος ή μπορούν να ακολουθούν τη φορά του ήλιου.



Εικόνα 1-1: Χερσαίο ΦΒ σύστημα

- β) Τα συστήματα εγκατεστημένα σε στέγες κτιρίων, είναι συστήματα μικρότερης κλίμακας σε σχέση με τα επίγεια και μπορούν να τοποθετηθούν επάνω σε μία οικιστική ή βιομηχανική στέγη.



Εικόνα 1-2: ΦΒ σύστημα σε οροφή

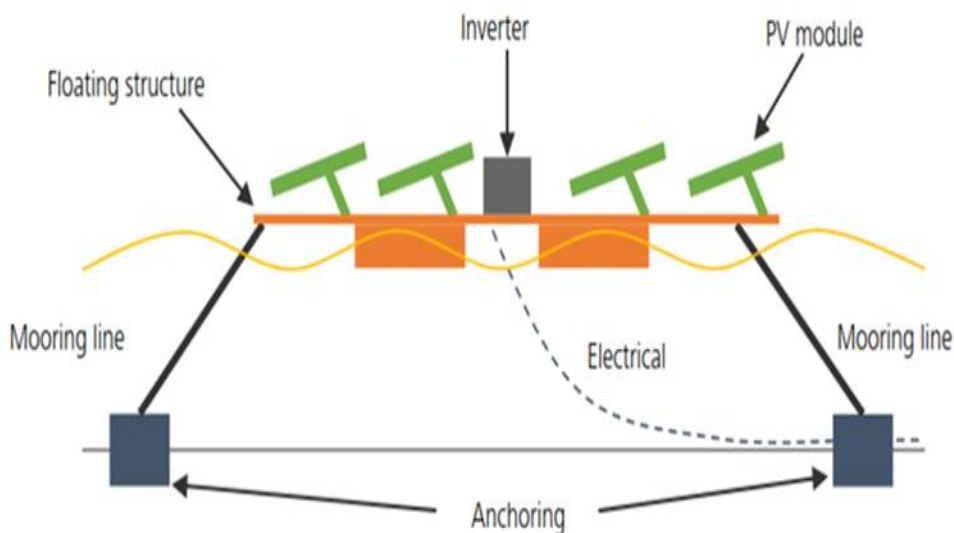
Τα τελευταία χρόνια τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν μια σταθερή ανάπτυξη λόγω του μειωμένου κόστους, όμως η έλλειψη διαθέσιμης γης ειδικά στις πυκνοκατοικημένες περιοχές, γεγονός που σημαίνει ότι οι φωτοβολταϊκές εφαρμογές έρχονται σε αντιπαράθεση με τη γεωργική χρήση της γης και τον τουρισμό (Liu et al.,2018). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προκλήσεις για την απόκτηση γης για ενεργειακά έργα. Δεδομένου της αντιπαράθεσης για τη χρήση γης τα πλωτά φωτοβολταϊκά έχουν προκύψει για τον μετριασμό των παραπάνω προκλήσεων.

2. ΠΛΩΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Έννοια του πλωτού ΦΒ συστήματος

Τα πλωτά φωτοβολταϊκά είναι μια ταχέως αναδυόμενη τεχνολογία με μεγάλες δυνατότητες ραγδαίας ανάπτυξης. Ένα πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού της φωτοβολταϊκής και της πλωτής τεχνολογίας που έχει ως αποτέλεσμα μια νέα ιδέα για την τεχνολογική πρόοδο. Τα πλωτά φωτοβολταϊκά, είτε στο γλυκό είτε στο θαλασσινό νερό μπορούν να θεωρηθούν ως ο τρίτος πυλώνας της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών μαζί με τα χερσαία και τα φωτοβολταϊκά στις στέγες λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για μία τέτοια τεχνολογία, κυρίως για χώρες με περιορισμένη διαθεσιμότητα γης όπως οι πυκνοκατοικημένες χώρες (IRENA, 2020a).

Τα κύρια δομικά μέρη ενός πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος περιλαμβάνουν (I) το πλωτό σύστημα, (II) τα ΦΒ πλαίσια και το σύστημα υποστήριξής τους, (III) το σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης, (IV) και τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, όπως φαίνονται στην εικόνα 2-1.



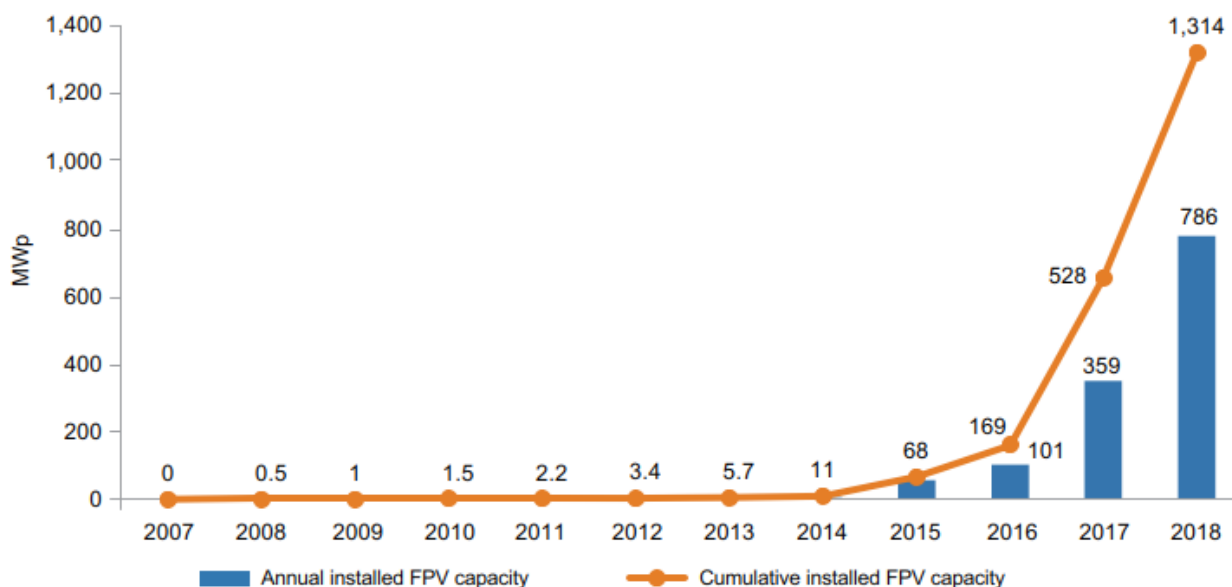
Εικόνα 2-1: Κύρια μέρη ενός πλωτού ΦΒ συστήματος, (Series, WBG and IFC 2018).

- I. **Πλωτό σύστημα:** Πρόκειται για την κύρια δομή του συστήματος που μπορεί να αποτελείται από πολλαπλούς πλωτήρες ειδικά σχεδιασμένους για την άμεση στήριξη των φωτοβολταϊκών πλασίων, είτε από έναν πλωτήρα ικανό να επιπλέει με ένα βαρύ φορτίο και να παρέχει πλευστότητα στο όλο σύστημα και στήριξη στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και το σύστημα υποστήριξής τους. Τόσο η επιλογή των κατάλληλων υλικών όσο και ο όγκος του πλωτήρα εξαρτάται από το υδάτινο περιβάλλον και τις ιδιαιτερότητες της υδάτινης επιφάνειας (Kim,2019). Το πιο συνηθισμένο υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί στα μέχρι τώρα συστήματα είναι από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE).
- II. **Φωτοβολταϊκά πλαίσια και σύστημα στήριξης:** Στις μέχρι τώρα πλωτές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις έχουν χρησιμοποιηθεί κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια όπου πολλαπλά πλαίσια τοποθετούνται στην κατασκευή με ένα σύστημα στήριξης που τα διατηρεί στη θέση τους. Ανάλογα με την τεχνολογία, το σύστημα στήριξης των πλασίων μπορεί να αποτελεί ενσωματωμένο μέρος της πλωτής κατασκευής. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκαθίσταται συνήθως με σταθερή κλίση.
- III. **Σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης:** Το σύστημα πρόσδεσης σταθεροποιεί τη θέση της πλωτής κατασκευής στον πυθμένα ή και στην ακτή. Ο σχεδιασμός του συστήματος πρόσδεσης εξαρτάται από τις γεωτεχνικές συνθήκες και τις μεταβολές της στάθμης του νερού της τοποθεσίας πρόσδεσης. Για το σύστημα πρόσδεσης συνήθως χρησιμοποιούνται χαλύβδινα σύρματα ή συνθετικά σχοινιά σε συνδυασμό με χαλύβδινες αλυσίδες, ενώ για το σύστημα αγκύρωσης χρησιμοποιούνται συνήθως αντίβαρα σκυροδέματος ή ελικοειδείς πάσσαλοι.
- IV. **Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός:** Ο βασικός ηλεκτρολογικός εξοπλισμός περιλαμβάνει τους αντιστροφείς (inverters), που μπορούν να εγκατασταθούν είτε πάνω στην πλωτή εγκατάσταση είτε στην ξηρά ανάλογα με την κατηγορία του πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος, και από την ηλεκτρική διασύνδεση του πλωτού συστήματος με τον υποσταθμό ξηράς μέσω υποβρύχιου καλωδίου. Μέχρι σήμερα στα περισσότερα έργα που έχουν υλοποιηθεί δεν έχει γίνει εγκατάσταση υποβρυχίων καλωδίων καθώς έχουν εγκατασταθεί σε λίμνες ή τεχνητούς ταμιευτήρες όπου δεν υπάρχει έντονη κυματική δραστηριότητα.

2.2 Ιστορική αναδρομή πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η εγκατάσταση πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων στο γλυκό νερό (λίμνες, τεχνητοί ταμιευτήρες) ξεκίνησε το 2007 στο Aichi της Ιαπωνίας όπου κατασκευάστηκε το πρώτο πλωτό φωτοβολταϊκό σε λίμνη, ενώ ακολούθησαν πολλές ακόμα χώρες όπως η Γαλλία, η Ιταλία, η Ισπανία, η Κορέα και οι Ηνωμένες Πολιτείες, οι οποίες δοκίμασαν την τεχνολογία για ερευνητικούς σκοπούς. Η πρώτη εμπορική εγκατάσταση ήρθε το 2008 στο οινοποιείο Far Niente στην Καλιφόρνια, όπου κατασκευάστηκε ένα σύστημα 175 kWp σε μία τεχνητή δεξαμενή για να αποφευχθεί η κατάληψη γης προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την καλλιέργεια σταφυλιών. Εγκαταστάσεις μεγαλύτερες από 1 MWp άρχισαν να εμφανίζονται το 2013. Μετά από το αρχικό κύμα ανάπτυξης που επικεντρώθηκε στην Ιαπωνία, τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Κορέα, η αγορά των πλωτών φωτοβολταϊκών εξαπλώθηκε και σε άλλες χώρες στον κόσμο ανάμεσα τους και η Κίνα η οποία είναι και ο μεγαλύτερος παίκτης στην αγορά σήμερα. Το πρώτο σύστημα μεγαλύτερο των 10 MWp εγκαταστάθηκε το 2016, και το 2018 άρχισαν να υλοποιούνται εγκαταστάσεις μεγαλύτερες των 100MWp.

Τον Δεκέμβριο του 2018 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς πλωτών φωτοβολταϊκών ήταν περίπου 1.3GWp, το ίδιο ορόσημο που έφτασαν τα επίγεια φωτοβολταϊκά το 2000.



Σχήμα 2-1: Παγκόσμια εγκατεστημένη πλωτή ΦΒ ισχύς και ετήσιες προσθήκες.

(World Bank Group, ESMAP and SERIS 2019)

Οι περισσότερες πλωτές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μέχρι σήμερα βρίσκονται σε τεχνητούς ταμιευτήρες, φυσικές λίμνες, και τεχνητές λίμνες άρδευσης, αλλά έχουν αρχίσει να εμφανίζονται και οι πρώτοι συνδυασμοί με ταμιευτήρες υδροηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι επιφέρουν πρόσθετα οφέλη αξιοποιώντας την υπάρχουσα υποδομή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2-2: Πλωτή ΦΒ εγκατάσταση στην Ιαπωνία.



Εικόνα 2-3: Πρώτο πλωτό ΦΒ σε υδροηλεκτρικό ταμιευτήρα, Montalegre, Πορτογαλία.

Καθώς οι εφαρμογές πλωτών φωτοβολταϊκών στο γλυκό νερό γίνονται όλο και πιο διαδεδομένες, ο τομέας έχει ήδη επικεντρωθεί στην αναζήτηση ευκαιριών μεταξύ των θαλάσσιων εφαρμογών. Με τα υπεράκτια περιβάλλοντα να αντιπροσωπεύουν μια τεράστια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας και με τις υποδομές θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τεχνολογίες υπεράκτιων ανέμων, παλιρροιακού ρεύματος και κυματικής ενέργειας, να έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν σημαντικά στο

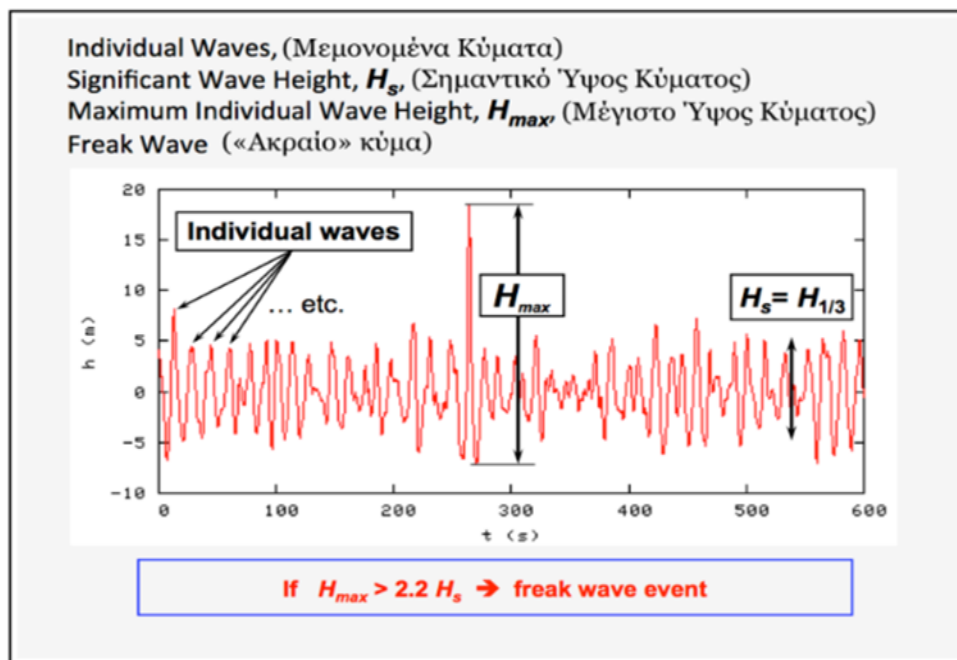
μελλοντικό ενεργειακό μείγμα, είναι σημαντικό να διερευνηθούν η τεχνική σκοπιμότητα και οι προκλήσεις του σχεδιασμού πλωτών φωτοβολταϊκών σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Η μετάβαση των πλωτών ηλιακών εφαρμογών είναι μια φυσική τάση (Rosa-Clot and Tina, 2018). Το κίνητρο για τη διερεύνηση των θαλάσσιων πλωτών φωτοβολταϊκών βρίσκεται στο γεγονός ότι οι περισσότερες μεγαλουπόλεις του κόσμου βρίσκονται κατά μήκος των ακτών αντιμετωπίζοντας έντονη πληθυσμιακή αύξηση και αδυναμία να καλύψουν την αυξημένη ενεργειακή ζήτηση.

Παρά το γεγονός ότι οι μεγαλουπόλεις έχουν συνήθως πολυσύχναστες παράκτιες περιοχές λόγω αλιευτικών δραστηριοτήτων, ναυτιλιακές γραμμές, και δραστηριότητες αναψυχής εξακολουθούν να υπάρχουν περιοχές χωρίς χρήση, συνήθως κοντά στην ακτή που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά πάσα πιθανότητα η υπεράκτια αιολική ενέργεια δεν θα ήταν επιθυμητή λύση λόγω του οπτικού αντίκτυπου καθώς μια ανεμογεννήτρια έχει ύψος περίπου 200 μέτρα. Η ανάπτυξη πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μπορούσε να είναι μία ελκυστική εναλλακτική λύση, ωστόσο απαιτείται περαιτέρω έρευνα πριν από την εκμετάλλευση μεγάλης κλίμακας έργων που μπορούν να αναπτυχθούν σε θαλάσσιες περιοχές. Η μετάβαση των πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε θαλάσσια περιβάλλοντα μπορεί να προβλεφθεί ότι θα ξεκινήσει πρώτα από τα παράκτια προστατευμένα περιβάλλοντα και στη συνέχεια σε υπεράκτιες τοποθεσίες.

2.3 Κατηγορίες πλωτών ΦΒ συστημάτων θαλάσσια ΦΒ

Η κατηγοριοποίηση των πλωτών κατασκευών γίνεται βάση της έκθεσής τους στα κύματα σε χαμηλή, μεσαία, και υψηλή, όπου:

Μέγιστο ύψος μεμονωμένου κύματος (H_{max}) είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ του υψηλότερου (κορυφή) και του χαμηλότερου (κοιλία) σημείου ενός κύματος σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οδηγός για την πιθανότητα εμφάνισης «ακραίων» κυματισμών. Το ύψος του κύματος σε μία θάλασσα με τρικυμία είναι δύσκολο να υπολογισθεί με ακρίβεια γι' αυτό χρησιμοποιείται συνήθως το σημαντικό ύψος κύματος (H_s) που είναι ο μέσος όρος του $1/3$ των υψηλότερων κυμάτων. Εάν το μέγιστο μεμονωμένο ύψος κύματος είναι μεγαλύτερο από το διπλάσιο του σημαντικού ύψους κύματος, τότε αυτό το μεμονωμένο κύμα θεωρείται «ακράιο» κύμα (extreme/freak wave).



Σχήμα 2-2: Κυματικό Φάσμα, (ECMWF, Ocean Wave Model ECWAM)

Βάση της παραπάνω κατηγοριοποίησης Τα πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες όπως φαίνεται στον πίνακα 2-1.

	Χερσαία Πλωτά (Inland FPVs)	Παράκτια (Nearshore FPVs)	Υπεράκτια (Offshore FPVs)
	Χαμηλή έκθεση	Μεσαία έκθεση	Υψηλή έκθεση
Ορισμός	$H_{max}=2m$, $H_s=1m$ Κυρίως σε λίμνες, και ταμιευτήρες	$H_{max}=6m$, $H_s=3m$	$H_{max}=14m$, $H_s=7m$
Κατάσταση Τεχνολογίας	Σχεδόν 2GWp εγκατεστημένα παγκοσμίως. TRL 8	Διάφορα πιλοτικά έργα έχουν υλοποιηθεί. TRL 4-6	Υπό ανάπτυξη, πιλοτικά έργα έχουν προγραμματιστεί. TRL 2-5

Πίνακας 2-1: Κατηγορίες πλωτών ΦΒ.

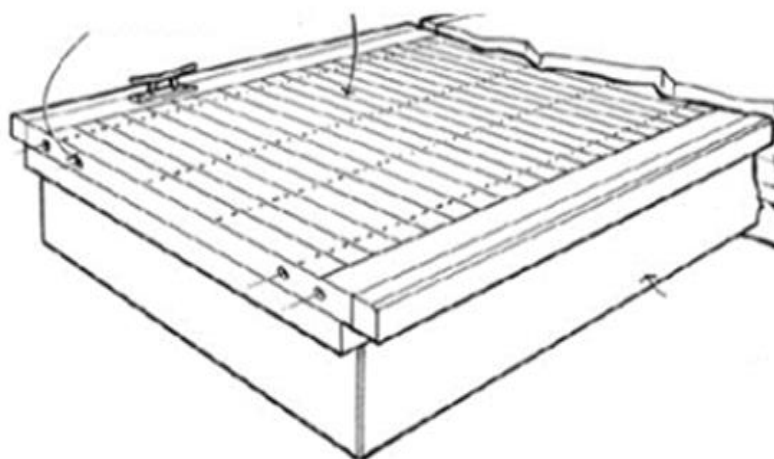
2.4 Κατευθύνσεις συστημάτων

Τα πλωτά φωτοβολταϊκά σε θαλάσσια περιβάλλοντα δεν είναι ακόμη μια πλήρως ανεπτυγμένη τεχνολογία αλλά υπάρχουν αρκετές ιδέες υπό ανάπτυξη. Τα τελευταία χρόνια αρκετές εταιρείες στην Ευρώπη έχουν αρχίσει να επενδύουν στην εξέλιξη συστημάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε εφικτές και οικονομικά προσιτές λύσεις για πλωτά φωτοβολταϊκά σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Πολλά πιλοτικά έργα έχουν κατασκευαστεί ή έχουν προγραμματιστεί.

Μέχρι σήμερα υπάρχουν τέσσερις γνωστές κατευθύνσεις ανάπτυξης πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών συστημάτων:

1. Το σύστημα “Pontoon”

Η ιδέα του συστήματος βασίζεται σε πλωτήρες οι οποίοι συνδέονται μηχανικά και σχηματίζουν μια αρθρωτή ενιαία κατασκευή που αγκυροβολείται στον πυθμένα. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται και στερεώνονται πάνω στους πλωτήρες με αποτέλεσμα να βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του νερού. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι τα φορτία του ανέμου πάνω στα πλαίσια και την κατασκευή είναι σχετικά χαμηλά.



Εικόνα 2-4: Σχέδιο συστήματος “Pontoon”.

2. Το σύστημα “Truss”

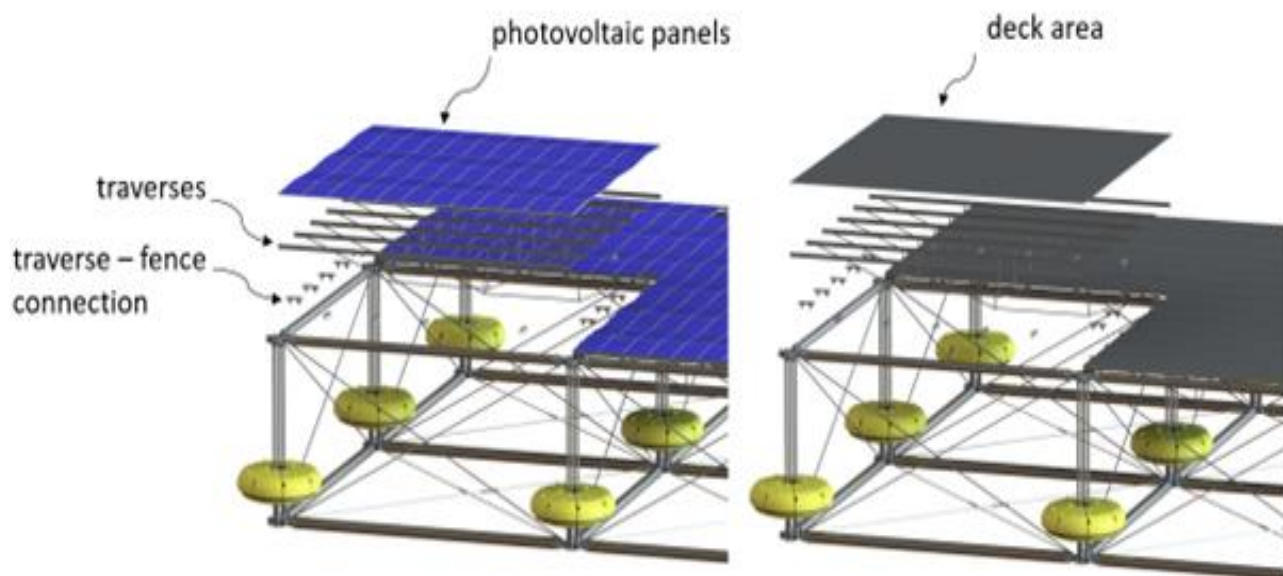
Το σύστημα βασίζεται σε τρία μέρη:

Το μεταλλικό σκελετό ο οποίος αποτελεί την κύρια δομή στήριξης του συστήματος κατασκευάζεται συνήθως από κράμα αλουμινίου ειδικό για θαλάσσια περιβάλλοντα, και παρέχει σταθερότητα στο σύστημα.

Τους πλωτήρες οι οποίοι συνδέονται στον σκελετό παρέχοντας πλευστότητα στο σύστημα, όπου ο αριθμός των πλωτήρων που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από την ικανότητα φόρτωσης του συστήματος.

Τις βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων όπου τοποθετούνται επάνω στον μεταλλικό σκελετό, ενώ παράλληλα υπάρχει και η δυνατότητα τοποθέτησης δαπέδου.

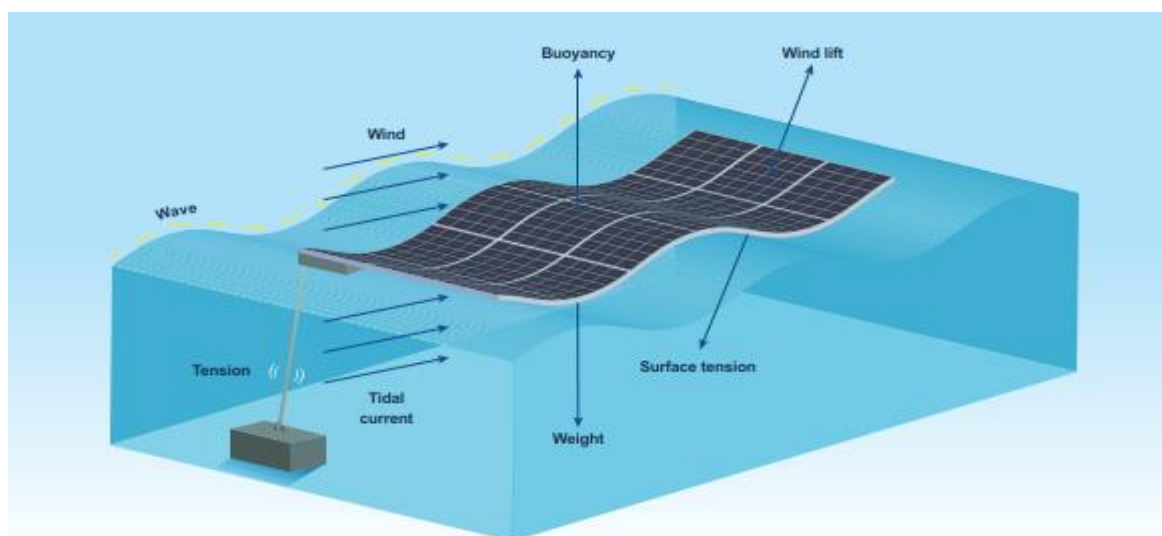
Η πλωτή πλατφόρμα βρίσκεται σε ένα ορισμένο ύψος πάνω από την επιφάνεια του νερού με αποτέλεσμα τα κύματα να μπορούν να κινηθούν κάτω από τον μεταλλικό σκελετό και να αποφεύγεται η άμεση επαφή με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το σύστημα “Pontoon” καθώς τα μηχανικά φορτία επάνω στα φωτοβολταϊκά πλαίσια λόγω των κυμάτων θα είναι μικρότερα καθώς επίσης και τα υπολείμματα του θαλασσινού νερού στις επιφάνειες των συλλεκτών.



Εικόνα 2-5: Σχέδιο συστήματος “Truss”

3. Το σύστημα “Soft and Flex”

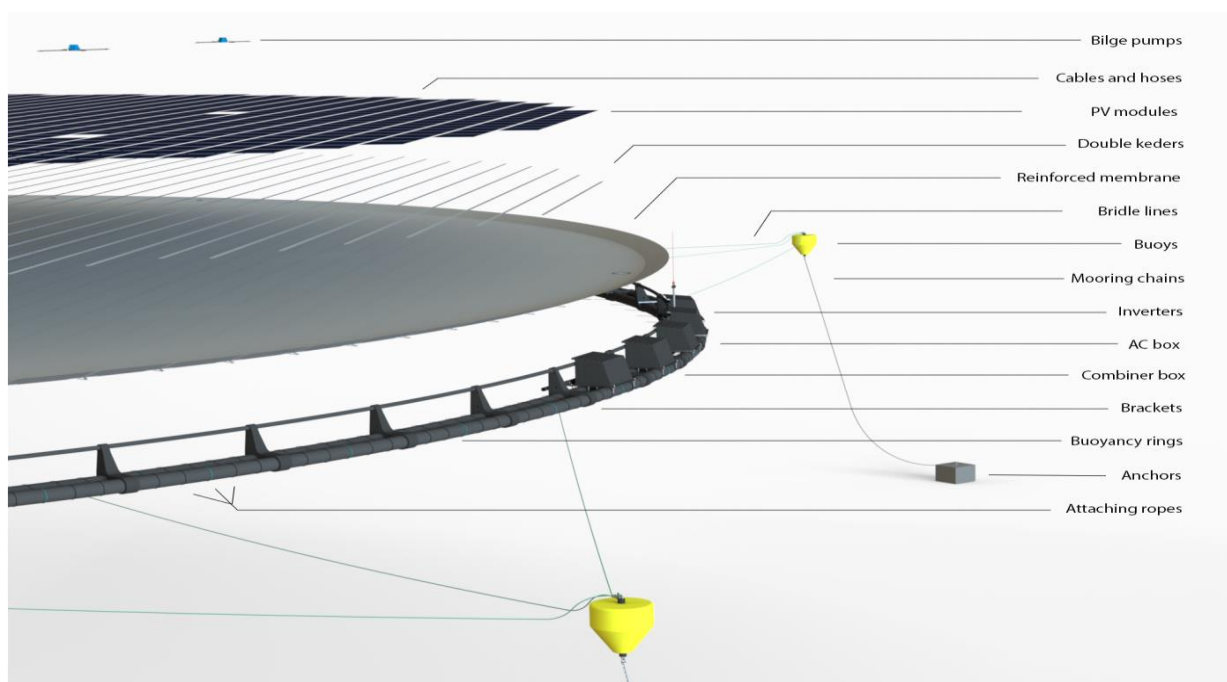
Η βασική ιδέα του συστήματος “Soft and Flex” είναι να δώσει τη δυνατότητα στην πλωτή κατασκευή να κινείται μαζί με τα κύματα ώστε η μεταφορά της μηχανικής ενέργειας από τα κύματα πάνω στην κατασκευή να είναι μικρότερη μειώνοντας έτσι και τις δυνάμεις πρόσδεσης σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα. Το σύστημα αποτελείται από πολλαπλούς μεμονωμένους πλωτήρες συνδεδεμένους σε ένα κοινό πλέγμα πρόσδεσης. Κάθε πλωτήρας έχει μεγάλη ελευθερία κίνησης ώστε να ακολουθεί την κίνηση των κυμάτων. Οι πλωτήρες αποτελούνται από ένα εύκαμπτο ύφασμα διπλού τοιχώματος γεμάτο αέρα, παρέχοντας χαμηλή ακαμψία στο σύστημα με αποτέλεσμα να μπορεί εύκολα να ακολουθήσει την κίνηση των κυμάτων. Οι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται στο σύστημα τοποθετούνται επάνω στους πλωτήρες και είναι εύκαμπτοι ώστε να μπορούν να ακολουθήσουν την παραμόρφωση των πλωτήρων.



Εικόνα 2-6: Σχέδιο συστήματος “Soft and Flex”

4. Το σύστημα “Fish farm”

Η ιδέα του συστήματος “Fish farm” βασίζεται στην εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τις ιχθυοκαλλιέργειες που βρίσκονται κοντά στην ακτή και συγκεκριμένα στη Νορβηγία όπου υπάρχει η τεχνογνωσία για αυτήν την προσέγγιση. Η κύρια δομή του συστήματος αποτελείται από έναν ενιαίο κυκλικό πλωτήρα ο οποίος παρέχει πλευστότητα στο σύστημα ενώ παράλληλα συγκρατεί μια λεπτή υδροελαστική μεμβράνη που τοποθετείται στο κέντρο του. Επάνω στην μεμβράνη τοποθετούνται τροποποιημένοι ηλιακοί συλλέκτες χωρίς περίβλημα αλουμινίου. Η μεμβράνη εμποδίζει την εκτόνωση των κυμάτων και την εισχώρηση αλμυρού νερού στους ηλιακούς συλλέκτες. Το σύστημα αγκυροβολείται στον πυθμένα. Τα πλεονεκτήματα του συστήματος αυτού είναι η συνολικά λιγότερη χρήση υλικών από οποιοδήποτε άλλο πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα, η απλή και γρήγορη εγκατάσταση καθώς και η αύξηση της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών από την άμεση ψύξη με το νερό. Το μειονέκτημα σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα είναι ότι η εγκατάσταση του συγκεκριμένου συστήματος μπορεί να γίνει μόνο παράκτια και σε προστατευμένους από μεγάλα κύματα κόλπους.



Εικόνα 2-7: Σχέδιο συστήματος “Fish Farm”.

2.5 Σύνοψη κατασκευαστών θαλάσσιων πλωτών ΦΒ συστημάτων στην Ευρώπη

Στην Ευρώπη υπάρχουν αρκετοί κατασκευαστές που έχουν αναπτύξει πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα τόσο για παράκτιες όσο και υπεράκτιες εφαρμογές. Για την παρουσίαση των κατασκευαστών και το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η τεχνολογία τους χρησιμοποιείται το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL).

Το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL) είναι μία μέθοδος-κλίμακα για την αξιολόγηση της ωριμότητας μιας τεχνολογίας με σκοπό την κατανόηση της ανάπτυξης που χρειάζεται μια συγκεκριμένη τεχνολογία προτού χρησιμοποιηθεί. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τη NASA το 1970 και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2010 συνέστησε στα χρηματοδοτούμενα από την ΕΕ έργα έρευνας και καινοτομίας να την υιοθετήσουν. Το 2014 η μέθοδος εισήχθη επίσημα στην ΕΕ στο πλαίσιο του χρηματοδοτουμένου προγράμματος Horizon 2020. Η μέθοδος έχει επίπεδα ωριμότητας από το 1 έως το 9 και αναλύονται στον παρακάτω πίνακα όπως τα έχει ορίσει η Ευρωπαϊκή επιτροπή:

Επίπεδο	Ορισμός	Περιγραφή
ΕΡΕΥΝΑ		
TRL 1	Παρατήρηση βασικών αρχών.	Επιστημονικές παρατηρήσεις που έγιναν, τα παραδείγματα περιλαμβάνουν μελέτες των βασικών ιδιοτήτων της τεχνολογίας στο χαρτί.
TRL 2	Διατύπωση τεχνολογικής έννοιας.	Εφεύρεση πρακτικών εφαρμογών, οι εφαρμογές είναι υποθετικές και μπορεί να μην υπάρχουν αποδείξεις που να υποστηρίζουν τις υποθέσεις. Τα παραδείγματα περιορίζονται σε αναλυτικές μελέτες.
TRL 3	Πειραματική απόδειξη της έννοιας.	Ξεκινάει ενεργή έρευνα και ανάπτυξη. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν μελέτες και εργαστηριακές μετρήσεις που δεν έχουν ακόμη ενσωματωθεί.
ΑΝΑΠΤΥΞΗ		
TRL 4	Εργαστηριακά επικυρωμένη τεχνολογία.	Τεχνολογία επικυρωμένη μέσω σχεδιασμένης έρευνας. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν ανάλυση παραμέτρων του εύρους λειτουργίας της τεχνολογίας. Ενδείξεις ότι η τεχνολογία λειτουργεί.
TRL 5	Τεχνολογία επικυρωμένη σε σχετικό περιβάλλον.	Η αξιοπιστία της τεχνολογίας αυξάνεται σημαντικά, τα παραδείγματα περιλαμβάνουν την επικύρωση ενός συστήματος σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης.
TRL 6	Επίδειξη τεχνολογίας σε σχετικό περιβάλλον.	Επαλήθευση του πρωτότυπου συστήματος. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν ένα πρωτότυπο σύστημα που δοκιμάζεται σε σχετικό περιβάλλον.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ		
TRL 7	Επίδειξη πρωτότυπου συστήματος σε επιχειρησιακό περιβάλλον.	Σημαντική αύξηση της τεχνολογικής ωριμότητας. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν την επαλήθευση ενός πρωτότυπου συστήματος σε επιχειρησιακό περιβάλλον.
TRL 8	Σύστημα πλήρες και	Η τεχνολογία έχει πιστοποιηθεί ότι λειτουργεί στην τελική

	εξειδικευμένο.	της μορφή και υπό τις αναμενόμενες συνθήκες.
TRL 9	Πραγματικό σύστημα λειτουργικό σε επιχειρησιακό περιβάλλον (ανταγωνιστική παραγωγή στην περίπτωση βασικών τεχνολογιών).	Το σύστημα είναι έτοιμο για πλήρη εμπορική ανάπτυξη. Το παράδειγμα περιλαμβάνει ένα πραγματικό σύστημα που έχει χρησιμοποιηθεί από τους τελικούς χρήστες.

Πίνακας 2-2: Επίπεδα Τεχνολογικής Ετοιμότητας TRL, (Horizon 2020-Work program, General Annexes).

Στην Ευρώπη έχουν εντοπιστεί 6 κατασκευαστές που έχουν αναπτύξει συστήματα πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών και στον πίνακα 2-2 συνοψίζονται οι κατασκευαστές με ελάχιστο επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας (TRL4). Για την κατηγοριοποίηση της τεχνολογικής ωριμότητας του συστήματος του κάθε κατασκευαστή, βάση δημοσιευμένων πληροφοριών χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα κριτήρια:

- TRL 3 – Επίτευξη δοκιμών σε μοντέλο κλίμακας.
- TRL 4 – Επίτευξη δοκιμών πλήρους μεγέθους σε προστατευμένο περιβάλλον.
- TRL 5 – Επίτευξη πιλοτικής δοκιμής σε ανοικτή θάλασσα με σύνδεση σε τοπικό δίκτυο.
- TRL 6 – Επίτευξη πιλοτικής δοκιμής σε ανοικτή θάλασσα με σύνδεση στο δίκτυο.
- TRL 7 – Επίδειξη σε ανοικτή θάλασσα με αποδεδειγμένη αξιοπιστία τουλάχιστον ενός έτους.
- TRL 8 – Εισαγωγή στην αγορά που πραγματοποιήθηκε με περιορισμένη τραπεζική χρηματοδότηση.
- TRL 9 – Εισαγωγή στην αγορά που πραγματοποιήθηκε με πλήρη τραπεζική χρηματοδότηση.

Η διάκριση των συστημάτων που παρουσιάζονται γίνεται βάση της έκθεσής τους στα κύματα: “μεσαία έκθεση στα κύματα” $H_s=3m$, $H_{max}=6m$, και “υψηλή έκθεση στα κύματα” $H_s=7m$, $H_{max}=14m$.

Κατασκευαστής	Χώρα	Σύστημα	TRL μεσαία έκθεση	TRL υψηλή έκθεση
Bluewater	Ολλανδία	Soft and Flex	4	4
Solar Duck	Ολλανδία	Truss	5	4
Oceans of Energy	Ολλανδία	Pontoon	5	4
Swimsol	Αυστρία	Truss	8	n/a
Ocean Sun	Νορβηγία	Fish farm	8	5
SINN Power	Γερμανία	Truss	5	4

Πίνακας 2-3: Κατασκευαστές θαλάσσιων πλωτών ΦΒ συστημάτων στην Ευρώπη.

2.5.1 Bluewater

Το σύστημα της Ολλανδικής εταιρείας Bluewater βασίζεται στην ιδέα του συστήματος Soft and flex. Εδώ ως πλωτήρες χρησιμοποιούνται στρώματα γεμάτα αέρα και εύκαμπτοι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες. Τα πρώτα βήματα ανάπτυξης του συστήματος έγιναν στο πλαίσιο του προγράμματος solar@sea του Ολλανδικού οργανισμού TKI-Urban Energy, ενώ περαιτέρω ανάπτυξη έγινε στο πλαίσιο του προγράμματος solar@sea II, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την εγκατάσταση ενός συστήματος ισχύος 20KW στη λιμνοθάλασσα Oostvoornse Meer της Ολλανδίας το 2021. Οι δοκιμές έδειξαν ότι αυτές οι ελαφριές και εύκαμπτες κατασκευές οδηγούν σε πολύ χαμηλές δυνάμεις πρόσδεσης, επιτρέποντας ένα απλό και χαμηλού κόστους σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης.

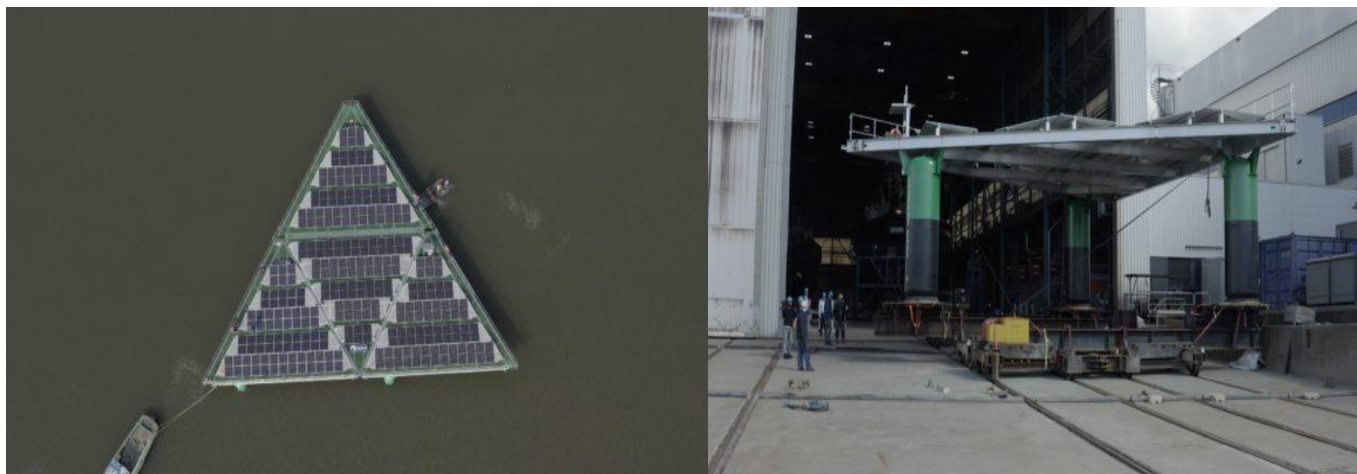


Εικόνα 2-8: 20KW σύστημα της εταιρείας Bluewater στο Oostvoornse Meer.

2.5.2 Solar Duck

Το σύστημα της Ολλανδικής εταιρείας Solar Duck βασίζεται στην ιδέα του συστήματος Truss. Ο μεταλλικός σκελετός αποτελεί την κύρια δομή στήριξης έχει τριγωνικό σχήμα με διαστάσεις 16x16x16 μέτρα, όπου το τριγωνικό σχήμα δίνει τη δυνατότητα να συνδεθούν ευέλικτα περισσότερες δομές σχηματίζοντας εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος. Για την πλευστότητα του συστήματος χρησιμοποιούνται τρεις κυλινδρικοί πλωτήρες. Η διαμόρφωση του συστήματος επιτρέπει την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με κλίση 15° και σε ύψος τριών μέτρων πάνω από την επιφάνεια του νερού, με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει χρήση συμβατικών φωτοβολταϊκών πλαισίων υψηλής απόδοσης χωρίς να χρειάζονται ειδικά σχεδιασμένα και ακριβότερα προϊόντα. Το 2021 η εταιρεία κατασκεύασε το πρώτο σύστημα συνολικής ισχύος 65 KW το οποίο εγκαταστάθηκε στο ποτάμι

Waal στην επαρχία Gelderland της Ολλανδίας. Το πιλοτικό έργο αναπτύχθηκε με την Ολλανδική εταιρεία υδρογόνου Voyex με σκοπό να συνδεθεί με μία μονάδα παραγωγής υδρογόνου.



Εικόνα 2-9: 65KW σύστημα της εταιρείας Solar Duck στο Gelderland.

2.5.3 Oceans of Energy

Το σύστημα της Ολλανδικής εταιρείας Oceans of Energy που βασίζεται στο σύστημα Pontoon, αποτελείται από πλωτήρες μικρού βυθίσματος συνδεδεμένους μεταξύ τους δημιουργώντας μία ενιαία αρθρωτή κατασκευή, ενώ τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι συμβατικά και τοποθετούνται επίπεδα επάνω στους πλωτήρες. Το 2019 το πρώτο επιχειρησιακό πιλοτικό σύστημα της εταιρείας ισχύος 17 KW εγκαταστάθηκε σε απόσταση ενός χιλιομέτρου από την ακτή, το 2020 έγινε επέκταση του συστήματος με την ισχύ να ανέρχεται στα 50 KW και μετεγκαταστάθηκε 15 χιλιόμετρα από την ακτή Scheveningen στην Ολλανδία. Σύμφωνα με την εταιρεία μετά από 18 μήνες στην Βόρεια ανοικτή θάλασσα το σύστημα άντεξε σε κύματα με μέγιστο ύψος 10 μέτρων, ανέμους με ταχύτητα 110 km/h και θαλάσσια ρεύματα μέχρι 7km/h.



Εικόνα 2-10: 50KW σύστημα της εταιρείας Oceans of Energy στο Scheveningen .

2.5.4 Swimsol

Το σύστημα της Αυστριακής εταιρείας Swimsol βασίζεται στο σύστημα Truss, όπου η κύρια δομή της κατασκευής αποτελείται από ένα σκελετό αλουμινίου διαστάσεων 13 x13m και 1.5m ύψος πάνω από την επιφάνεια του νερού. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι διπλού γυαλιού και τοποθετούνται σε αλουμινένιες βάσεις στήριξης, οι πλωτήρες είναι κατασκευασμένοι από πολυστυρένιο (PS) που περικλείονται μέσα σε ένα κέλυφος από πολυαιθυλένιο (PE) για προστασία. Η αγκύρωση του συστήματος πραγματοποιείται στον πυθμένα με συνθετικά σχοινιά και ελικοειδής άγκυρες. Το σύστημα της Swimsol έχει σχεδιαστεί για χαμηλή και μεσαία έκθεση στα κύματα. Μέχρι σήμερα η εταιρεία έχει εγκαταστήσει συστήματα συνολικής ισχύος 15MW στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Μαλδιβών με κύρια εφαρμογή την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα ξενοδοχεία της περιοχής αντικαθιστώντας έτσι τις γεννήτριες ντίζελ.



Εικόνα 2-11: Το σύστημα της εταιρείας Swimsol στις Μαλδίβες.

2.5.5 Ocean Sun

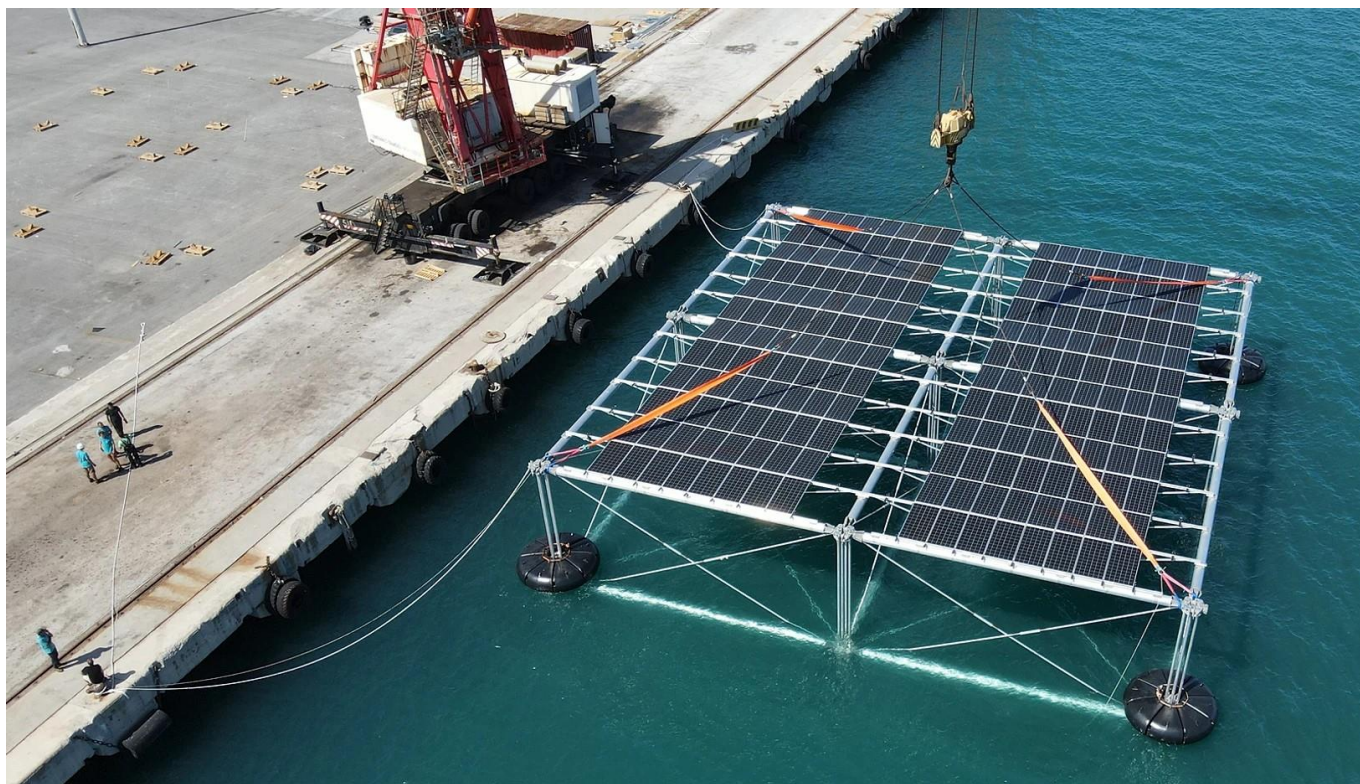
Το σύστημα της Νορβηγικής εταιρείας Ocean Sun βασίζεται στο σύστημα Fish farm, το οποίο αποτελείται από έναν κυκλικό πλωτήρα κατασκευασμένο από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE) ο οποίος παρέχει πλευστότητα στο σύστημα ενώ παράλληλα συγκρατεί μια λεπτή υδροελαστική μεμβράνη. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι ειδική κατασκευή διπλού γυαλιού για την τοποθέτησή τους επάνω στην μεμβράνη. Το πρώτο πιλοτικό σύστημα της εταιρείας συνολικής ισχύος 6,6KW και διαμέτρου 20m κατασκευάστηκε το 2017 στα παράλια της Νορβηγίας δίπλα σε μια ιχθυοκαλλιέργεια, το 2019 εγκατέστησε το δεύτερό της σύστημα συνολικής ισχύος 220KW και διαμέτρου 50m σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό στις Φιλιππίνες και το 2022 ολοκλήρωσε τέσσερα συστήματα συνολικής ισχύος 2MW στον υδροηλεκτρικό σταθμό Banja της Αλβανίας. Τον Οκτώβριο του 2022 η εταιρεία εγκατέστησε 2 συστήματα συνολικής ισχύος 500 KW, σε απόσταση 30 χιλιομέτρων από την ακτή Haiyang στην Κίνα, το πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέθηκε στο μετασχηματιστή μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας και στη συνέχεια με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του υποβρυχίου καλωδίου του αιολικού πάρκου. Η αγκυροβόληση του συστήματος έγινε με 4 σημεία πρόσδεσης σε απόσταση 60 μέτρων από τις ανεμογεννήτριες. Το πιλοτικό αυτό σύστημα θα βοηθήσει την εταιρεία να αξιολογήσει την αντοχή του συστήματος στα κύματα και τον άνεμο. Το σύστημα για τη συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης σχεδιάστηκε να αντέχει σε ακραίο ύψος κύματος 10 μέτρων. το πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα της Ocean Sun είναι το πρώτο που ενσωματώνεται σε μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 2-12: α) 2MW Σύστημα στην Αλβανία, β) 500KW Σύστημα ενσωματωμένο σε υπεράκτια Α/Γ στην Κίνα.

2.5.6 SINN Power

Στο σύστημα της Γερμανικής εταιρείας SINN Power που βασίζεται στο σύστημα Truss, η κύρια δομή του συστήματος αποτελείται από έναν μεταλλικό σκελετό κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου ειδικό για θαλάσσιες εφαρμογές διαστάσεων 24x24m, και συνολικού ύψους 6m. Το σύστημα μπορεί να επεκταθεί συνδέοντας μηχανικά περισσότερες δομές μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι ένα άκαμπτο μεγαλύτερο σε διαστάσεις και ισχύ σύστημα. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιούνται είναι συμβατικά υψηλής απόδοσης τα οποία τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένες βάσεις σε ύψος 4 μέτρων πάνω από την επιφάνεια του νερού και κλίση 15 μοιρών. Η διαμόρφωση αυτή του συστήματος επιτρέπει την εύκολη διέλευση των κυμάτων κάτω από τον σκελετό με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η άμεση επαφή με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η πλευστότητα του συστήματος παρέχεται από στρογγυλούς πλωτήρες με διάμετρο 3.2m και βάρος 60kg κατασκευασμένους από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο με ικανότητα φόρτωσης 6t. Η αγκύρωση του συστήματος πραγματοποιείται στον πυθμένα με συνθετικά σχοινιά και αντίβαρα από σκυρόδεμα. Σύμφωνα με την εταιρεία το σύστημα έχει σχεδιαστεί για αντίξοα θαλάσσια περιβάλλοντα με ανοχές σε κύματα με σημαντικό ύψος κύματος, $H_s = 12m$ μέγιστο ύψος κύματος $H_{max}=20m$ και ανέμους έως 216 km/h. Στο πλαίσιο του 7^{ου} προγράμματος έρευνας για την ενέργεια που πραγματοποιήθηκε από την ομοσπονδιακή κυβέρνηση της Γερμανίας η εταιρεία κατασκεύασε το πρώτο πιλοτικό της σύστημα το 2020 στο Ηράκλειο Κρήτης, το σύστημα έχει διαστάσεις 24x24 m και συνολική εγκατεστημένη ισχύ 80KW. Το σύστημα δεν έχει δοκιμαστεί ακόμα σε πραγματικό περιβάλλον καθώς λόγω έλλειψης νομοθετικού πλαισίου δεν έχει λάβει την απαιτούμενη άδεια για εγκατάσταση στη θάλασσα.



Εικόνα 2-13: 80KW σύστημα της εταιρείας SINN Power στο Ηράκλειο Κρήτης.

3. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1 Σχεδιασμός και κατασκευή

Ο σχεδιασμός πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς τα συστήματα αυτά θα βρίσκονται εγκατεστημένα σε ένα ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον, συνεπώς είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος για όλη τη διάρκεια της ζωής του. Το χαμηλό επίπεδο ετοιμότητας που βρίσκεται η τεχνολογία συμβάλει στην έλλειψη προτύπων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τον σχεδιασμό πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών συστημάτων παρόλα αυτά η χρήση τεχνογνωσίας και προτύπων από τομείς με υψηλότερο επίπεδο ετοιμότητας όπως ο τομέας πετρελαίου, αερίου, και ο τομέας των θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. υπεράκτιες ανεμογεννήτριες), μπορεί να ωφελήσουν την νέα αυτή τεχνολογία. Τα πλωτά θαλάσσια φωτοβολταϊκά συστήματα προκειμένου να καθιερωθούν και να αποκτήσουν μερίδιο στο ενεργειακό μείγμα θα πρέπει από το πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού να λαμβάνονται υπόψιν οι ακόλουθες προϋποθέσεις (Pecher and Kofoed, 2016 . Petrini, 2010):

- **Ανθεκτικότητα.** Τα πλωτά θαλάσσια φωτοβολταϊκά είναι πολύπλοκες κατασκευές με σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους τμημάτων και των περιβαλλοντικών φορτίων. Η κατανόηση της συνολικής απόκρισης της κατασκευής και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των εξαρτημάτων, για παράδειγμα μεταξύ του πλωτήρα και του σημείου πρόσδεσης, είναι απαραίτητα για ένα ανθεκτικό σύστημα καθώς είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το σύστημα θα αντέξει κάτω από ακραίες συνθήκες.
- **Αξιοπιστία και δυνατότητα συντήρησης.** Οι πλωτές θαλάσσιες κατασκευές είναι πιθανό να εμφανίσουν κόπωση σε κρίσιμα εξαρτήματα κατά τη διάρκεια της ζωής τους εξαιτίας της κυκλικής επιβολής φορτίων, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα την έναρξη ρωγμών οι οποίες αν δεν εντοπιστούν εγκαίρως θα οδηγήσουν στη θραύση του εξαρτήματος. Η εξασφάλιση εύκολης πρόσβασης και επιθεώρησης των βασικών τμημάτων του συστήματος στη θέση εγκατάστασής του είναι μείζονος σημασίας για την αύξηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής.
- **Επεκτασιμότητα.** Ένα πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα για να γίνει οικονομικά βιώσιμο θα πρέπει να έχει υψηλή αναλογία εγκατεστημένης ισχύος/τετραγωνικό μέτρο, δηλαδή θα πρέπει να έχει εγκατεστημένα όσο το δυνατόν περισσότερα πλαίσια ανά τετραγωνικό μέτρο για μία μεμονωμένη πλωτή δομή με δυνατότητα επέκτασης της εγκατάστασης συνδέοντας περισσότερες δομές μεταξύ τους.
- **Απόδοση Ισχύος.** Ένα πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να επωφεληθεί από την αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλασίων λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο νερό αποφεύγοντας παράλληλα πιθανές ζημιές λόγω ακραίων κυματισμών.
- **Θετικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.** Τα πλωτά θαλάσσια φωτοβολταϊκά συστήματα αναμένεται να καλύψουν μεγάλες περιοχές του ωκεανού, προκαλώντας ενδεχομένως δυσμενείς επιπτώσεις στην υδρόβια ζωή. Κατά την επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η παράμετρος της μόλυνσης των ωκεανών. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος αυτών των συστημάτων χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και αξιολόγησης.

3.2 Επιλογή υλικών και αντοχή

Όπως κάθε άλλη υπεράκτια κατασκευή, οι πλωτές θαλάσσιες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις εκτίθενται σε διάφορους τύπους φορτίων ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης και τη μέθοδο κατασκευής της. Τα φορτία αυτά μπορούν να ταξινομηθούν ως α) μόνιμα φορτία (permanent loads), β) περιβαλλοντικά φορτία (environmental loads), γ) φορτία εγκατάστασης (installation loads), και δ) τυχαία φορτία (accidental loads), (Chakrabarti, 2005).

- α) **Μόνιμα φορτία (permanent loads)**, ορίζονται όλες οι μόνιμες δυνάμεις που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή και δεν μεταβάλλονται σε ύψος, κατεύθυνση ή θέση και περιλαμβάνουν το συνολικό βάρος της πλωτής κατασκευής με όλα τα δομικά εξαρτήματα της τοποθετημένα στη θέση τους, το βάρος του εξοπλισμού, εξαρτημάτων που είναι μόνιμα τοποθετημένα στην πλωτή κατασκευή, ενώ οι υδροστατικές δυνάμεις που ασκούνται στα διάφορα εξαρτήματα κάτω από την επιφάνεια του νερού περιλαμβάνουν την άνωση και τις υδροστατικές πιέσεις.
- β) **Περιβαλλοντικά φορτία (environmental loads)**, αποτελούν την κύρια πηγή εξωτερικών φορτίων για τις υπεράκτιες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις οι οποίες εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην τοποθεσία εγκατάστασης των πλωτών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και περιλαμβάνουν:
- Μετεωρολογικά και ωκεανογραφικά φορτία, όπως τον αέρα, τα κύματα, τα θαλάσσια ρεύματα, και την παλίρροια. Τα φορτία αυτά είναι εξαιρετικά μεταβλητά και έχουν σημαντικό ρόλο κατά τον σχεδιασμό της κύριας δομής της πλωτής εγκατάστασης.
 - Φορτία πάγου, εάν η πλωτή εγκατάσταση τοποθετηθεί σε αρκτικές περιοχές πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα φορτία που θα δημιουργηθούν από τον πάγο και το χιόνι. Οι χαμηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν επίσης τον τύπο και την ποιότητα των υλικών.
 - Φορτία από τις μετακινήσεις του πυθμένα. Οι πυθμένες χαμηλής πυκνότητας μπορούν να τεθούν σε κίνηση από τα κύματα προκαλώντας καθιζήσεις, δημιουργώντας πρόβλημα κυρίως στο σύστημα αγκύρωσης.
- γ) **Φορτία εγκατάστασης (installation loads)**, περιλαμβάνει τα φορτία που παρουσιάζονται κατά τη μεταφορά και τη συναρμολόγηση των εξαρτημάτων. Η μεταφορά των εξαρτημάτων στην τοποθεσία εγκατάστασης γίνεται συνήθως με τη χρήση φορτηγίδων όπου κατά την κίνησή τους και σε συνδυασμό με άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες επιβάλουν φορτία που είναι σημαντικά διαφορετικά από αυτά που θα αντιμετώπιζε μια πλωτή εγκατάσταση στη θέση της. Για να διασφαλιστεί ότι τα εξαρτήματα παραμένουν στη θέση τους εγκαθίστανται στη φορτηγίδα στηρίγματα ώστε να αντιστέκονται σε όλα τα φορτία μεταφοράς. Οι εργασίες που προκύπτουν κατά την εγκατάσταση και γίνονται με τη χρήση μηχανημάτων, όπως γερανοί, μπορεί να δημιουργήσουν φορτία και τάσεις στην κατασκευή οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν.
- δ) **Τυχαία φορτία (accidental loads)**, μπορεί να προκύψουν λόγω ανθρώπινου λάθους, αστοχίες λειτουργίας ή εξοπλισμού, ή λάθη που σχετίζονται με τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη των φορτίων εγκατάστασης.

Ο σχεδιασμός των πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων θα πρέπει να γίνεται με τρόπο που θα διασφαλίζει ότι η κατασκευή θα λειτουργεί σωστά καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κάτω

από το χειρότερο δυνατό σενάριο. Αυτό επιτυγχάνεται σχεδιάζοντας τις πλωτές κατασκευές για έναν συνδυασμό φορτίων ώστε να διασφαλιστεί η λειτουργικότητα, η αξιοπιστία και η στιβαρότητα, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με την ανάλυση των κριτηρίων σχεδιασμού προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δεν υπερβαίνονται οι σχετικές οριακές καταστάσεις. Οι κατηγορίες των σχετικών οριακών καταστάσεων που πρέπει να ελέγχονται για τα υπεράκτια πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα σύμφωνα με το πρότυπο DNV GL, 2016b είναι:

- **Οριακή κατάσταση κόπωσης (FLS).** Η κόπωση είναι εξαιρετικά σημαντική στον σχεδιασμό των πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων λόγω των κυκλικών φορτίων που ασκούνται στο σύστημα κατά τη διάρκεια ζωής του, η οποία κυμαίνεται από 20 έως 25 χρόνια. Η ανάλυση FLS διεξάγεται για να εξακριβωθεί εάν το σύστημα έχει αρκετή αντοχή στα συσσωρευμένα και επαναλαμβανόμενα φορτία ώστε να επιβιώσει για τη διάρκεια ζωής που έχει σχεδιαστεί.
- **Οριακή κατάσταση λειτουργίας (ULS).** Στόχος των αναλύσεων ULS είναι να εξασφαλιστεί ότι η συνολική αντοχή του συστήματος επαρκεί για να αντέξει σε ακραία φορτία.
- **Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS).** Οι αναλύσεις SLS πραγματοποιούνται για να επαληθεύσουν ότι η ανθεκτικότητα, οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη θερμοκρασία και οι υπερβολικές δονήσεις στο φωτοβολταϊκό, που μπορεί να περιορίσουν την παραγωγή ενέργειας, δεν υπερβαίνονται.
- **Οριακή κατάσταση ατυχήματος (ALS).** Οι αναλύσεις ALS αντιστοιχούν σε αξιολογήσεις για την επαλήθευση της δομικής ακεραιότητας ή της συμπεριφοράς του συστήματος μετά από μία λειτουργική αστοχία ή ένα τυχαίο γεγονός.

Προκειμένου να ικανοποιηθούν όλες οι παραπάνω δομικές και λειτουργικές απαιτήσεις τα υλικά των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα υπεράκτιο πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα έχουν καθοριστικό ρόλο στη μακροζωία του συστήματος. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χάλυβας το αλουμίνιο και τα πλαστικά. Τα πλαστικά χρησιμοποιούνται για τα πλωτά εξαρτήματα τα οποία κατασκευάζονται κυρίως από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE). Ο χάλυβας έχει το πλεονέκτημα ότι είναι άμεσα διαθέσιμος και χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στην υπεράκτια όσο και την ναυτιλιακή βιομηχανία, αλλά πρέπει να προστατεύεται από τη διάβρωση και τις ζημιές λόγω κόπωσης. Το αλουμίνιο από την άλλη πλευρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του βάρους της κατασκευής και της αντοχής του στη διάβρωση, όμως είναι πιο επιρρεπές στην κόπωση. Η έκθεση στο νερό, η αλμύρα και η υγρασία είναι οι κύριοι παράγοντες που αυξάνουν τον κίνδυνο διάβρωσης. Η επιλογή για τα κατάλληλα υλικά καθορίζεται από έναν συνδυασμό παραγόντων:

- Δύναμη του υλικού
- Αντοχή στη διάβρωση
- Φυσικές ιδιότητες
- Συγκόλληση και διαμόρφωση του κράματος
- Οικολογία (θαλάσσια ανάπτυξη)



Εικόνα 3-1: α) διάβρωση β) κόπωση γ) θαλάσσια ανάπτυξη.

3.3 Σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης

Το σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης έχει σκοπό να κρατήσει την πλωτή κατασκευή στη θέση της ώστε η εγκατάσταση να μην αποτελεί απειλή ζημίας για την ίδια την εγκατάσταση, όπως για παράδειγμα σύγκρουση στην ακτή και στον πυθμένα της θάλασσας ή για άλλους χρήστες που δραστηριοποιούνται στην περιοχή, όπως σύγκρουση με άλλα πλωτά μέσα. Επιπλέον το σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης θα πρέπει να μην επιτρέπει την πιθανότητα ζημιών στην ηλεκτρική σύνδεση της εγκατάστασης. Εκτός από τη διατήρηση της πλωτής κατασκευής στη θέση της το σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης θα πρέπει να επιτρέπει στην κατασκευή να κινείται σε ένα περιορισμένο εύρος διαδρομής χωρίς να επηρεάζεται από τις συνδυασμένες επιδράσεις των φορτίων των κυμάτων του αέρα και των θαλάσσιων ρευμάτων. Η διατήρηση του σταθμού στη θέση του σε συνδυασμό με τη δυνατότητα εύρους κινήσεων που είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική λειτουργία της πλωτής εγκατάστασης, καθιστά τον σχεδιασμό του συστήματος πρόσδεσης και αγκύρωσης ιδιαίτερα δύσκολο.

Οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης ενός πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος έχουν μεγάλη σημασία για την επιλογή του και τον σχεδιασμό των συστημάτων πρόσδεσης και αγκύρωσης. Οι συνθήκες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την επιλογή και τον σχεδιασμό της διάταξης των συστημάτων πρόσδεσης και αγκύρωσης είναι οι εξής:

- Τοπικό βάθος υδάτων (Βαθυμετρία)
- Κυματικό κλίμα
- Διακυμάνσεις της στάθμης του νερού (παλίρροιές και καταιγίδες)
- Θαλάσσια ρεύματα
- Θαλάσσιο αποτύπωμα (χώρος που απαιτείται για την εγκατάσταση)
- Μέγιστες επιτρεπόμενες εκτροπές των πλωτήρων
- Συνθήκες εδάφους του βυθού (για την επιλογή του συστήματος αγκύρωσης)

Τα συμβατικά συστήματα πρόσδεσης και αγκύρωσης όπως αναλύονται παρακάτω έχουν αποδειχθεί επιτυχημένα σε εφαρμογές στον τομέα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, καθώς και για θαλάσσιες εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως στις υπεράκτιες πλωτές ανεμογεννήτριες και τους μετατροπείς κυματικής ενέργειας, το σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης θα αποτελεί σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους του πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος. Κατά μέσο όρο για ένα σύστημα μετατροπέα κυματικής ενέργειας το κόστος του συστήματος αγκύρωσης αντιστοιχεί σχεδόν στο 10% των συνολικών κεφαλαιουχικών δαπανών (Ocean,2015). Ως εκ τούτου τα χαμηλότερα

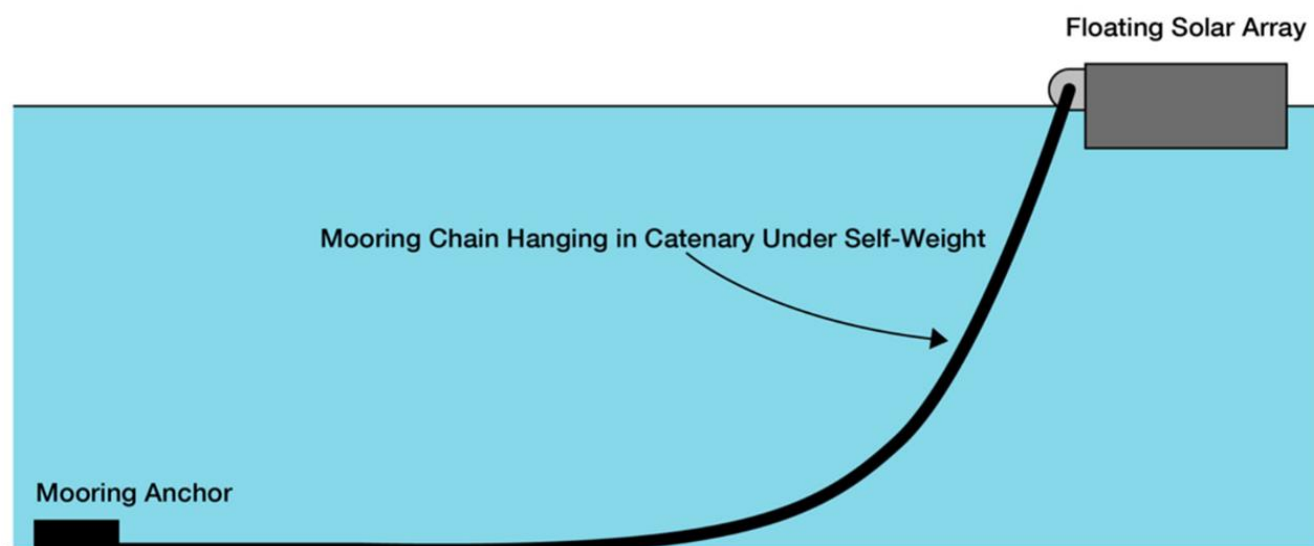
έσοδα των πλωτών θαλασσιών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε σύγκριση με τις δομές στον τομέα του πετρελαίου και του αερίου, θα πρέπει να ωθήσουν τον τομέα να εφαρμόσει καινοτόμα συστήματα και εναλλακτικά υλικά για οικονομικά αποδοτικότερα συστήματα πρόσδεσης και αγκύρωσης.

3.3.1 Διατάξεις πρόσδεσης

Ένα υπεράκτιο σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης αποτελείται από τρία βασικά μέρη: το σύστημα αγκύρωσης, τη γραμμή πρόσδεσης και μια συγκεκριμένη διάταξη πρόσδεσης. Η διάταξη του συστήματος πρόσδεσης εξαρτάται από τις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες και τον σκοπό της υπεράκτιας μονάδας. Οι τρεις πιο σημαντικές διατάξεις πρόσδεσης που χρησιμοποιούνται αναλύονται παρακάτω.

1. Διάταξη πρόσδεσης “Catenary”

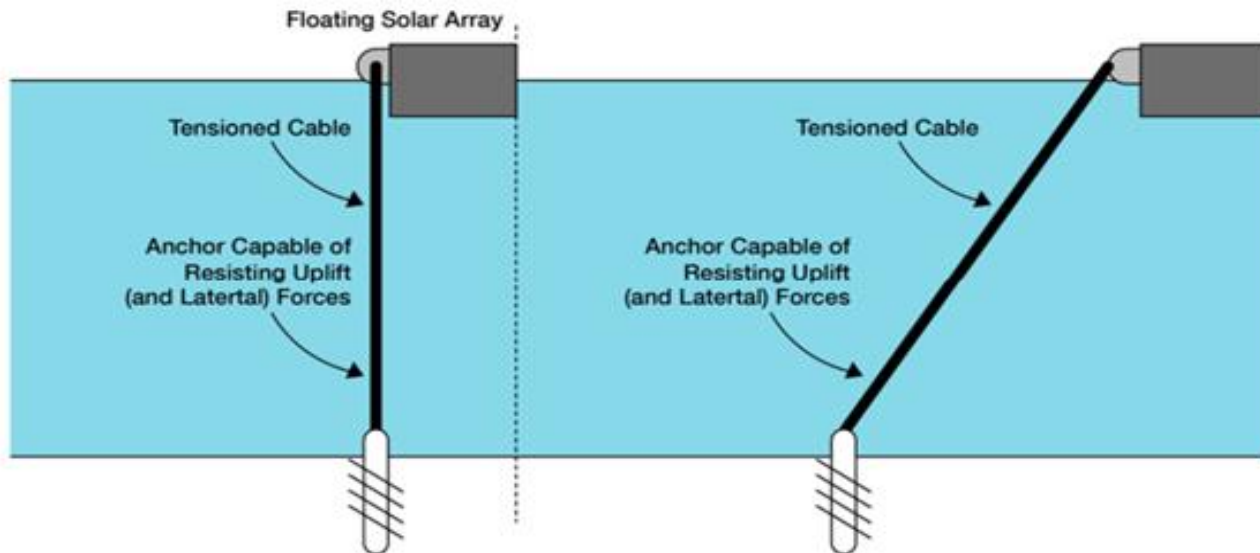
Η διάταξη πρόσδεσης “catenary” χρησιμοποιεί το ίδιο το βάρος της γραμμής πρόσδεσης για να παρέχει μεταβλητό κατακόρυφο και οριζόντιο ρυθμό ταλάντωσης στο αγκυροβολημένο πλωτό σώμα. Ο όρος “catenary” αναφέρεται στο σχήμα που παίρνει η γραμμή πρόσδεσης λόγω του ίδιου του βάρους της, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-2. Για το λόγο αυτό οι γραμμές πρόσδεσης είναι συνήθως αλυσίδες με το βάρος τους να καθορίζεται από το μέγεθος των συνδέσμων. Χαρακτηριστικό της διάταξης αυτής είναι ότι η δυσκαμψία πρόσδεσης αυξάνεται καθώς το πλωτό σώμα απομακρύνεται από το σημείο αγκύρωσης. Η γραμμή πρόσδεσης βρίσκεται κατά μήκος του βυθού για μια απόσταση προτού να συνδεθεί με την άγκυρα, οπότε το φορτίο που ασκείται στην άγκυρα είναι οριζόντιο, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την επιλογή της άγκυρας που θα χρησιμοποιηθεί με αυτήν τη διάταξη. Το μήκος της γραμμής πρόσδεσης εξαρτάται από το βάθος του νερού και το απαιτούμενο εύρος κίνησης του πλωτού σώματος. Η διάταξη “catenary” απαιτεί μεγάλη έκταση για την εγκατάστασή της.



Εικόνα 3-2: Διάταξη πρόσδεσης “Catenary”.

2. Διάταξη πρόσδεσης “Taunt”

Η διάταξη πρόσδεσης “taunt” αποτελείται από γραμμές πρόσδεσης που συγκρατούνται σε τάση χρησιμοποιώντας την άνωση του πλωτού σώματος. Οι γραμμές πρόσδεσης είναι συνήθως ευθυγραμμισμένες κατακόρυφα έτσι ώστε το πλωτό σώμα να κινείται με κάποια ελευθερία σε οριζόντιο επίπεδο, ενώ σε κατακόρυφη κατεύθυνση η διαθέσιμη κίνηση είναι περιορισμένη. Για την αποφυγή υπερβολικών διακυμάνσεων στην τάση του καλωδίου λόγω αλλαγών στο υψόμετρο της επιφάνειας του νερού λόγω κυμάτων ή παλίρροιας, η επιφάνεια των πλωτήρων στο επίπεδο του νερού διατηρείται συνήθως σχετικά μικρή. Παρόλο που στη διάταξη “taunt” χρησιμοποιούν συνήθως κατακόρυφες γραμμές πρόσδεσης, άλλες κλήσεις γραμμών πρόσδεσης είναι επίσης δυνατές. Μεταβάλλοντας την κλίση των γραμμών πρόσδεσης είναι δυνατό να διαφοροποιηθεί ο σχετικός περιορισμός μεταξύ των κατακόρυφων και οριζόντιων κινήσεων του πλωτού σώματος. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης πρόσδεσης “taunt” φανερώνουν ότι μπορεί να εφαρμόζεται κυρίως σε τοποθεσίες όπου υπάρχει μόνο μια μικρή κατακόρυφη διακύμανση στην επιφάνεια του νερού, δεδομένου ότι στις περιοχές με μεγάλο βάθος οι μεταβολές της στάθμης του νερού είναι σχετικά μικρές και σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος των γραμμών πρόσδεσης το σύστημα θα μπορούσε να θεωρηθεί κατάλληλο για ανάπτυξη σε νερά με μεγάλο βάθος. Η διάταξη “taunt” δεν απαιτεί μεγάλη έκταση για την εγκατάσταση, ενώ οι γραμμές πρόσδεσης συνδέονται στον βυθό χρησιμοποιώντας πασσάλους ή βαρίδια.

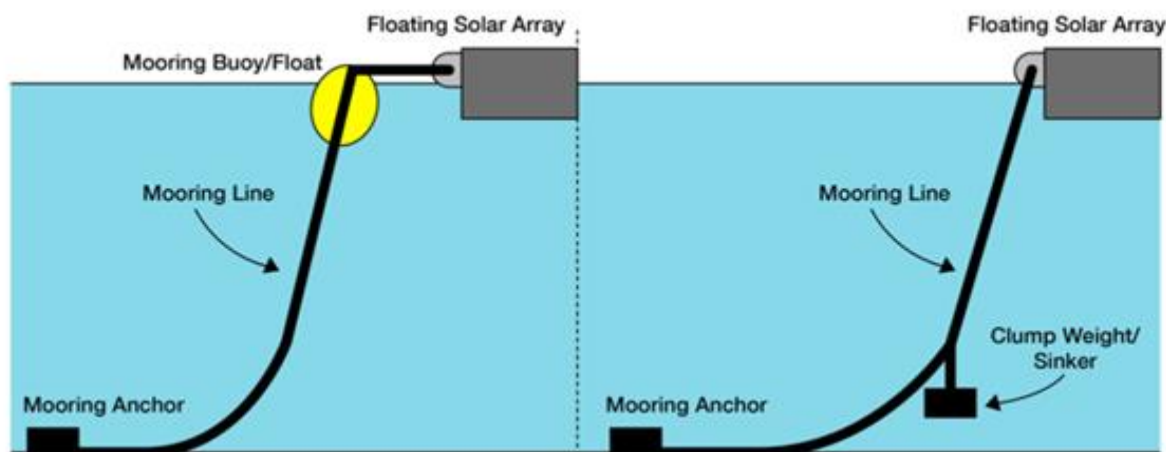


Εικόνα 3-3: Διάταξη πρόσδεσης “Taunt”

3. Διάταξη πρόσδεσης “Hybrid”

Η διάταξη πρόσδεσης “hybrid” αποτελείται από έναν ή περισσότερους πλωτήρες ή και με βαρίδια που συνδέονται με τις γραμμές πρόσδεσης μεταξύ του πλωτού σώματος και του πυθμένα όπως φαίνεται στην εικόνα 3-4. Η διάταξη πρόσδεσης “hybrid” έχει πολλά από τα χαρακτηριστικά της διάταξης “catenary” με τη διαφορά ότι χρειάζονται μικρότερη έκταση για την εγκατάσταση τους και να

δημιουργήσουν λιγότερη διαταραχή στον πυθμένα καθώς οι γραμμές πρόσδεσης δεν ανυψώνονται και δεν μετακινούνται διαρκώς στον πυθμένα. Αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στον σχεδιασμό του συστήματος όταν είναι σημαντικό για την ποιότητα του νερού, ή σε περιοχές που η διαταραχή του πυθμένα πρέπει να είναι ελάχιστη όπως για παράδειγμα σε περιοχές που είναι εγκατεστημένες υδατοκαλλιέργειες.



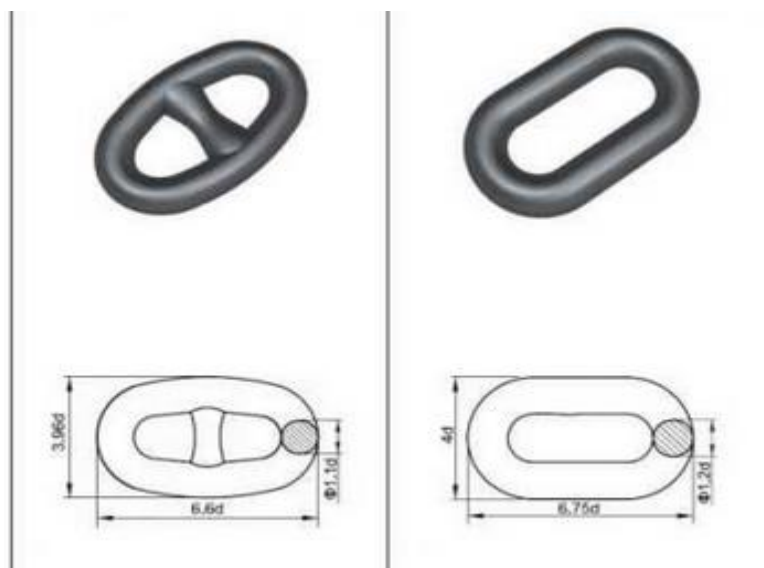
Εικόνα 3-4: Διάταξη πρόσδεσης "Hybrid"

3.3.2 Γραμμές Πρόσδεσης

Οι γραμμές πρόσδεσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποτροπή της μετακίνησης του πλωτού σώματος από τα θαλάσσια ρεύματα τις παλίρροιες και τον άνεμο. Κατασκευάζονται συνήθως από ισχυρά και ανθεκτικά υλικά όπως συνθετικές ίνες ή χαλύβδινο σύρμα. Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από τον τύπο και το μέγεθος του πλωτού σώματος, τις περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά και τη διάταξη πρόσδεσης που θα χρησιμοποιηθεί. Οι κυριότεροι τύποι γραμμών πρόσδεσης είναι:

1. Αλυσίδες

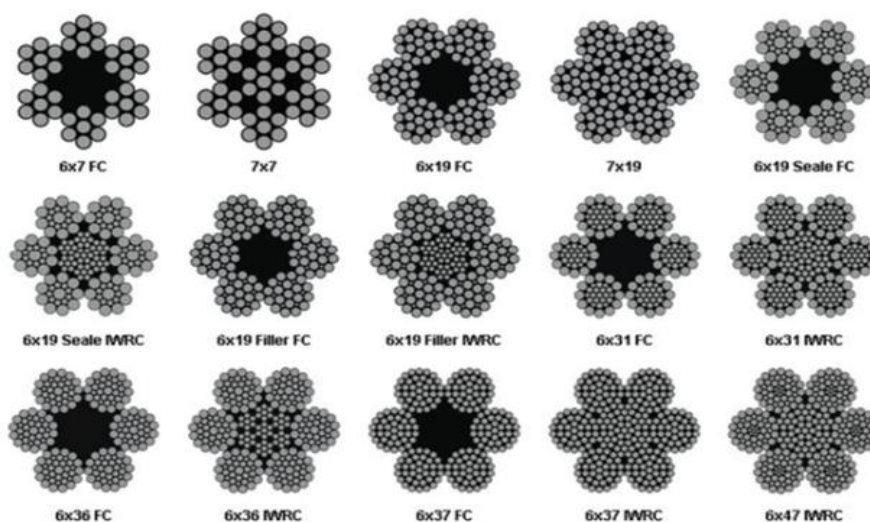
Οι αλυσίδες κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα υψηλής αντοχής και είναι σχεδιασμένες να αντέχουν σε μεγάλες δυνάμεις που ασκούνται σε αυτές από το πλωτό σώμα. Κατηγοριοποιούνται σε διαφορετικές ποιότητες με βάση την αντοχή τους στον εφελκυσμό. Οι συνηθέστερες βαθμίδες περιλαμβάνουν τις βαθμίδες 2,3 και 4 όπου όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός τόσο ισχυρότερη είναι η αλυσίδα. Οι διαθέσιμοι τύποι αλυσίδων πρόσδεσης είναι α) οι αλυσίδες με ενισχυμένους κρίκους (stud-link chains) οι οποίες είναι ισχυρότερες παρέχουν περισσότερη σταθερότητα και διαχειρίζονται ευκολότερα και β) οι αλυσίδες χωρίς ενισχυμένους κρίκους (studless chains).



Εικόνα 3-5: α) Αλυσίδες με ενισχυμένους κρίκους β) Χωρίς ενισχυμένους κρίκους.

2. Συρματόσχοινα

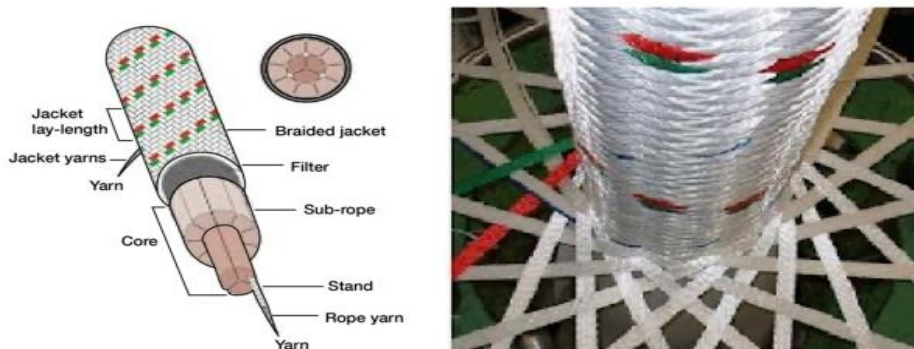
Τα συρματόσχοινα κατασκευάζονται από πολλαπλά μεταλλικά σύρματα, συνεστραμμένα μεταξύ τους σε ένα ελικοειδές μοτίβο σχηματίζοντας κλώνους βελτιώνοντας έτσι την αντοχή ενώ μειώνεται το φαινόμενο της σύνθλιψης. Μία επίστρωση στους κλώνους από πολυβινυλχλωρίδιο (PVC) μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάβρωση. Η επιλογή του κατάλληλου συρματόσχοινου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ο τύπος του έργου, το περιβάλλον εργασίας και οι απαιτήσεις αντοχής του.



Εικόνα 3-6: Συρματόσχοινό.

3. Συνθετικά σχοινιά

Τα συνθετικά σχοινιά είναι ελαφριά, ελαστικά και έχουν χαμηλό κόστος σε σύγκριση με τις αλυσίδες και τα συρματοσχοινιά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βαθιά νερά καθώς το χαμηλό βάρος τους βοηθά στη μείωση των κατακόρυφων φορτίων και κατά συνέπεια στην πολυπλοκότητα της εγκατάστασης. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συνθετικών σχοινιών είναι το πολυαμίδιο, ευρέως γνωστό ως νάιλον, το πολυπροπυλένιο και ο πολυεστέρας, υλικά τα οποία είναι ανθεκτικά στο νερό και την ηλιακή ακτινοβολία γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για θαλάσσιες και ναυτιλιακές εφαρμογές.

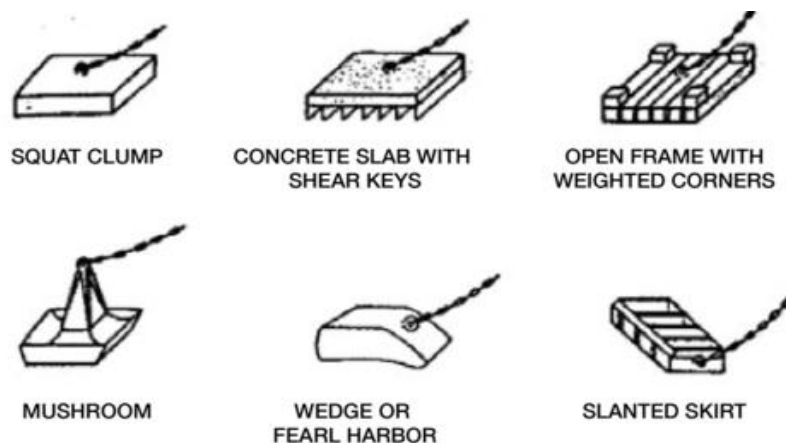


Εικόνα 3-7: Συνθετικό σχοινί.

3.3.3 Σύστημα αγκύρωσης

1. Άγκυρες νεκρού βάρους “Deadweight anchors”

Οι άγκυρες νεκρού βάρους είναι μεγάλες και βαριές κατασκευές συνήθως από σκυρόδεμα ή χάλυβα οι οποίες τοποθετούνται στον πυθμένα της θάλασσας. Οι άγκυρες βασίζονται στο βάρος τους ώστε να αντισταθούν στη μετατόπιση από τα θαλάσσια ρεύματα. Μπορεί να έχουν ένα απλό σχήμα που μοιάζει με μπλοκ ή έναν πιο σύνθετο σχεδιασμό τύπου μανιτάρι για την ενίσχυση της σταθερότητας. Μπορεί επίσης να διαθέτουν πρόσθετα χαρακτηριστικά, όπως πτερύγια ή ποδιές για να ενισχύσουν περαιτέρω την πρόσφυση στον πυθμένα.



Εικόνα 3-8: Άγκυρες νεκρού βάρους.

2. Συρτές άγκυρες “Drag anchors”

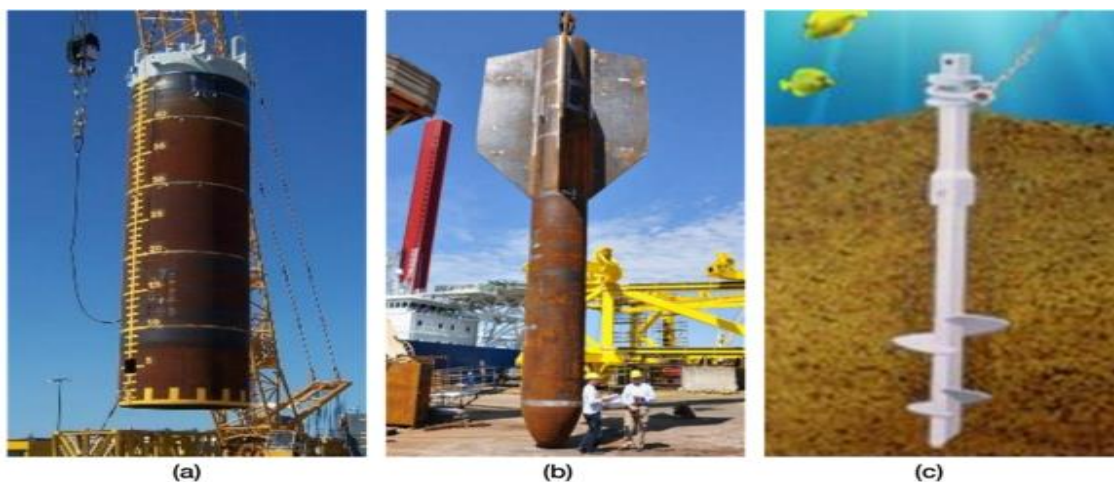
Οι συρτές άγκυρες χρησιμοποιούνται κυρίως στη ναυτιλία και τη ναυσιπλοΐα για την επιβράδυνση των πλοίων. Σε αντίθεση με τις άγκυρες νεκρού βάρους έχουν σχεδιαστεί για να σύρονται και διεισδύουν στον πυθμένα της θάλασσας αντί να μένουν σταθερές σε ένα σημείο. Η περιοχή συρσίματος και η διείσδυση στον πυθμένα είναι δύο παράμετροι για την εκτίμηση της ικανότητας συγκράτησης της άγκυρας, η οποία μπορεί να φτάσει 30 -40 φορές το βάρος της.



Εικόνα 3-9: Συρτή άγκυρα.

3. Άγκυρες πάσσαλοι “Pile Anchors”

Οι άγκυρες πασσάλων είναι συνήθως μεγάλες κάθετα προσανατολισμένες στήλες που εγκαθίστανται με την έμπηξή τους στον πυθμένα της θάλασσας. Το βάθος έμπηξης καθώς και ο τύπος του πασσάλου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από παράγοντες όπως η σύνθεση του πυθμένα τα αναμενόμενα φορτία και οι περιβαλλοντικές συνθήκες του σημείου πρόσδεσης. Κατασκευάζονται από ανθεκτικά υλικά όπως ο χάλυβας ή το σκυρόδεμα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα και η αντοχή στη διάβρωση.



Εικόνα 3-10: α) Άγκυρα Πάσσαλος β) Άγκυρά Τορπίλη γ) Βιδωτή ή Ελικοειδής Άγκυρα.

3.4 Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός – σύνδεση με το δίκτυο

Τα ηλεκτρικά εξαρτήματα ενός υπεράκτιου πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος αντιμετωπίζουν διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες σε σύγκριση με τα επίγεια φωτοβολταϊκά συστήματα. Στόχος για ένα υπεράκτιο πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα είναι η επίτευξη αξιόπιστων ηλεκτρικών συνδέσεων του ηλεκτρικού εξοπλισμού που βρίσκεται τοποθετημένος επάνω στην πλωτή κατασκευή καθώς και η ηλεκτρική διασύνδεση με το επίγειο ηλεκτρικό δίκτυο.

Τα διαφορετικά υλικά κατασκευής του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού όπως αντιστροφείς, φωτοβολταϊκά πλαίσια, μετασχηματιστές και καλώδια θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν σε όλες εκείνες τις δομικές και λειτουργικές απαιτήσεις, όπως την έκθεση στο νερό, την αλμύρα, την υγρασία και τις ρωγμές λόγω περιβαλλοντικής καταπόνησης που αυξάνουν τον κίνδυνο διάβρωσης και υποβάθμισης του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, επηρεάζοντας ως εκ τούτου τη διάρκεια ζωής του έργου.

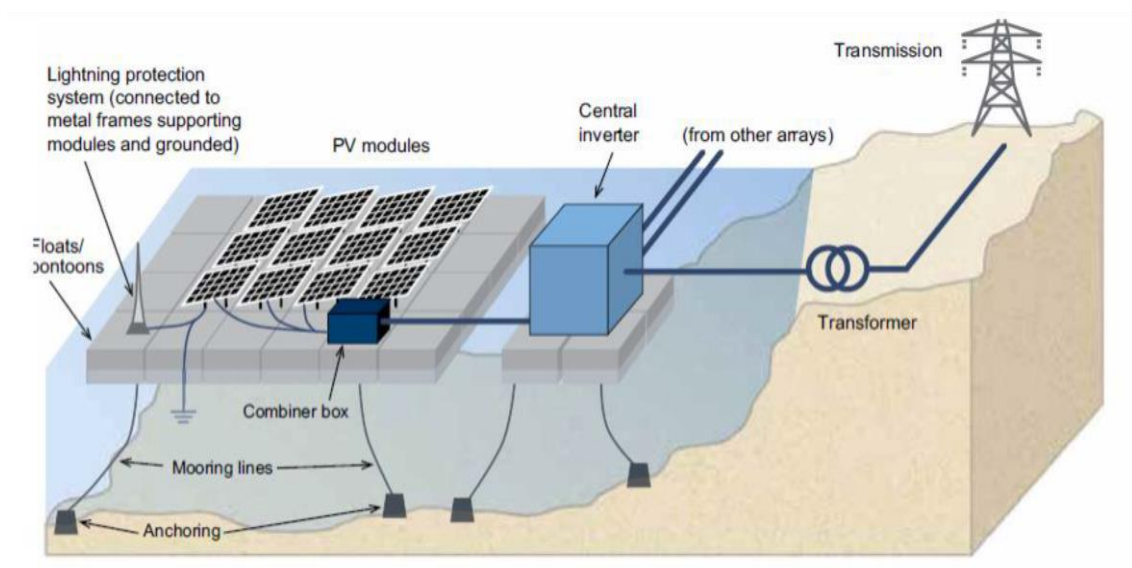
Η ηλεκτρική διάταξη για τα πλωτά ΦΒ συστήματα ακολουθεί την τυπική βιομηχανική πρακτική με πρόσθετες εκτιμήσεις που σχετίζονται με το περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά του συστήματος όπως:

- υγρασία και πιθανή εισροή νερού στον εξοπλισμό,
- αυξημένη έκθεση του εξοπλισμού στην ηλιακή ακτινοβολία
- μετακίνηση της πλωτής κατασκευής από το σημείο πρόσδεσης λόγω ανέμου, ρευμάτων ή άλλων δυνάμεων

- καταπόνηση του εξοπλισμού λόγω κυμάτων,
- ευκολία των δραστηριοτήτων συντήρησης

Οι εκτιμήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τα στάδια του σχεδιασμού και της εγκατάστασης.

Έως σήμερα υπάρχουν πολλά καθιερωμένα ηλεκτρικά πρότυπα, κώδικές και συνιστώμενες πρακτικές για ηλεκτρικές εφαρμογές σε θαλάσσια περιβάλλοντα που χρησιμοποιούνται από τις βιομηχανίες του πετρελαίου και των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων όπου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και στα υπεράκτια πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα.



Σχήμα 3-1: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού πλωτού ΦΒ συστήματος μεγάλης κλίμακας με τα βασικά του μέρη.

(πηγή: World Bank Group, ESMAP and SERIS, 2019)

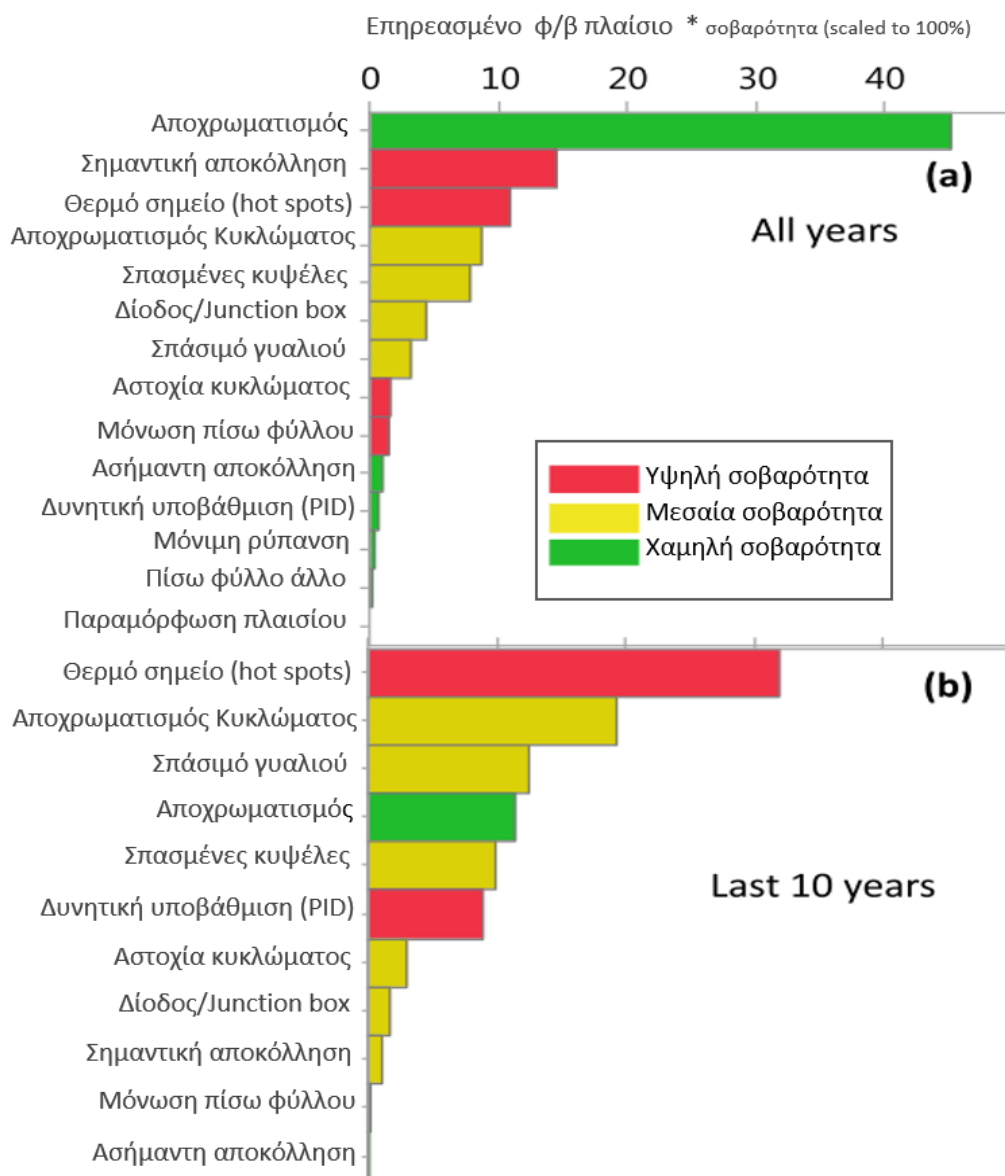
3.4.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Τα κυκλικά φορτία από τα κύματα τον άνεμο και τα θαλάσσια ρεύματα μπορεί να προκαλέσουν παραμορφώσεις και τάσεις οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν ρωγμές στα ΦΒ πλαίσια και να οδηγήσουν στη μείωση της αντοχής και της ηλεκτρικής παραγωγής. Η εφαρμογή εύκαμπτων ηλιακών συλλεκτών (soft&flex) θα μπορούσε να αποτελέσει καλύτερη επιλογή καθώς το μικρό βάρος και η ευελιξία τους μπορεί να τους επιτρέπει να αντέχουν καλύτερα στις σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες του ωκεανού.

Η γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός των ΦΒ πλαισίων είναι πρωταρχικής σημασίας καθώς η εσφαλμένη τοποθέτηση θα έχει ως αποτέλεσμα μείωση της απόδοσης, ιδανικά τα ΦΒ πλαίσια πρέπει να ακολουθούν τον ήλιο (tracking systems) για μέγιστη απόδοση, ωστόσο τα συστήματα αυτά δεν θεωρούνται κατάλληλα ακόμα για τις υπεράκτιες συνθήκες λειτουργίας και είναι αμφίβολο αν θα μπορέσουν ποτέ να καταστούν οικονομικά αποδοτικά για αυτές τις συνθήκες. Κάθε τοποθεσία θα έχει μια βέλτιστη γωνία κλίσης που μεγιστοποιεί τη συνολική ετήσια ακτινοβολία. Η βέλτιστη γωνία κλίσης ρυθμίζεται στο γεωγραφικό πλάτος της κάθε τοποθεσίας. Για τα σταθερά συστήματα η μέγιστη ετήσια παραγωγή μπορεί να επιτευχθεί όταν τα ΦΒ πλαίσια είναι προσανατολισμένα προς το νότο και έχουν γωνία κλίσης από 25-35 μοίρες για τις χώρες της Μεσογείου, ωστόσο για να επιτευχθεί πιο ομοιόμορφη

κατανομή της παραγωγής κατά τη διάρκεια της ημέρας συχνά επιλέγεται ο ανατολικό-δυτικός προσανατολισμός. Οι έντονες γωνίες κλίσης μπορεί να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στον δομικό σχεδιασμό της πλωτής κατασκευής καθώς σύμφωνα με τη συνιστώμενη πρακτική DNV GL-RP-C205 (DNV GL, 2010) οι δυνάμεις του ανέμου σε μία κατασκευή είναι κατευθυντικά ανάλογες μεταξύ της γωνίας της κατεύθυνσης του ανέμου και της εκτιθέμενης περιοχής, δηλαδή τα φορτία του ανέμου αυξάνονται όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση των ΦΒ πλαισίων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του μεγέθους του πλωτού συστήματος ώστε να μπορεί να αντέξει περισσότερα φορτία. Η μηδενική γωνία κλίσης από την άλλη μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στον δομικό σχεδιασμό της πλωτής κατασκευής όμως οδηγεί σε περίπου 10% λιγότερη ετήσια παραγωγή ισχύος, πράγμα που μπορεί να ισοσταθμιστεί με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες που επικρατούν λόγω του ανέμου και του νερού στα θαλάσσια περιβάλλοντα.

Τα ΦΒ πλαίσια υπόκεινται σε διάφορες μορφές υποβάθμισης και εξαρτώνται κατά πολύ από την επιλογή των υλικών για τις κυψέλες και τα πλαίσια. Οι πιο γνωστοί μηχανισμοί υποβάθμισής είναι το φως, η θερμοκρασία και το φαινόμενο της δυνητικής υποβάθμισής (PID) το οποίο προκαλεί δυσλειτουργία στις κυψέλες των πλαισίων. Το σχήμα 3-2 δείχνει ένα διάγραμμα Pareto των πιο συχνών τρόπων υποβάθμισης που παρατηρήθηκαν σε μία μελέτη χερσαίων συστημάτων που εγκαταστάθηκαν για μία περίοδο άνω των 20 ετών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα προβλήματα που παρατηρούνται στις εγκαταστάσεις των τελευταίων 10 ετών, όπου κυριαρχούν η υποβάθμιση από τα θερμά σημεία (hot spots) και ο αποχρωματισμός του εσωτερικού κυκλώματος. Άλλοι σημαντικοί τρόποι υποβάθμισης στις σύγχρονες εγκαταστάσεις φαίνεται να είναι η θραύση του γυαλιού και ο αποχρωματισμός των κυψελών, που εμφανίζεται κύριως στα θερμότερα κλίματα (Dirk C. Jordan, 2017).



Σχήμα 3-2 Διάγραμμα Pareto των πιο συχνών τρόπων υποβάθμισης α) για όλα τα χρόνια β) συστήματα εγκατεστημένα για 10 χρόνια.

Η προέλευση αυτών των τρόπων υποβάθμισης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι κατανοητή και αντιμετωπίζεται από τους κατασκευαστές των ΦΒ πλαισίων δίνοντας εγγύηση απόδοσης και κατασκευής. Η εγγύηση απόδοσης συνήθως εγγυάται 90% παραγωγή στα 10 χρόνια και 80% στα 25 χρόνια, ενώ η εγγύηση κατασκευής εγγυάται συνήθως λειτουργία χωρίς βλάβη για 10-12 χρόνια. Ωστόσο αυτή η πρακτική χρησιμοποιείται για τα χερσαία συστήματα.

Η εφαρμογή των ΦΒ πλαισίων σε θαλάσσια περιβάλλοντα πιθανόν να εισάγει νέους τρόπους υποβάθμισης που μπορεί να προκληθούν από τα ισχυρά φορτία στα ΦΒ πλαίσια, την αλμύρα και τη ρύπανση. Πολλοί κατασκευαστές έχουν ανακοινώσει την έναρξη παραγωγής ΦΒ πλαισίων που προορίζονται για πλωτά συστήματα (Jinko solar, Hanwa Qsells, Soltech), όμως αυτά τα πλαίσια δεν μπορεί να θεωρηθεί αυτομάτως ότι είναι κατάλληλα και για τις υπεράκτιες εφαρμογές.

3.4.2 Αντιστροφείς

Οι αντιστροφείς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέποντας το συνεχές ρεύμα που παράγεται από τους ηλιακούς συλλέκτες σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Στις μέχρι σήμερα εγκαταστάσεις πλωτών φωτοβολταϊκών σε λίμνες και ταμιευτήρες χρησιμοποιούνται κυρίως κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters) και αντιστροφείς στοιχειοσειράς (string inverters), οι οποίοι τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση από τους ηλιακούς συλλέκτες. Σε μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα ή συστήματα με σημαντική απόσταση από την ακτή οι αντιστροφείς καθώς και οι μετασχηματιστές τοποθετούνται σε μία ξεχωριστή πλωτή κατασκευή κοντά στην υπόλοιπη πλωτή συστοιχία, ενώ για μικρότερα συστήματα με μικρότερη απόσταση από την ξηρά οι αντιστροφείς και οι μετασχηματιστές τοποθετούνται στην ξηρά. Οι αντιστροφείς που θα εγκατασταθούν σε θαλάσσια πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν να αντιμετωπίσουν πρόσθετες προκλήσεις σε σύγκριση με τους αντίστοιχους αντιστροφείς που εγκαθίστανται σε πλωτά συστήματα σε λίμνες ή ταμιευτήρες όπως:

- **Έκθεση στο αλμυρό νερό**

Το αλμυρό νερό προκαλεί διάβρωση και μπορεί να επιταχύνει την υποβάθμιση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του αντιστροφέα. Οι αντιστροφείς πρέπει να είναι σχεδιασμένοι με υλικά και μονωτικές επιστρώσεις που να αντέχουν στις διαβρωτικές επιδράσεις του αλμυρού νερού.

Για τους κεντρικούς αντιστροφείς, εάν εγκαθίστανται στην ξηρά εντός περιβλήματος, το περίβλημα θα πρέπει να έχει βαθμό προστασίας IP44 ή υψηλότερο, εάν εγκαθίστανται σε πλωτή κατασκευή θα πρέπει να είναι κατάλληλοι για εξωτερική χρήση με βαθμό προστασίας IP 54 ή μεγαλύτερο ενώ όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα θα πρέπει να στεγάζονται σε τμήμα του περιβλήματος με βαθμό προστασίας IP 65 ή υψηλότερο. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα του αντιστροφέα θα πρέπει να φέρουν τις κατάλληλες προστατευτικές επιστρώσεις για την προστασία από διάφορες επιβλαβείς επιδράσεις όπως την υγρασία και τους ρύπους. Οι κοινοί τύποι προστατευτικών επιστρώσεων μπορεί να περιλαμβάνουν επιστρώσεις από λάκκα πολυουρεθάνης, σιλικόνη, ακρυλική πολυουρεθάνη και σμάλτο. Η επιλογή της κατάλληλης προστατευτικής επιστρώσης εξαρτάται από τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, όπως τις συνθήκες λειτουργίας, τη θερμοκρασία, την υγρασία και άλλους παράγοντες. Οι αντιστροφείς στοιχειοσειράς (string inverters) εάν εγκαθίστανται σε εξωτερικό χώρο, θα πρέπει να έχουν βαθμό προστασίας IP65 ή μεγαλύτερο και όλα τα ηλεκτρονικά του κυκλώματα πρέπει να φέρουν προστατευτική επιστρώση. Οι αντιστροφείς εγκατεστημένοι σε πλωτό σύστημα θα είναι πιο εκτεθειμένοι στο άμεσο ηλιακό φως από ότι οι αντιστροφείς στα χερσαία συστήματα επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας και η μεταβαλλόμενη υγρασία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό.

- **Μόνιμες δυνάμεις από τα κύματα**

Οι αντιστροφείς εγκατεστημένοι σε πλωτές θαλάσσιες κατασκευές θα υπόκεινται στη συνεχή κίνηση και τις δυνάμεις που σχετίζονται με τα κύματα με αποτέλεσμα την καταπόνηση του εξοπλισμού. Αυτή η μηχανική καταπόνηση του εξοπλισμού μπορεί να οδηγήσει στην πρόωρη φθορά του μετατροπέα.

- **Ακραία καιρικά φαινόμενα**

Τα πλωτά συστήματα εγκατεστημένα σε ανοικτές θαλάσσιες περιοχές είναι ευάλωτα σε ακραία καιρικά φαινόμενα που προκαλούνται από καταιγίδες. Οι αντιστροφείς θα πρέπει να είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αντέχουν τις επιπτώσεις των ισχυρών ανέμων, της δυνατής βροχής και τις ταραγμένης θάλασσας κατά τη διάρκεια της καταιγίδας.

3.4.3 Καλώδια

Τα υπεράκτια καλώδια εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος έχουν καθοριστικό ρόλο καθώς επιτρέπουν στις υπεράκτιες εφαρμογές να παράγουν ή να χρησιμοποιούν ανανεώσιμη ενέργεια. Το θαλάσσιο υπεράκτιο περιβάλλον είναι σκληρό, επομένως τα καλώδια διασύνδεσης πρέπει να είναι κατασκευασμένα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να αντιμετωπίσουν τις αντίξοες συνθήκες. Ορισμένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- **Αντοχή στο κύμα και τα καιρικά φαινόμενα**

Τα υπεράκτια θαλάσσια καλώδια πρέπει να αντέχουν στον έντονο κυματισμό, τους τυφώνες και άλλα ακραία καιρικά φαινόμενα. Οι εξωτερικές επιφάνειες και οι ενισχύσεις πρέπει να σχεδιάζονται για να αντέχουν στην μηχανική καταπόνηση.

- **Προστασία από τη διάβρωση και στεγανοποίηση**

Η επικάλυψη των καλωδίων πρέπει να προστατεύει από τη διάβρωση που μπορεί να προκληθεί από την υγρασία και την αλμύρα, ενώ θα πρέπει να φέρουν στεγανοποίηση που θα εμποδίζει την εισροή νερού η οποία θα προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία τους.

- **Προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές**

Τα καλώδια πρέπει να φέρουν θωράκιση και άλλες προστατευτικές στρώσεις για να αντιμετωπίζουν τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που μπορεί να προκληθούν από άλλες θαλάσσιες εγκαταστάσεις και ηλεκτρονικά συστήματα.

- **Αντοχή στη θερμοκρασία και την υπεριώδη ακτινοβολία**

Τα καλώδια θα πρέπει να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, καθώς οι θαλάσσιες περιοχές υπόκεινται σε απότομες αλλαγές της θερμοκρασίας, ενώ θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας στην επιλογή των υλικών και των επικαλύψεων.

Δεδομένου των παραπάνω τεχνικών χαρακτηριστικών που πρέπει να έχουν τα υπεράκτια καλώδια ώστε να αντέχουν στα σκληρά θαλάσσια περιβάλλοντα, το κόστος για τη σύνδεση με το δίκτυο είναι υψηλό και αυξάνεται ακόμα περισσότερο όσο πιο μακριά από την ακτή εγκαθίσταται το πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα ωστόσο υπάρχουν τρόποι να μειωθεί το κόστος σύνδεσης με το δίκτυο, με την ενσωμάτωση των υπεράκτιων πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων με άλλες τεχνολογίες. Για παράδειγμα, οι πλωτοί σταθμοί μπορούν να κατασκευαστούν στον κενό χώρο μεταξύ των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν την ηλεκτρική υποδομή των αιολικών πάρκων, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους. Είναι επίσης δυνατές και οι υβριδικές λύσεις στις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια από το πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου έτσι ώστε να μην διοχετεύεται καθόλου ή μόνο ένα μέρος της φωτοβολταϊκής ενέργειας στο δίκτυο.

Όλες οι παραπάνω επιλογές απαιτούν προσαρμοσμένες λύσεις για τη σύνδεση με το δίκτυο, προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή αξιοποίηση των συνδέσεων. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη φάση σχεδιασμού των υπεράκτιων αιολικών περιοχών ή των μονάδων ηλεκτρολυσής.



Εικόνα 3-11: Ενσωμάτωση πλωτού ΦΒ σταθμού με άλλες τεχνολογίες.

3.5 Λειτουργία και συντήρηση

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των υπεράκτιων και των χερσαίων φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η προσβασιμότητα. Η απόσταση και η εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες καθιστούν την παρακολούθηση της λειτουργίας, την επιθεώρηση και τη συντήρηση δύσκολη και κοστοβόρα για τα υπεράκτια φωτοβολταϊκά συστήματα, ιδίως στα πιο αντίξοα θαλάσσια περιβάλλοντα. Ο στόχος σε αυτόν τον τομέα είναι η ελαχιστοποίηση των εργασιών συντήρησης. Η εμπειρία σε αυτόν τον τομέα αποκτάται με τα χρόνια παρόλα αυτά ένας ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος αναμένεται να διευκολύνει τη συντήρησή του. Η επαρκής παρακολούθηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματός αλλά και ο απομακρυσμένος χειρισμός είναι υποχρεωτικά για τον εντοπισμό αστοχιών στα ηλεκτρικά μέρη του συστήματος σε πρόωρο στάδιο. Οι παραπάνω πτυχές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού του υπεράκτιου φωτοβολταϊκού συστήματος, ώστε να ενσωματώνεται πλεόνασμα όλων των κρίσιμων εξαρτημάτων αλλά και αξιόπιστων συστημάτων παρακολούθησης και χειρισμού.

3.6 Κοινωνική αποδοχή

Ένας άλλος τομέας στο οποίο η τεχνολογία των πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών θα κληθεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις είναι η κοινωνική αποδοχή από τις τοπικές κοινωνίες. Παρόλο που η τεχνολογία έχει μεγάλες δυνατότητες για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η ανάπτυξη της συναντά αντίσταση και ανησυχίες από διάφορους εμπλεκόμενους φορείς όπως έχει καταγραφεί μέχρι σήμερα με τα πλωτά φωτοβολταϊκά στις λίμνες και τους ταμιευτήρες. Οι κυριότερες προκλήσεις που θα κληθούν να αντιμετωπίσουν οι εγκαταστάσεις πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών και σχετίζονται με την κοινωνική αποδοχή είναι:

- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ανησυχίες για το οικοσύστημα

Η πιθανή διαταραχή των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και της υδρόβιας ζωής μπορεί να προκαλέσει ανησυχίες στους περιβαλλοντολόγους και τις τοπικές κοινωνίες. Αυτό περιλαμβάνει την επίδραση της σκίασης στην επιφάνεια του νερού, τις αλλαγές στη θερμοκρασία του νερού και την πιθανότητα

ανάπτυξης υδρόβιων οργανισμών κάτω από τις πλωτές εγκαταστάσεις. Τα πλωτά συστήματα μπορεί επίσης να προκαλέσουν ρύπανση εάν απελευθερώνουν επιβλαβείς ουσίες ή αν αποκολληθούν εξαρτήματα κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Η σωστή επιλογή των υλικών και ο προσεκτικός σχεδιασμός του συστήματος μπορούν να αποτρέψουν κάτι τέτοιο.

- **Οπτική ρύπανση**

Οι παράκτιες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ενδέχεται να αλλοιώσουν την οπτική αισθητική των ακτών. Οι κάτοικοι της περιοχής και οι χρήστες αναψυχής πιθανόν να θεωρήσουν τις εγκαταστάσεις αυτές παρεμβατικές, επηρεάζοντας τη φυσική ομορφιά της περιοχής και ενδεχομένως και τις αξίες των ακινήτων, δεν ισχύει όμως το ίδιο για τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις καθώς στο ύψος των ματιών (1,75μ) ο ορίζοντας εμφανίζεται σε απόσταση 4,7 χιλιομέτρων, οποιοδήποτε αντικείμενο με το ίδιο ύψος θα βρίσκεται επομένως “πίσω από τον ορίζοντα”, εάν το αντικείμενο βρίσκεται σε απόσταση διπλάσια των 4,7 χιλιομέτρων συνεπώς τα υπεράκτια πλωτά συστήματα δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτά σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 χιλιομέτρων.

- **Κοινή χρήση της θαλάσσιας περιοχής**

Οι αλιείς και οι ναυτιλιακές βιομηχανίες ενδέχεται να εκφράσουν ανησυχίες σχετικά με πιθανές παρεμβάσεις στις αλιευτικές δραστηριότητες και στις διαδρομές ναυσιπλοΐας, καθώς οι πλωτές εγκαταστάσεις θα καταλαμβάνουν χώρο που χρησιμοποιείται παραδοσιακά από αυτές τις δραστηριότητες. Σε ορισμένες περιπτώσεις άλλες υφιστάμενες ή προγραμματισμένες οικονομικές δραστηριότητες από τον κλάδο της αναψυχής και του τουρισμού μπορεί να οδηγήσουν σε συγκρούσεις συμφερόντων για τη χρήση της θαλάσσιας περιοχής. Οι συγκρούσεις αυτές μπορούν να μετριαστούν με την επιβολή περιορισμών στον χωροταξικό σχεδιασμό των πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων, αλλά και στη θέσπιση κανονισμών για την από κοινού χρήση των υδάτινων περιοχών.

- **Συμμετοχή και όφελος για τις τοπικές κοινωνίες**

Η έλλειψη επικοινωνίας και εμπλοκής της τοπικής κοινωνίας μπορεί να οδηγήσει σε παρανοήσεις και αντίσταση. Η συμμετοχή της τοπικής κοινωνίας στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, η αντιμετώπιση των ανησυχιών τους και η παροχή πληροφοριών σχετικά με τα οφέλη των πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων για την τοπική κοινωνία, όπως η δημιουργία θέσεων εργασίας και πιθανός καταμερισμός των εσόδων είναι απαραίτητα για την κοινωνική αποδοχή.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ

Η Τεχνολογία των πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών συστημάτων προκειμένου να καθιερωθεί και να αποκτήσει μερίδιο στο ενεργειακό μείγμα θα πρέπει να καταστεί οικονομικά βιώσιμη, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μέτρηση αυτής της οικονομικής βιωσιμότητας εκφράζεται μέσω του ισοσταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE), όπου αντιπροσωπεύει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα σύστημα κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ζωής του. Το μέτρο αυτό λαμβάνει υπόψη τα αρχικά και λειτουργικά έξοδα, τη διάρκεια ζωής του συστήματος και την παραγωγή ενέργειας, προσφέροντας έναν ολοκληρωμένο τρόπο αξιολόγησης της οικονομικής απόδοσης αυτής της τεχνολογίας.

Το ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας χρησιμοποιείται και από τις αρμόδιες Ρυθμιστικές Αρχές Ενέργειας (ΡΑΕ) για τον καθορισμό της τιμής αγοράς της ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ. Ο καθορισμός της τιμής αγοράς αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αποτελεσματική προώθηση των ΑΠΕ, καθώς μια πολύ χαμηλή τιμή δεν θα προωθήσει καμία επένδυση στην εκάστοτε τεχνολογία, ενώ αντιθέτως μια πολύ υψηλή τιμή μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά κέρδη για τους παραγωγούς και υψηλότερο κόστος για τους τελικούς καταναλωτές. Συνήθως το LCOE υπολογίζεται σε διάρκεια ζωής 10 έως 40 χρόνια και έχει ως μονάδα μέτρησης τις μονάδες νομίσματος ανά μεγαβατώρα (€/MWh). Οι περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης οι οποίες εφαρμόζουν μεθόδους αποζημίωσης “feed-in” (feed in tariff) χρησιμοποιούν αυτήν την προσέγγιση για τον καθορισμό των τιμών.

4.1 Ισοσταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE)

Για τα έργα στον τομέα της ενέργειας, ο υπολογισμός του Ισοσταθμισμένου κόστους ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας την καθαρή παρούσα αξία του συνολικού κόστους κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος παραγωγής ενέργειας και στη συνέχεια διαιρώντας το με τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος, όπως φαίνεται στον ακόλουθο γνωστό τύπο:

$$LCOE = \frac{\text{Sum of costs over lifetime}}{\text{Sum of electrical energy produced over lifetime}} = \frac{CAPEX_0 + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}}$$

Όπου:

$CAPEX_0$ = Κεφαλαιουχικές δαπάνες, στη μονάδα νομίσματος (π.χ €, \$)

$OPEX_t$ = Ετήσιες λειτουργικές δαπάνες, στη μονάδα νομίσματος / έτος

E_t = Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα για t έτη, (kWh)

i = συντελεστής προεξόφλησης κεφαλαίου (%)

n = Διάρκεια ζωής του συστήματος (έτη)

t = έτος εντός της διάρκειας ζωής του συστήματος (1 έως n)

Στην περίπτωση των θαλάσσιων πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων τα στοιχεία κόστους που θα πρέπει να συμπεριληφθούν στις μεταβλητές του τύπου του ισοσταθμισμένου κόστους ενέργειας αναλύονται παρακάτω,

- **Κεφαλαιουχικές δαπάνες**

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες θα πρέπει να περιλαμβάνουν τα κόστη για τα παρακάτω στοιχεία όπου ισχύουν:

- Σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης,
- Πλωτήρες
- Δομή στήριξης
- Φωτοβολταϊκές μονάδες, ηλεκτρολογικός εξοπλισμός (αντιστροφείς, μετασχηματιστής, καλώδια, εξοπλισμός παρακολούθησης, κ.λ.π.)
- Εργασίες εγκατάστασης
- Κόστος καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας που σχετίζονται με την εγκατάσταση
- Κόστος σύνδεσης στο δίκτυο
- Κόστος αγοράς γης σε περίπτωση μη μίσθωσης
- Κόστος ανάπτυξης και αδειοδότησης

- **Λειτουργικές δαπάνες**

Οι λειτουργικές δαπάνες υπολογίζονται για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του συστήματος και θα πρέπει να περιλαμβάνουν τα κόστη για:

- Γενικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- Κόστος εργασιών συντήρησης
- Κόστος καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας που σχετίζονται με εξοπλισμό και μεταφορά για τις διαδικασίες συντήρησης
- Αγορά και εγκατάσταση ανταλλακτικών
- Μίσθωση θαλάσσιας έκτασης

- **Συντελεστής προεξόφλησης κεφαλαίου**

Ο συντελεστής προεξόφλησης κεφαλαίου αναφέρεται στον υπολογισμό της τρέχουσας αξίας των μελλοντικών ταμειακών ροών και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που σχετίζεται με το έργο. Ο συντελεστής προεξόφλησης κεφαλαίου συνήθως επηρεάζεται από το βαθμό ρίσκου του έργου τους όρους χρηματοδότησης και τις συνθήκες της αγοράς.

- **Η διάρκεια ζωής του συστήματος**

Η διάρκεια ζωής είναι ο αριθμός των προγραμματισμένων ετών λειτουργίας του συστήματος και θα είναι αντιπροσωπευτικό της αναμενόμενης ανθεκτικότητας των εξαρτημάτων συμπεριλαμβανομένης της πιθανής αντικατάστασης τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους.

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενός θαλάσσιου πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να εκτιμηθεί από ένα σύνολο μεθοδολογιών ανάλυσης της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος (Energy Yield Analysis). Σύμφωνα με την συνιστώμενη πρακτική DNVGL-RP-0584 η ανάλυση ενεργειακής απόδοσης ορίζεται ως η μοντελοποίηση της μέσης ετήσιας αναμενόμενης ενέργειας παραγωγής ενός συστήματος κατά τη διάρκεια ζωής του, συμβάλλοντας έτσι και στην κατανόηση σχετικών κινδύνων και αβεβαιοτήτων. Η ανάλυση ενεργειακής απόδοσης διενεργείται πριν από την ανάπτυξη του συστήματος με ένα ενεργειακό μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει:

- Μετεωρολογικά δεδομένα

Συνίσταται αναλυτική αξιολόγηση μετεωρολογικών δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως επιτόπιες μετρήσεις, δημόσιες βάσεις δεδομένων, δορυφορικά δεδομένα και στη συνέχεια επιλογή των δεδομένων με την υψηλότερη ποιότητα και ακρίβεια για την εισαγωγή στο μοντέλο προσομοίωσης. Μετεωρολογικά δεδομένα θα πρέπει να λαμβάνονται και κατά το χρονοδιάγραμμα κατασκευής του έργου μέσω επιτόπιων μετρήσεων εάν είναι εφικτό ειδάλλως θα πρέπει να χρησιμοποιούνται δορυφορικά δεδομένα.

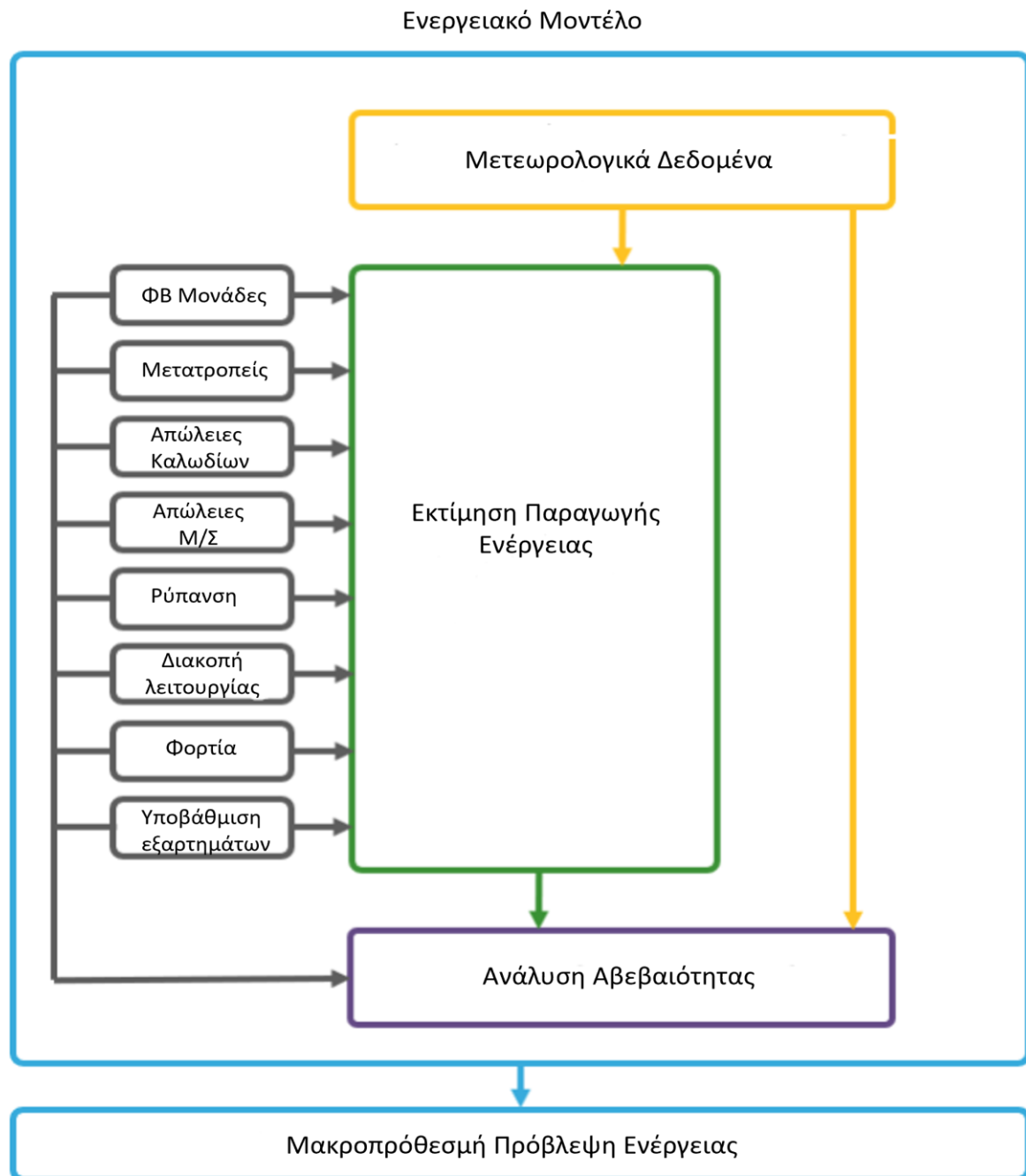
- Εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας

Η εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνει συγκεκριμένες συνθήκες και χαρακτηριστικά του έργου ως δεδομένα εισόδου στην ενεργειακή προσομοίωση, συμπεριλαμβανομένων: τη διάταξη, τον ηλεκτρολογικό σχεδιασμό, τις φωτοβολταϊκές μονάδες, τους αντιστροφείς, απώλειες ρύπανσής και την τεχνολογία του πλωτήρα. Η εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνει τη χρήση λογισμικού ενεργειακής προσομοίωσης που ακολουθεί τη μεθοδολογία που έχει αναγνωριστεί από τη βιομηχανία για την ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης. Ορισμένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα λογισμικά προσομοίωσης είναι τα: PVsyst, SolarFarmer, PVSol, Homer και System Advisory Model.

- Ανάλυση αβεβαιότητας

Η ανάλυση αβεβαιότητας θα πρέπει να περιλαμβάνει την αβεβαιότητα για τα δεδομένα εισαγωγής από τις διάφορες πηγές, την ενεργειακή προσομοίωση και τις απώλειες υπολογισμού που μπορεί να επηρεάσουν το έργο, ώστε να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις της αβεβαιότητας. Ανάλυση ευαισθησίας και ανάλυση κινδύνου θα πρέπει να συμπεριληφθούν ώστε να διασφαλιστεί ότι τα πιθανά έτη χαμηλών επιδόσεων αποτυπώνονται για το έργο, συμβάλλοντας στη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη ενέργειας.

Η διαδικασία του ενεργειακού μοντέλου αποτυπώνεται στο σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Ενεργειακό μοντέλο παραγωγής ενέργειας

4.2 Εκτιμήσεις Ισοσταθμισμένου Κόστους Ενέργειας Πλωτών ΦΒ Συστημάτων

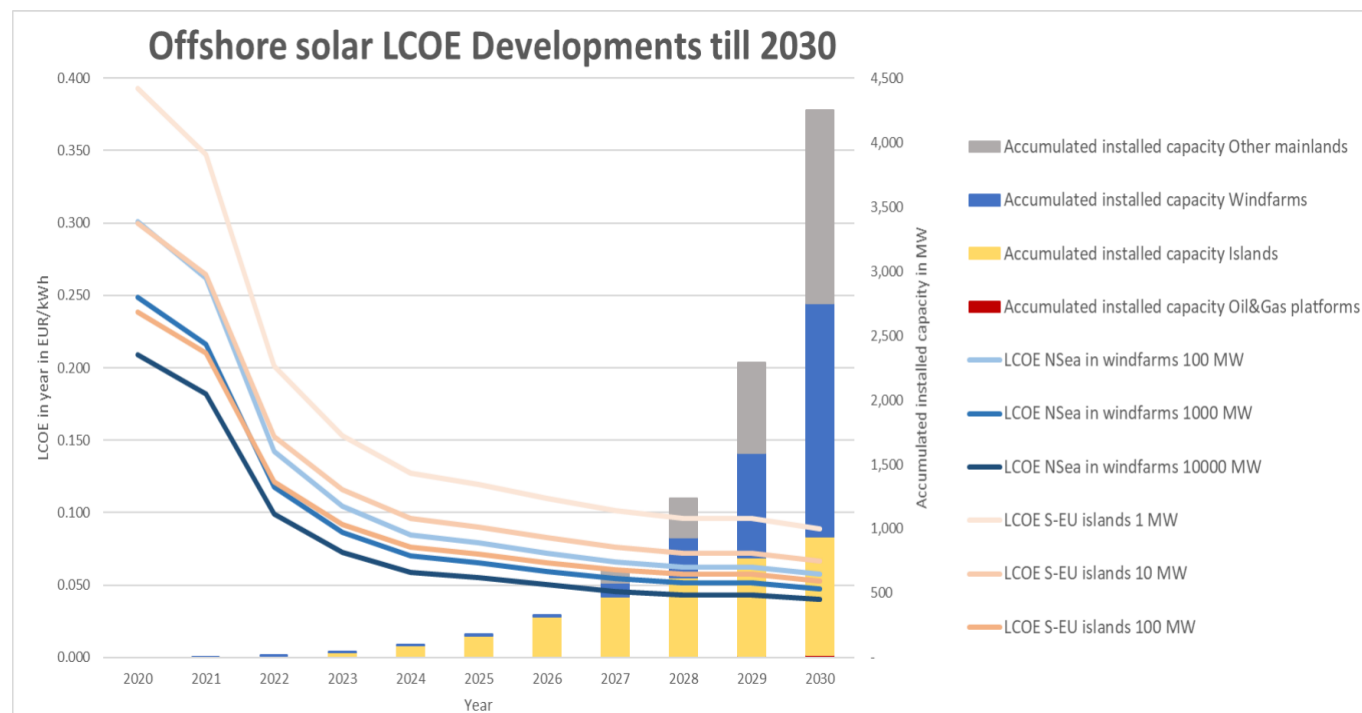
Η παγκόσμια συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών ανήλθε σε περίπου 942GW το 2021 (IEA,2022), η οποία περιελάμβανε περίπου 3GW εγκατεστημένων χερσαίων πλωτών φωτοβολταϊκών σε λίμνες και ταμιευτήρες (Ren21,2022), και περίπου 0,3 MW υπεράκτιων πλωτών θαλάσσιων φωτοβολταϊκών. Γίνεται διάκριση των δυο τεχνολογιών καθώς δεν πρόκειται για συγκρίσιμες τεχνολογίες οι οποίες αναπτύσσονται σε πολύ διαφορετικά περιβάλλοντα. Τα υπεράκτια φωτοβολταϊκά συστήματα σχεδιάζονται για αντίξοα θαλάσσια περιβάλλοντα με σημαντικό ύψος κύματος $H_s \geq 4$ μέτρων, σε αντίθεση με τα χερσαία πλωτά συστήματα που σχεδιάζονται για περιβάλλοντα με σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 1$ μέτρο. Καθώς οι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τα υπεράκτια φωτοβολταϊκά συστήματα είναι περιορισμένες, είναι ενδιαφέρον να κατανοήσουμε την τρέχουσα ανάπτυξη και το LCOE των χερσαίων πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων από δημοσιευμένες μελέτες, καθώς τα υπεράκτια συστήματα αναμένεται να ακολουθήσουν παρόμοια πορεία.

Σε μία μελέτη του Ολλανδικού οργανισμού εφαρμοσμένης επιστημονικής έρευνας TNO, που πραγματοποιήθηκε το 2019 οι κεφαλαιουχικές δαπάνες CAPEX, των χερσαίων πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ολλανδία εκτιμώνται μεταξύ 0,8-1,0 €/Wp με την τιμή του LCOE να κυμαίνεται από 0,09-0,11 €/kWh. Μια άλλη σχετική δημοσίευση του εθνικού εργαστήριου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας του υπουργείου ενέργειας των ΗΠΑ NREL, οι κεφαλαιουχικές δαπάνες για ένα σύστημα 2MWp εκτιμώνται σε 1,5€/Wp, και για ένα σύστημα 10MWp σε 1,1€/Wp. Το σύστημα των 10 MWp στη γεωγραφική θέση του Κάνσας με ετήσια απόδοση 1500kWh/kWp και συντελεστή προεξόφλησης κεφαλαίου 5% υπολόγισαν το LCOE στα 0,05€/kWh (Ramasamy and Margolis,NREL,2021). Στη δημοσιευμένη ανάλυση των Rosa Clot και Tina, για ένα σύστημα ισχύος 1MWp στο Ντουμπάι, εκτιμούν ότι οι κεφαλαιουχικές δαπάνες είναι 0,5- 0,7€/Wp, καταλήγοντας σε ένα υπολογισμένο LCOE 0.025 – 0.03 €/kWh, με ετήσια απόδοση 1600-2200 kWh/kWp.

Το 2023 ο διεθνής οργανισμός ανανεώσιμων πηγών ενέργειας IRENA δημοσίευσε τους παγκόσμιους μέσους όρους για τις κεφαλαιουχικές δαπάνες και το LCOE για τα έτη 2010 έως 2019. Αν και οι εν λόγω αριθμοί αφορούν τα επίγεια φωτοβολταϊκά, οι γενικές τάσεις δείχνουν σαφή μείωση των κεφαλαιουχικών δαπανών και αύξηση των συντελεστών δυναμικότητας, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του LCOE. Το 2010 το μέσο παγκόσμιο LCOE για τα χερσαία φωτοβολταϊκά συστήματα ήταν 342€/MWh ενώ το 2019 μειώθηκε στα 61€/MWh (IRENA,2020). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι σύμφωνα με την παγκόσμια τράπεζα World Bank Group, το LCOE των χερσαίων πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πλέον συγκρίσιμο με εκείνο των χερσαίων φωτοβολταϊκών συστημάτων, και αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι παρόλο που τα χερσαία πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν ελαφρώς υψηλότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες, κυρίως λόγω της απαίτησης πλωτήρων, συστημάτων αγκύρωσης και ανθεκτικότερων ηλεκτρικών εξαρτημάτων, αναμένονται υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τα χερσαία φωτοβολταϊκά συστήματα από +5% έως +10%, εξισορροπώντας έτσι την αύξηση των κεφαλαιουχικών δαπανών (World Bank Group, ESMAP and SERIS,2019).

Σύμφωνα με την αναφορά της παγκόσμιας τράπεζας το σύστημα της εταιρείας Swimsol για παράκτιο πλωτό φωτοβολταϊκό μεσαίας έκθεσης σε σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 3$ μέτρα μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια με κόστος μόλις 0,11€/kWh, όπου ο αριθμός αυτός βασίζεται σε οικονομική ζωή 30 ετών. Σύμφωνα με εκθέσεις του κλάδου το τρέχον LCOE έχει εκτιμηθεί στα 0,354€/kWh, ενώ η εταιρεία Oceans of Energy στα πλαίσια ενός πρώιμου πιλοτικού προγράμματος έχει εκτιμήσει το LCOE βασιζόμενη σε εμπειρικούς συντελεστές μάθησης και στην κλίμακα μεγέθους. Το μοντέλο δείχνουν ότι το LCOE θα πέσει κάτω από 0,12 – 0,15 €/kWh μόλις επιτευχθεί παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς 4MW, το οποίο αναμένεται να συμβεί κατά τη διάρκεια του έργου EU-SCORES το 2023. Οι εκτιμήσεις πέφτουν ακόμη περισσότερο μόλις τεθούν σε λειτουργία περισσότερα έργα έως το 2025 όπου το LCOE

προβλέπεται σε λιγότερο από 0,10 €/kWh, ενώ μέχρι το 2030 ο αριθμός αυτός θα μειωθεί σε επίπεδα κάτω των 0,05 €/kWh. Το διάγραμμα του μοντέλου απεικονίζεται στο σχήμα 4-2, περιλαμβάνοντας επιπλέον αποτελέσματα LCOE αιολικών πάρκων για τη Βόρεια θάλασσα.



Σχήμα 4-2: Μοντέλο LCOE, Μείωσης κόστους έως το 2030. (Oceans of Energy)

Οι εκτιμήσεις σχετικά με το LCOE των υπεράκτιων πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε υψηλή έκθεση περιορίζονται λόγω έλλειψης αρκετών δημοσιευμένων δεδομένων επομένως είναι δύσκολο να εκτιμηθεί το LCOE, ωστόσο είναι σαφές ότι οι συνθήκες υψηλής έκθεσης απαιτούν σημαντικά υψηλότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες σε σύγκριση με την περίπτωση μέσης έκθεσης. Σύμφωνα με τον Ολλανδικό οργανισμό εφαρμοσμένης επιστημονικής έρευνας TNO, εκτιμάται ότι οι κεφαλαιουχικές δαπάνες μπορεί να αυξηθούν 2-3 φορές σε σύγκριση με την περίπτωση μέσης έκθεσης, στον πίνακα 4-1 παρουσιάζεται μία σύνοψη σχετικά με την κατάσταση της τεχνολογίας (TRL) και του LCOE των πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων βασιζόμενη στα δημόσια δημοσιευμένα δεδομένα.

	Χερσαία Πλωτά (Inland FPVs)	Παράκτια (Nearshore FPVs)	Υπεράκτια (Offshore FPVs)
	Χαμηλή έκθεση	Μεσαία έκθεση	Υψηλή έκθεση
Ορισμός	Hmax =2m, Hs=1m Κυρίως σε λίμνες, και ταμιευτήρες	Hmax=6m, Hs=3m	Hmax=14m, Hs=7m
Κατάσταση Τεχνολογίας	Σχεδόν 2GWp εγκατεστημένα παγκοσμίως. TRL 8	Διάφορα πιλοτικά έργα έχουν υλοποιηθεί. TRL 4-6	Υπό ανάπτυξη, πιλοτικά έργα έχουν προγραμματιστεί. TRL 2-5
CAPEX (1MW)	0,7-1,1€/Wp	1,5-2,0€/Wp	3-6€/Wp
CAPEX (10MW)	0,5-0.9€/Wp	1,0-1,5€/Wp	2-4€/Wp
LCOE (1MWp)	0.07-0.11€/kWh	0.15-0.22€/kWh	0.8-1.3€/kWh
LCOE (10MWp)	0.05-0.09€/kWh	0.11-0.16€/kWh	0.6-0.9€/kWh

Πίνακας 4-1:Σύνοψη εκτιμήσεων TRL και LCOE για τα πλωτά ΦΒ. (πηγή: TNO,2022).

4.3 Προοπτική μείωσης του LCOE των υπεράκτιων πλωτών ΦΒ έργων.

Το ισοσταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τα υπεράκτια πλωτά ΦΒ έργα αποτελεί βασικό στόχο για τη βιομηχανία καθώς επιδιώκει να καταστήσει την τεχνολογία ανταγωνιστικότερη σε σχέση με άλλες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Διάφοροι παράγοντες μπορεί να συμβάλουν στη μείωση του LCOE για τα υπεράκτια πλωτά ΦΒ όπως:

- Τεχνολογικές εξελίξεις
Οι βελτιώσεις στην απόδοση των ΦΒ μονάδων μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση του LCOE, η πρόοδος στη ΦΒ τεχνολογία όπως η υψηλότερη απόδοση και τα χαμηλότερα ποσοστά υποβάθμισης μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση των υπεράκτιων πλωτών ΦΒ έργων. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη των πλωτών κατασκευών, θα οδηγήσει σε οικονομικά αποδοτικές και ανθεκτικές λύσεις, ενώ οι καινοτομίες στα υλικά και τα συστήματα πρόσδεσης, μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του συνολικού κόστους του έργου.

- **Οικονομίες Κλίμακος**
Έως σήμερα η εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τα υπεράκτια πλωτά φωτοβολταϊκά είναι σε κλίμακα έως 1MW, ωστόσο διάφοροι παράγοντες κόστους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του συστήματος, καθώς επωφελούνται από τις μαζικές αγορές τις εξορθολογισμένες διαδικασίες εγκατάστασης και τις βελτιστοποιημένες πρακτικές λειτουργίας και συντήρησης. Επιπλέον πλεονεκτήματα στο κόστος θα επιτευχθούν όταν η υπεράκτια πλωτή ΦΒ τεχνολογία αναπτυχθεί από μια εξειδικευμένη αγορά σε μια διεθνή μαζική αγορά με περισσότερο ανταγωνισμό μεταξύ των κατασκευαστών εξαρτημάτων και των παρόχων υπηρεσιών.
- **Μείωση Ρίσκου**
Καθώς η τεχνολογία θα ωριμάζει και γίνεται πιο διαδεδομένη, η εμπιστοσύνη των επενδυτών και των δανειστών θα αυξάνεται, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος χρηματοδότησης γεγονός που με τη σειρά του θα μειώσει το συνολικό ρίσκο που συνδέεται με τα υπεράκτια πλωτά ΦΒ έργα επηρεάζοντας θετικά ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας.
- **Πολιτική και Ρυθμιστική υποστήριξη**
Οι υποστηρικτικές πολιτικές, οι επιδοτήσεις και τα κίνητρα από τις κυβερνήσεις μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας. Η οικονομική στήριξη, οι φορολογικές ελαφρύνσεις και τα ευνοϊκά ρυθμιστικά πλαίσια μπορούν να ενθαρρύνουν τις επενδύσεις και να συμβάλουν στην αντιστάθμιση του αρχικού κόστους. Επιπλέον η βελτιωμένη πρόσβαση σε χρηματοδότηση μπορούν να μειώσουν το κόστος κεφαλαίου και να καταστήσουν τα υπεράκτια πλωτά ΦΒ συστήματα πιο οικονομικά βιώσιμα.

5. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, και τα 27 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεσμεύτηκαν στη μετατροπή της στην πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο ως το 2050. Στις 14 Ιουλίου 2021 η Επιτροπή ενέκρινε σειρά νομοθετικών προτάσεων που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο προτίθεται να επιτύχει την κλιματική ουδετερότητα στην ΕΕ έως το 2050, συμπεριλαμβανομένου του ενδιαμέσου στόχου για καθαρή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Η πρόταση υλοποιεί τη δέσμευση που αναλήφθηκε στην ανακοίνωση για την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (EGD) να υποβληθεί ένα ολοκληρωμένο σχέδιο για την επίτευξη του στόχου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2030 στο 55% με υπεύθυνο τρόπο. Η Επιτροπή προτείνει την αύξηση του δεσμευτικού στόχου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της ΕΕ στο 40% ενώ παράλληλα είναι σύμφωνη με τον στόχο της συμφωνίας των Παρισίων για τη συγκράτηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε επίπεδα πολύ κάτω των 2oC. Στα πλαίσια του στόχου αυτού πολλά Ευρωπαϊκά πιλοτικά προγράμματα έχουν ανακοινωθεί και βρίσκονται στο στάδιο υλοποίησης.

5.1 Παραδείγματα Χωρών της Ευρώπης

Τα υπεράκτια πλωτά ΦΒ δεν είναι ακόμη μια πλήρως αναπτυγμένη τεχνολογία, αλλά πολλές χώρες έχουν αρχίσει να δείχνουν ενδιαφέρον και να στρέφονται προς αυτήν την κατεύθυνση, με τον προγραμματισμό αρκετών πιλοτικών έργων.

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, η χώρα με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για επενδύσεις στην υπεράκτια πλωτή φωτοβολταϊκή τεχνολογία είναι η Ολλανδία. Τον Νοέμβριο του 2022 η κοινοπραξία που αποτελείται από την Ολλανδό-Νορβηγική εταιρεία Solar Duck, το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft (TU Delft), τον Ολλανδικό Οργανισμό Εφαρμοσμένης Επιστημονικής Έρευνας (TNO), το Ναυτιλιακό Ινστιτούτο Έρευνας των Κάτω Χωρών (MARIN) και την Deltares, έλαβε 7.8 εκατ. ευρώ επιδότηση έργου από το Ολλανδικό Υπουργείο Οικονομικών Υποθέσεων και Κλιματικής Πολιτικής, για την ανάπτυξη και δοκιμή μιας υπεράκτιας ΦΒ πλατφόρμας. Το πιλοτικό έργο με την ονομασία "Merganser" είναι μια επεκτάσιμη ιδέα που περιλαμβάνει έξι διασυνδεδεμένες πλατφόρμες που μπορούν να αντέξουν σε ακραίες υπεράκτιες συνθήκες και είναι ικανή να παράγει 500KWp ανανεώσιμης ενέργειας στη Βόρεια Θάλασσα.

Η RWE, μία από τις κορυφαίες εταιρείες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παγκοσμίως, κέρδισε την άδεια για την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου μεγάλης κλίμακας στη θέση Hollandse Kust West (HKW) VII στην Ολλανδική Βόρεια Θάλασσα μέσω της επιδότησης που ξεκίνησε στην Ολλανδία τον Απρίλιο του 2022 από την Ολλανδική κυβέρνηση. Το HKW VII βρίσκεται 53 χιλιόμετρα από τη δυτική ακτή της Ολλανδίας και θα τεθεί σε λειτουργία έως το 2026 με δυναμικότητα 700MW. Η RWE έχει συμπεριλάβει τη Solar Duck στην προσφορά της για τον ολλανδικό διαγωνισμό για το HKW VII, η οποία θα περιλαμβάνει την ενσωμάτωση ενός υπεράκτιου πλωτού ΦΒ σταθμού 5MW σε συνδυασμό με καινοτόμες λύσεις αποθήκευσης ενέργειας στο υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Η ενσωμάτωση υπεράκτιου πλωτού ΦΒ σταθμού σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο είναι μια πιο αποτελεσματική χρήση του ωκεάνιου χώρου για την παραγωγή ενέργειας (χρησιμοποιώντας τον χώρο μεταξύ των ανεμογεννητριών) και επιτρέπει συνέργειες όσον αφορά την κατασκευή και τη συντήρηση του σταθμού ανανεώσιμης ενέργειας πολλαπλών πηγών. Εκτός από την παραγωγή υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, η Ολλανδική κυβέρνηση ζήτησε από όλα τα συμμετέχοντα μέρη να προσφέρουν λύσεις για την πλήρη ενσωμάτωση

όλης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο Ολλανδικό ενεργειακό σύστημα με στόχο να συμβάλουν στην επίτευξη του στόχου των 21 MW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μέχρι το 2030.

Η Oceans of Energy, μια Ολλανδική εταιρεία που ειδικεύεται στην υπεράκτια ΦΒ ενέργεια, στις 11 Νοεμβρίου 2021, ανακοίνωσε το έργο "Βόρεια Θάλασσα 2" (NS2), το οποίο περιλαμβάνει την αναβάθμιση του υφιστάμενου πρώτου πλωτικού υπεράκτιου πλωτού έργου της από 50 KW σε 1MW, το έργο NS2 βρίσκεται 12 χιλιόμετρα από την ακτή του Scheveningen στην Ολλανδία και είναι σχεδιασμένο να αντέχει στις δύσκολες συνθήκες της Βόρειας θάλασσας με κύματα έως και σχεδόν 14 μέτρα. Ένα εκατομμύριο ευρώ από τη χρηματοδότηση του NS2 προορίζεται για την παρακολούθηση των επιπτώσεων του πλωτού ΦΒ συστήματος στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Η επέκταση του ΦΒ συστήματος σε 1MW υποστηρίζεται από δημόσια συνεισφορά από τη ρύθμιση Demonstration Energy and Climate Innovation (DEI+), που παρέχεται από τον Ολλανδικό Οργανισμό Επιχειρήσεων (RVO) του Ολλανδικού Υπουργείου Οικονομικών Υποθέσεων και Κλιματικής Πολιτικής.

Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα κλιμακούμενων υπεράκτιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (EU-SCORES) είναι ένα φιλόδοξο έργο χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ υπό την ηγεσία του Ολλανδικού Κέντρου Θαλάσσιας Ενέργειας (DMEC). Τα έργα θαλάσσιας ενέργειας ύψους 45 εκατομμυρίων ευρώ αποσκοπούν στην επίδειξη και την αξιοποίηση του δυναμικού μεγάλης κλίμακας των υπεράκτιων πάρκων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πολλαπλών πηγών σε όλες τις ευρωπαϊκές θάλασσες. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω δύο ιδιαίτερα ολοκληρωμένων και αποτελεσματικών επιδείξεων: (1) ένα υπεράκτιο ΦΒ σύστημα στο Βέλγιο, το οποίο είναι τοποθετημένο μαζί με ένα σταθερό αιολικό πάρκο στο βυθό και (2) μια συστοιχία κυματικής ενέργειας στην Πορτογαλία, η οποία είναι τοποθετημένη μαζί με ένα πλωτό αιολικό πάρκο. Στο πλαίσιο του έργου EU-SCORES η Ολλανδική εταιρεία Oceans of Energy θα κατασκευάσει ένα υπεράκτιο ΦΒ πάρκο 3MW που θα το συνδέσει με υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Οι επιδείξεις πολλαπλών πηγών θα παρουσιάσουν τα οφέλη της συνεχούς παραγωγής ενέργειας που αξιοποιεί τη συμπληρωματικότητα μεταξύ ανέμου, ήλιου και κυμάτων, καθώς οδηγεί σε ένα πιο ανθεκτικό και σταθερό σύστημα ενέργειας, με υψηλότερους συντελεστές ισχύος και χαμηλότερο συνολικό κόστος ανά MWh. Αυτές οι πτυχές θα βελτιώσουν επίσης την επιχειρηματική προοπτική για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου σε αυτά τα πάρκα. Οι επιδείξεις πλήρους κλίμακας θα αποδείξουν πώς η αυξημένη παραγωγή ισχύος και η εγκατεστημένη δυναμικότητα ανά km², θα μειώσουν τον απαιτούμενο θαλάσσιο χώρο, αφήνοντας περισσότερο χώρο για υδατοκαλλιέργειες, αλιεία, ναυτιλιακές διαδρομές και περιβαλλοντικά προστατευόμενες ζώνες.

Η ομοσπονδιακή κυβέρνηση της Γερμανίας ενέκρινε τον Σεπτέμβριο του 2018 το 7ο πρόγραμμα Ενεργειακής Έρευνας (7th ERP) με τίτλο "Καινοτομίες για την Ενεργειακή Μετάβαση". Στόχος του προγράμματος είναι να βοηθήσει τις εταιρείες και τα ερευνητικά ιδρύματα να ερευνήσουν και να αναπτύξουν τεχνολογίες για τον ενεργειακό εφοδιασμό του αύριο. Στο πλαίσιο του 7ου Προγράμματος Ενεργειακής Έρευνας η Ομοσπονδιακή Κυβέρνηση διαθέτει περίπου 7 δισεκατομμύρια για έργα, η βοήθεια απευθύνεται κυρίως σε τεχνολογίες που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της ενεργειακής μετάβασης. Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού η Γερμανική εταιρεία SINN Power ανέπτυξε το 2020 στο λιμάνι Ηράκλειου Κρήτης πλωτή ΦΒ πλατφόρμα συνολικής ισχύος 80kW, η πλατφόρμα έχει διαστάσεις 24x24m και ύψος 6m. Η εταιρεία υποστηρίζει ότι η πλατφόρμα έχει σχεδιαστεί για να αντέχει σε θαλάσσια περιβάλλοντα με σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 12m$, γεγονός που την καθιστά την πρώτη υπεράκτια πλωτή κατασκευή για αντίξοα θαλάσσια περιβάλλοντα. Η δεύτερη φάση του προγράμματος περιλαμβάνει την ενσωμάτωση στην πλατφόρμα κυματικής ενέργειας έως το τέλος του 2025. Στόχος της εταιρείας είναι η δημιουργία της πρώτης υπεράκτιας υβριδικής πλατφόρμας η οποία θα συνδυάζει ηλιακή, αιολική και κυματική ενέργεια.

5.2 Η Περίπτωση της Ελλάδας

Η Ελλάδα υιοθετώντας τους στόχους της Κεντρικής Ευρώπης που τέθηκαν στο πλαίσιο της Ενεργειακής Ένωσης με την πράσινη συμφωνία που προωθεί η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, παρουσίασε το Εθνικό σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ). Στρατηγικός στόχος του σχεδίου είναι οι ενεργειακοί και κλιματικοί στόχοι που τίθενται έως το 2030, να συμβάλουν καθοριστικά στην αναγκαία ενεργειακή μετάβαση με τον πλέον οικονομικά ανταγωνιστικό τρόπο για την εθνική οικονομία και να επιτύχουν τη δραστική μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, τοποθετώντας τη χώρα στο επίκεντρο των εξελίξεων της Ενεργειακής Ένωσης τόσο για το 2030 όσο και μακροπρόθεσμα για το έτος 2050.

Η Ελλάδα συγκαταλέγεται από τις πρώτες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που έδειξαν ενδιαφέρον για την υπεράκτια πλωτή ΦΒ τεχνολογία, εντάσσοντας στο ΦΕΚ 4951/2022 του Υπουργείου περιβάλλοντος και ενέργειας, το πλαίσιο ανάπτυξης «Πιλοτικών Θαλάσσιων Πλωτών ΦΒ Σταθμών (Π.Θ.Π.Φ.Σ.)». Στο πιλοτικό αυτό στάδιο το ΥΠΕΝ επιτρέπει τη χωροθέτηση, αδειοδότηση, εγκατάσταση και λειτουργία μέχρι 10 Π.Θ.Π.Φ.Σ. ισχύος έως 1MW το κάθε ένα ενώ υπάρχουν και προβλέψεις για ενιαία έργα με παραχώρηση και χερσαίων εκτάσεων στον αιγιαλό και την παραλία. Το νομοσχέδιο περιλαμβάνει πρόσθετες διευκολύνσεις αφού απαλλάσσονται από την υποχρέωση λήψης βεβαίωσης παραγωγού ή βεβαίωσης ειδικών έργων, την περιβαλλοντική αδειοδότηση και λήψη πρότυπων περιβαλλοντικών δεσμεύσεων καθώς και την υποχρέωση έκδοσης οικοδομικής άδειας. Επιπλέον οι Π.Θ.Π.Φ.Σ. μπορούν να λαμβάνουν οριστική προσφορά σύνδεσης, χωρίς να προαπαιτείτε αδειοδότηση σύμφωνη με την περιβαλλοντική νομοθεσία, η οποία χορηγείται κατά προτεραιότητα έναντι του συνόλου των αιτημάτων και εντός προθεσμίας ενός μηνός από την υποβολή της σχετικής αίτησης, ακόμα και σε περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως κορεσμένα δίκτυα. Αναλυτικότερα η διαδικασία όπως περιλαμβάνεται στο νομοσχέδιο είναι η εξής:

- **Διαδικασία χωροθέτησης και αδειοδότησης**

Οι Πιλοτικοί Θαλάσσιοι Πλωτοί Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί (Π.Θ.Π.Φ.Σ.) απαλλάσσονται από:

- α) Την υποχρέωση λήψης Βεβαίωσης Παραγωγού ή Βεβαίωσης Ειδικών Έργων,
- β) περιβαλλοντική αδειοδότηση και λήψη Πρότυπων Περιβαλλοντικών δεσμεύσεων,
- γ) την υποχρέωση έκδοσης οικοδομικής άδειας.

Η χωροθέτηση των Π.Θ.Π.Φ.Σ. πραγματοποιείται σε θαλάσσιες και χερσαίες εκτάσεις, σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

Ο ενδιαφερόμενος, φυσικό ή νομικό πρόσωπο, υποβάλλει αίτηση στη Διεύθυνση Χωροταξίας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Η αίτηση περιλαμβάνει:

- α) Τοπογραφικό Διάγραμμα ή απόσπασμα Ορθοφωτοχάρτη σε ΕΓΣΑ '87, στο οποίο απεικονίζονται η προς κατάληψη θαλάσσια και χερσαία έκταση, το συνολικό εμβαδό αυτής, οι συντεταγμένες των κορυφών της, καθώς και ο παρακείμενος χερσαίος χώρος.
- β) Συνοπτική τεχνική έκθεση του προς ανάπτυξη έργου.

Η Διεύθυνση Χωροταξίας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας διαβιβάζει την ως άνω αίτηση, μέσα σε δέκα (10) ημέρες από την υποβολή της, στις κάτωθι υπηρεσίες:

- α) Στην αρμόδια Εφορεία Αρχαιοτήτων,
- β) στην αρμόδια υπηρεσία Νεοτέρων Μνημείων και Τεχνικών Έργων,
- γ) στην αρμόδια Εφορεία Εναλίων Αρχαιοτήτων,

- δ) στην αρμόδια Εφορεία Παλαιοανθρωπολογίας και Σπηλαιολογίας,
- ε) στη Διεύθυνση Περιβάλλοντος και Χωροταξίας της αρμόδιας Περιφέρειας,
- στ) στην αρμόδια Διεύθυνση Δασών, ή, σε περίπτωση που δεν υφίσταται, στο αρμόδιο Δασαρχείο,
- ζ) στο Γενικό Επιτελείο Εθνικής Άμυνας,
- η) στη Διεύθυνση Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Κλιματικής Αλλαγής του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων,
- θ) στη Διεύθυνση Λιμενικών και Κτιριακών Υποδομών της Γενικής Γραμματείας Λιμένων, Λιμενικής Πολιτικής και Ναυτιλιακών Επενδύσεων του Υπουργείου Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής,
- ι) στο Αρχηγείο Λιμενικού Σώματος - Ελληνικής Ακτοφυλακής (Λ.Σ. - ΕΛ.ΑΚΤ.) του Υπουργείου Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής,
- ια) στη Διεύθυνση Χωρικού Σχεδιασμού και Υποδομών του Υπουργείου Τουρισμού,
- ιβ) στη Γενική Διεύθυνση Δημόσιας Περιουσίας και Κοινωφελών Υπηρεσιών του Υπουργείου Οικονομικών,
- ιγ) στη Γενική Διεύθυνση Αλιείας του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων,
- ιδ) στον οικείο Ο.Τ.Α. Α' βαθμού.

Οι ανωτέρω υπηρεσίες παρέχουν γνώμη αναφορικά με τη χωροθέτηση του Π.Θ.Π.Φ.Σ. στη Διεύθυνση Χωροταξίας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, εντός αποκλειστικής προθεσμίας τριάντα (30) ημερών από την ημέρα παραλαβής της αίτησης. Εντός προθεσμίας τριών (3) ημερών από την πάροδο της προθεσμίας των 30 ημερών, η Διεύθυνση Χωροταξίας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας διαβιβάζει στο Κεντρικό Συμβούλιο Χωροταξικών Θεμάτων και Αμφισβητήσεων (ΚΕ.ΣΥ.ΧΩ.Θ.Α.) τα στοιχεία του φακέλου, συμπεριλαμβανομένων και των γνώμων που παρασχέθηκαν σύμφωνα με την παρ. 5. Η βεβαίωση περί επιτρεπτού της χωροθέτησης του Π.Θ.Π.Φ.Σ. ή η απορριπτική απόφαση εκδίδεται από το ΚΕ.ΣΥ.ΧΩ.Θ.Α. εντός προθεσμίας δέκα (10) ημερών από την ημερομηνία παραλαβής του φακέλου. Κατά παρέκκλιση κάθε άλλης γενικής ή ειδικής διάταξης, η χωροθέτηση Π.Θ.Π.Φ.Σ. επιτρέπεται και στις Ζώνες Προστασίας και Διαχείρισης, όπως αυτές ορίζονται στις παρ. 4β, 4γ και 4δ του άρθρου 19 του ν. 1650/1986 (Α' 160), χωρίς να απαιτούνται περιβαλλοντική αδειοδότηση και λήψη Πρότυπων Περιβαλλοντικών Δεσμεύσεων, εφόσον δεν παραβλέπεται η ακεραιότητα της προστατευόμενης περιοχής. Προς τούτο, υποβάλλεται από τον ενδιαφερόμενο δέουσα εκτίμηση επιπτώσεων, Ειδική Οικολογική Αξιολόγηση (Ε.Ο.Α.), η οποία αξιολογείται από την αρμόδια Μονάδα Διαχείρισης Προστατευόμενης Περιοχής (ΜΔΠΠ) του άρθρου 34 του ν. 4685/2020 (Α' 92), βάσει των προδιαγραφών της υπό στοιχεία 52983/1952/2013 απόφασης του Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (Β' 2436) κατ' αναλογική εφαρμογή των προβλεπόμενων στην υπ' αριθμ. 52983/1952/2013 απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (Β' 2436). Σε περίπτωση που δεν έχει εκδοθεί το προεδρικό διάταγμα της παρ. 4 του άρθρου 21 του ν. 1650/1986, που αφορά την προς κατάληψη θαλάσσια και χερσαία έκταση, επιτρέπεται η χωροθέτηση Π.Θ.Π.Φ.Σ. χωρίς να απαιτείται περιβαλλοντική αδειοδότηση.

Το ΚΕ.ΣΥ.ΧΩ.Θ.Α. δύναται να εκδώσει έως δέκα (10) βεβαιώσεις περί επιτρεπτού της χωροθέτησης. Αν κάποιος εκ των Π.Θ.Π.Φ.Σ. δεν λάβει Οριστική Προσφορά Σύνδεσης από τον αρμόδιο διαχειριστή εντός ενός (1) έτους από την έκδοση της βεβαίωσης, η Διεύθυνση Χωροταξίας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας δύναται να ακυρώσει την εκδοθείσα βεβαίωση και να εκδώσει νέα βεβαίωση για άλλον Π.Θ.Π.Φ.Σ.

- **Ενιαία άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας**

Για την εγκατάσταση και λειτουργία των Πιλοτικών Θαλάσσιων Πλωτών Φωτοβολταϊκών Σταθμών (Π.Θ.Π.Φ.Σ.) χορηγείται Ενιαία Άδεια Εγκατάστασης και Λειτουργίας, η οποία ενσωματώνει και αντικαθιστά όλες τις διοικητικές άδειες που απαιτούνται κατά την κείμενη νομοθεσία. Στην άδεια αυτή οριοθετούνται και οι θαλάσσιες και χερσαίες εκτάσεις που θα χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση και λειτουργία των Π.Θ.Π.Φ.Σ.

Η αίτηση για έκδοση Ενιαίας Άδειας Εγκατάστασης και Λειτουργίας υποβάλλεται στη Γενική Γραμματεία Χωρικού Σχεδιασμού και Αστικού Περιβάλλοντος του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας μέχρι την 30ή.6.2023. Κάθε φυσικό ή νομικό πρόσωπο, άμεσα ή έμμεσα μέσω της συμμετοχής του στη διοίκηση ή ως μέτοχος, εταίρος ή μέλος νομικού προσώπου με οποιοδήποτε ποσοστό συμμετοχής, επιτρέπεται να υποβάλλει αίτηση και να λαμβάνει Ενιαία Άδεια Εγκατάστασης και Λειτουργίας για μέχρι δύο (2) Π.Θ.Π.Φ.Σ.

Με την αίτηση συνυποβάλλονται:

- (α) Συντεταγμένες της προς κατάληψη θαλάσσιας και χερσαίας έκτασης,
- (β) τεχνική έκθεση του προς εγκατάσταση Π.Θ.Π.Φ.Σ.,
- (γ) βεβαίωση περί επιτρεπτού της χωροθέτησης του Π.Θ.Π.Φ.Σ.
- (δ) οριστική Προσφορά Σύνδεσης και η αποδοχή αυτής,
- (ε) γενικό πιστοποιητικό, πιστοποιητικό ισχύουσας εκπροσώπησης και καταστατικό σε περίπτωση νομικού προσώπου ή ταυτότητα σε περίπτωση φυσικού προσώπου.

Η έγκριση της ενιαίας άδειας εγκατάστασης και λειτουργίας χορηγείται εντός είκοσι (20) ημερών από την προσήκουσα υποβολή της αίτησης και των αναγκαίων δικαιολογητικών, με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Η ενιαία άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας χορηγείται για χρονικό διάστημα είκοσι δύο (22) ετών και περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- (α) Σε περίπτωση νομικού προσώπου, την επωνυμία και τον Αριθμό Φορολογικού Μητρώου και σε περίπτωση φυσικού προσώπου, στοιχεία της ταυτότητας,
- (β) τις συντεταγμένες της υδάτινης έκτασης, όπως αυτή οριοθετείται στη βεβαίωση της χωροθέτησης,
- (γ) τυχόν όρους και προϋποθέσεις που έχουν τεθεί από τις συναρμόδιες υπηρεσίες,
- (δ) τους υπόλοιπους όρους και τις προϋποθέσεις λειτουργίας της μονάδας.

Πριν από την έναρξη των εργασιών εγκατάστασης ο ενδιαφερόμενος υποβάλλει στη Γενική Γραμματεία Χωρικού Σχεδιασμού και Αστικού Περιβάλλοντος του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας έγγραφο, με τα οποία τεκμηριώνονται η νόμιμη χρήση της χερσαίας έκτασης, η ύπαρξη παραχώρησης χρήσης, συμπεριλαμβανομένης της εκτέλεσης έργων, του αιγιαλού και του πυθμένα για τη διέλευση των καλωδίων, καθώς και η ύπαρξη παραχώρησης για το υδάτινο στοιχείο της θαλάσσιας έκτασης, σύμφωνα με τα άρθρα 14 και 15 του ν. 2971/2001 (Α' 285).

Μετά την εγκατάσταση και λειτουργία του σταθμού ο κάτοχός του υποβάλλει στην υπηρεσία που χορήγησε την ενιαία άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας:

- (α) διάγραμμα κάλυψης και τεχνική περιγραφή με την ένδειξη «Ως Κατασκευάστηκε»,
- (β) έγγραφο του αρμόδιου διαχειριστή με το οποίο προκύπτει ότι ο Π.Θ.Π.Φ.Σ. έχει τεθεί σε λειτουργία,
- (γ) υπεύθυνη δήλωση του μηχανικού επίβλεψης της λειτουργίας του σταθμού, περί αποδοχής της ανάθεσης και τήρησης κατά τη λειτουργία του σταθμού των όρων και κανονισμών για την προστασία του περιβάλλοντος,

(δ) υπεύθυνη δήλωση του νόμιμου εκπροσώπου περί μη αναστολής της αδειοδότησης του σταθμού.

Ο κάτοχος της ενιαίας άδειας εγκατάστασης και λειτουργίας, κατά τη διάρκεια της κατασκευής και λειτουργίας του Π.Θ.Π.Φ.Β.Σ., υποχρεούται να μεριμνά για την ασφαλή εγκατάσταση και λειτουργία του, την προστασία της υγείας και ζωής των εργαζομένων, την προστασία του περιβάλλοντος και να τηρεί κάθε άλλο κανόνα δικαίου που διέπει τη δραστηριότητά του.

Η εγκατάσταση και λειτουργία (Π.Θ.Π.Φ.Σ.) επιτρέπεται μόνο σε φυσικά πρόσωπα που είναι Έλληνες πολίτες ή πολίτες άλλου κράτους μέλους της ΕΕ και σε νομικά πρόσωπα που έχουν συσταθεί κατά το εσωτερικό δίκαιο ή το δίκαιο άλλου κράτους μέλους της ΕΕ και έχουν την καταστατική τους έδρα εντός της ΕΕ, η δε δραστηριότητά τους παρουσιάζει ουσιαστικό και συνεχή δεσμό με τις οικονομίες των εν λόγω κρατών.

- **Παραχώρηση θαλάσσιου χώρου- Σύμβαση παραχώρησης**

Το Ελληνικό Δημόσιο, με απόφαση του κατά περίπτωση αρμόδιου Υπουργού, μετά από αίτηση του ενδιαφερομένου, μπορεί να παραχωρεί τη χρήση θαλάσσιων και χερσαίων εκτάσεων, για τις οποίες έχει εκδοθεί βεβαίωση περί επιτρεπτού της χωροθέτησης του Πιλοτικού Θαλάσσιου Πλωτού Φωτοβολταϊκού Σταθμού (Π.Θ.Π.Φ.Σ.), για την εγκατάσταση και λειτουργία Π.Θ.Π.Φ.Σ., για χρονικό διάστημα είκοσι δύο ετών. Η παραχώρηση χρήσης για την εκτέλεση έργων επί του αιγιαλού και του παρακείμενου θαλάσσιου χώρου πραγματοποιείται, σύμφωνα με το άρθρο 14 του ν. 2971/2001 (Α' 285), χωρίς να εφαρμόζεται η παρ. 7 αυτού. Όσον αφορά στα απαιτούμενα δικαιολογητικά της παρ. 6 του ίδιου άρθρου, ο ενδιαφερόμενος, αντί της απόφασης έγκρισης περιβαλλοντικών όρων του έργου, σύμφωνα με τον Ν.4014/2011 (Α' 209), ή της απόφασης έγκρισης υπαγωγής σε καθεστώς Πρότυπων Περιβαλλοντικών Δεσμεύσεων του ιδίου νόμου, υποβάλλει τη βεβαίωση περί επιτρεπτού της χωροθέτησης και αντί της έγκρισης ή γνωστοποίησης της αρμόδιας αρχής για την ίδρυση ή εγκατάσταση της επιχείρησης, υποβάλλει την ενιαία άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας. Η παραχώρηση χρήσης του αιγιαλού, του υδάτινου στοιχείου και του πυθμένα του θαλάσσιου χώρου, πραγματοποιείται με απόφαση του Υπουργού Οικονομικών κατά τη διαδικασία που προβλέπεται στον ν. 2971/2001, εντός τριών μηνών από την έκδοση της ενιαίας άδειας εγκατάστασης και λειτουργίας, κατόπιν αιτήματος του ενδιαφερομένου. Πέρα από την περίπτωση όπου ο ενδιαφερόμενος μισθώσει χερσαία έκταση που δεν ανήκει στο Δημόσιο, οι χερσαίες εκτάσεις που μπορεί να παραχωρηθούν, είναι οι εκτάσεις που ανήκουν στην κυριότητα του Ελληνικού Δημοσίου, οι δημοτικές γαίες με τη σύμφωνη γνώμη του αρμόδιου Ο.Τ.Α. α' βαθμού, καθώς και οι δασικές εκτάσεις και τα ακίνητα που διαχειρίζεται το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, σύμφωνα με τον ν. 4061/2012 (Α' 66).

- **Υποχρεώσεις κατόχων Π.Θ.Π.Φ.Σ**

Οι κάτοχοι των Πιλοτικών Θαλάσσιων Πλωτών Φωτοβολταϊκών Σταθμών (Π.Θ.Π.Φ.Σ.) έχουν υποχρέωση να υποβάλλουν, μέχρι την 31η Μαρτίου κάθε έτους, μετά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης, Τεχνική Έκθεση Λειτουργίας στη Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών και Εναλλακτικών Καυσίμων και στη Διεύθυνση Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, καθώς και στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.). Στην έκθεση αυτή περιέχονται τα δεδομένα που προκύπτουν από την πιλοτική λειτουργία των σταθμών, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τυχόν προβλήματα λειτουργίας. Το Κ.Α.Π.Ε., εντός τεσσάρων (4) μηνών από την υποβολή κάθε Τεχνικής Έκθεσης Λειτουργίας, υποβάλλει έκθεση προς το Υπουργείο

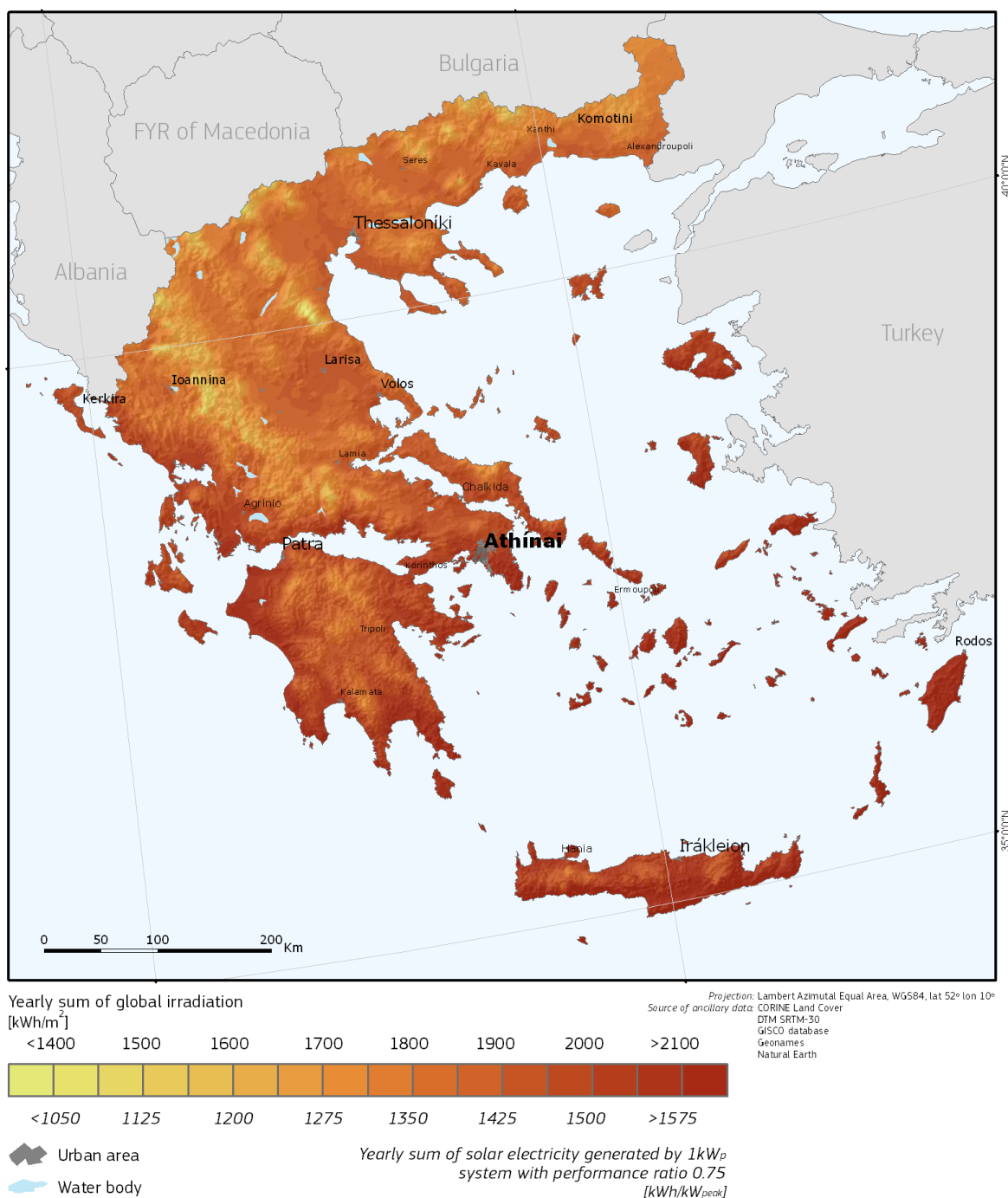
Περιβάλλοντος και Ενέργειας, στην οποία αναλύονται και συνοψίζονται τα δεδομένα της Έκθεσης. Η Έκθεση περιλαμβάνει και τυχόν προτάσεις για την προώθηση της τεχνολογίας σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Το 2023 με απόφαση του υπουργείου περιβάλλοντος και ενέργειας (ΦΕΚ 3940/2023) αποφασίστηκε η προσθήκη της κατηγορίας: «Ηλιακή Ενέργεια που αξιοποιείται με Πιλοτικούς Θαλάσσιους Πλωτούς Φωτοβολταϊκούς Σταθμούς (Π.Θ.Π.Φ.Σ.) του ν. 4951/2022» στο καθεστώς στήριξης σταθμών ΑΠΕ του ν4414/2016 (Α 149) , με την τιμή αναφοράς να ορίζεται στα 159 €/MWh.

5.3 Προοπτικές για την Ελλάδα

Οι υπεράκτιες πλωτές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι μια ενδιαφέρουσα τεχνολογία που μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη στην Ελλάδα, ιδίως λαμβάνοντας υπόψη την έντονη ηλιοφάνεια, και την μεγάλη σε μήκος ακτογραμμή. Αν και δεν υπάρχουν ακόμα υπεράκτιες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπάρχουν αρκετές προοπτικές για την ανάπτυξη τους:

- Εκμετάλλευση της ηλιοφάνειας. Η Ελλάδα δέχεται υψηλό επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους λόγω της γεωγραφικής της θέσης και του μεσογειακού της κλίματος, όπου κατά μέσο όρο ανέρχεται ετησίως περίπου από 1600 έως 2000 κιλοβατώρες ανά τετραγωνικό μέτρο (kWh/m^2). Το επίπεδο αυτό ηλιακής ακτινοβολίας θεωρείται αρκετά υψηλό και καθιστά την Ελλάδα μια ευνοϊκή τοποθεσία για την παραγωγή και αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα στοιχεία αυτά είναι μεσοί όροι και τα πραγματικά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με παράγοντες όπως το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, τα τοπικά καιρικά φαινόμενα του εδάφους. Οι εξελίξεις στην ηλιακή τεχνολογία και τις πρακτικές εγκατάστασης μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητα της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα.
- Αξιοποίηση του θαλάσσιου χώρου. Η Ελλάδα διαθέτει έναν μεγάλο ανοικτό θαλάσσιο χώρο όπου η ακτογραμμή της, αν και δεν υπάρχει ακριβής μέτρηση εξαιτίας της πολυπλοκότητας λόγω των πολλών νησιών εκτιμάται στα 13.676 χιλιόμετρα, περιλαμβάνοντας τις ακτές του κεντρικού Σαρωνικού κόλπου, του Ιονίου, του Αιγαίου πελάγους, καθώς και τις ακτές των νησιών.



Εικόνα 5-1: Παγκόσμια ακτινοβολία και δυναμικό ηλιακής ενέργειας(PVGIS,2019)

- Αξιοποίηση και συνεργασία με άλλες υπεράκτιες βιομηχανίες. Η Ελλάδα διαθέτει πληθώρα βιομηχανιών οι οποίες δραστηριοποιούνται τόσο παράκτια όσο και υπεράκτια. Συνεργασίες όπως, α) στην βιομηχανία της ιχθυοκαλλιέργειας όπου οι περισσότερες εγκαταστάσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα, τα πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι κατάλληλα να τοποθετηθούν κοντά στις ιχθυοκαλλιέργειες καθώς τα περισσότερα συστήματα αποτελούνται από μια πλωτή κατασκευή η οποία είναι αγκυρωμένη στον πυθμένα της θάλασσας, η οποία θα μπορούσε να ενσωματωθεί στο σύστημα της ιχθυοκαλλιέργειας και να τροφοδοτήσει

με ενέργεια τις υποδομές της. β) στη βιομηχανία αφαλάτωσης νερού, όπου η αντίστροφη όσμωση είναι η κυρίαρχη διαδικασία αφαλάτωσης νερού, η οποία είναι μια πολύ ενεργοβόρα διαδικασία καθώς το 36% των λειτουργικών εξόδων σε μια μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας (LiVecchi,2019). Τα παράκτια πλωτά ΦΒ μπορούν επίσης να προσφέρουν λύσεις σε παράκτιες περιοχές που δεν διαθέτουν αξιόπιστο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και αξιόπιστη παροχή πόσιμου νερού. Η αφαλάτωσή του θαλασσινού νερού με τη χρήση Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών και της αιολικής ενέργειας μπορεί να ενισχύσει περεταίρω τη βιώσιμη γαλάζια οικονομία.

6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Τα πλωτά φωτοβολταϊκά (παράκτια - υπεράκτια) είναι μια τεχνολογία με σημαντικές δυνατότητες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά βρίσκεται ακόμα σε σχετικά πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Οι προκλήσεις για να φτάσει σε μια κατάσταση ανάπτυξης που θα είναι ανταγωνιστική από άποψη κόστους, ενεργειακής απόδοσης και αξιοπιστίας σε σχέση με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μεγάλες. Τα επίγεια φωτοβολταϊκά συστήματα είναι δοκιμασμένη τεχνολογία και τα πλωτά ΦΒ σε λίμνες και ταμειυτήρες κερδίζουν όλο ένα και περισσότερο έδαφος. Το ισοσταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας (LCOE) για τα πλωτά ΦΒ συστήματα σε λιμνάζοντα νερά είναι περίπου 10% υψηλότερο από τα επίγεια ΦΒ συστήματα. Ωστόσο η μετάβαση στα παράκτια - υπεράκτια συστήματα έχει προκλήσεις οι οποίες πρέπει να ξεπεραστούν, με τις σημαντικότερες να είναι:

1. Μείωση του Ισοσταθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE), το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μείωση των κεφαλαιουχικών (CAPEX) και λειτουργικών δαπανών (OPEX), αύξηση της διάρκειας ζωής του συστήματος.
2. Μείωση του ρίσκου, με σειρά μέτρων ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα αστοχιών, η υποβάθμιση των εξαρτημάτων και να ενισχυθεί η κοινωνική αποδοχή. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν:
 - Μετριασμός αποτυχίας: Εφαρμογή ισχυρών αρχών σχεδιασμού, αυστηρών πρωτοκόλλων δοκιμών και τακτικών προγραμμάτων συντήρησης για την αποφυγή βλαβών του συστήματος και αστοχιών των εξαρτημάτων.
 - Μακροζωία συστήματος και εξαρτημάτων: Χρήση υλικών υψηλής ποιότητας, χρήση προηγμένων τεχνικών μηχανικής και διεξαγωγή συνεχούς παρακολούθησης και συντήρησης για την παράταση της διάρκειας ζωής και της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων.
 - Κοινωνική αποδοχή: Αλληλεπίδραση με τα ενδιαφερόμενα μέρη μέσω επικοινωνίας, επίδειξης των πλεονεκτημάτων και ασφάλειας του συστήματος.

Τέσσερα διαφορετικά συστήματα πλωτών ΦΒ βρίσκονται επί του παρόντος υπό ανάπτυξη (σύστημα: Pontoon, Truss, Fish Farm, Soft&Flex). Για κάθε σύστημα μια ή και περισσότερες εταιρείες στην Ευρώπη αναπτύσσουν πρωτότυπα, τα οποία έχουν από χαμηλό έως μεσαίο επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL 4-5). Σε αυτό το στάδιο είναι δύσκολο να γίνουν προβλέψεις σχετικά με την μελλοντική επιτυχία των συστημάτων αυτών στην αγορά καθώς πληροφορίες σχετικά με τεχνικές και οικονομικές λεπτομέρειες είναι περιορισμένες, παρόλα αυτά προβλέπεται ότι η εξέλιξη διαφόρων νέων πλωτών ΦΒ συστημάτων θα συνεχιστεί και τα επόμενα χρόνια.

Η ανάπτυξη πλωτών ΦΒ συστημάτων για θαλάσσια περιβάλλοντα είναι πολύπλοκο εγχείρημα κυρίως λόγω των δύσκολων περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν και του αλμυρού νερού. Η εύρεση μιας ισορροπίας μεταξύ ενός συστήματος που μπορεί να επιβιώσει σε ακραίες συνθήκες και παράλληλα να διασφαλίζεται η επεκτασιμότητα του σε ένα σύστημα πολλών Mw, είναι υψίστης σημασίας.

Η έλλειψη προτύπων που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα στον σχεδιασμό των συστημάτων αυτών μπορεί να θεωρηθεί ως ανασταλτικός παράγοντας για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, καθώς η προσέλκυση επενδύσεων είναι δυσκολότερη, εάν οι επενδυτές δεν διασφαλίσουν ότι τα συστήματά αυτά έχουν σχεδιαστεί με ασφάλεια και θα λειτουργούν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Ωστόσο η χρήση προτύπων από πιο ώριμους τομείς όπως ο τομέας πετρελαίου, αερίου, και ο τομέας των θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. υπεράκτιες ανεμογεννήτριες), μπορεί να

διασφαλίσει ότι τα συστήματα αυτά σχεδιάζονται να λειτουργούν με ασφάλεια καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους και να επιβιώνουν σε ακραίες καιρικές συνθήκες.

Έως σήμερα, ακόμη και σε χώρες με σημαντική ανάπτυξη των πλωτών θαλάσσιων ΦΒ συστημάτων, δεν υπάρχουν σαφείς, ειδικοί κανονισμοί και νομικό πλαίσιο για την αδειοδότηση των εγκαταστάσεων αυτών. Οι διαδικασίες προς το παρόν θεωρούνται ίδιες με εκείνες για τα επίγεια φωτοβολταϊκά συστήματα που ισχύουν σε κάθε χώρα. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο αρκετά πιλοτικά προγράμματα έχουν ανακοινωθεί, κυρίως στην Ολλανδία και την Νορβηγία με σκοπό να δοκιμαστεί η τεχνολογία. Η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις πρώτες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που έδειξαν ενδιαφέρον για την υπεράκτια πλωτή ΦΒ τεχνολογία, εντάσσοντας στο ΦΕΚ 4951/2022 του Υπουργείου περιβάλλοντος και ενέργειας, το πλαίσιο ανάπτυξης «Πιλοτικών Θαλάσσιων Πλωτών ΦΒ Σταθμών (Π.Θ.Π.Φ.Σ.)». Στο πιλοτικό αυτό στάδιο το ΥΠΕΝ επιτρέπει τη χωροθέτηση, αδειοδότηση, εγκατάσταση και λειτουργία μέχρι 10 Π.Θ.Π.Φ.Σ. ισχύος έως 1MW το κάθε ένα ενώ υπάρχουν και προβλέψεις για ενιαία έργα με παραχώρηση και χερσαίων εκτάσεων στον αιγιαλό και την παραλία. Το Παραπάνω νομοσχέδιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα θετικό πρώτο βήμα για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου νομικού πλαισίου για την αδειοδότηση αυτών των συστημάτων. Οι συνεργασίες με άλλους τομείς της βιομηχανίας και τις ενέργειας που δραστηριοποιούνται σε παράκτια ή υπεράκτια περιβάλλοντα όπως η βιομηχανία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, η βιομηχανία της ιχθυοκαλλιέργειας, η βιομηχανία αφαλάτωσης, και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, μπορεί να αποτελέσουν ευκαιρίες για αμοιβαίο όφελος και βελτίωση της αποδοτικότητας και βιωσιμότητας των δραστηριοτήτων τους.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

7.1 Βιβλία- Επιστημονικά Άρθρα

- [1] Fraunhofer, Institute for Solar Energy Systems, “Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies”, June 2021
- [2] Ramasamy, Vignesh and Robert Margolis, “Floating Photovoltaic System Cost”, 2021 Benchmark: Q1 2021 Installations on Artificial Water Bodies. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-7A40-80695
- [3] Oliveira-Pinto S and Stokkermans J, “Marine floating solar plants: an overview of potential, challenges and feasibility”, 2020, <https://doi.org/10.1680/jmaen.2020.10>
- [4] Golroodbari SZ, van Sark W, “Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems”. Prog Photovolt Res Appl, 2020, <https://doi.org/10.1002/pip.3276>
- [5] Vagiona, D.G Tzekakis, G, Loukogeorgaki, E. Karanikolas, “Site Selection of Offshore Solar Farm Deployment in the Aegean Sea”, 2022, <https://doi.org/10.3390/>
- [6] Vo, T.T.E., Ko, H. Huh, J. Park, “Overview of Possibilities of Solar Floating Photovoltaic Systems in the Offshore Industry”, Energies 2021, <https://doi.org/10.3390/en14216988>
- [7] Petrini, F, Hui, Li, Bontempi, F, “Basis of design and numerical modeling of offshore wind turbines”, 2010, DOI: 10.12989/sem.2010.36.5.599
- [8] Ghigo, A. Faraggiana, E. Sirigu, M. Mattiazzo, G. Bracco, “Design and Analysis of a Floating Photovoltaic System for Offshore Installation: The Case Study of Lampedusa.”, Energies 2022, <https://doi.org/10.3390/en15238804>
- [9] Subrata K. Chakrabarti, “Offshore Structure Analysis”, Elsevier 2005, Volume 1
- [10] Subrata K. Chakrabarti, “Offshore Structure Analysis”, Elsevier 2005, Volume 2
- [11] Dirk C. Jordan, “Photovoltaic Failure and Degradation Modes”, Wiley online library 2017, DOI: 10.1002/pip.2866
- [12] Alok Sahu, Neha Yadav, K. Sudhakar. “Floating Photovoltaic Power Plant: A review”, Elsevier 2016
- [13] K. Trapani, D.L. Millar, “Hydrodynamic Overview of Flexible Floating Thin Film PV Arrays”, 2016
- [14] Rosa-Clot, M, Tina, M, “Floating PV Plants”, 2020, <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01890-3>
- [15] IRENA, “Fostering a blue economy: Offshore renewable energy”, International Renewable Energy Agency, 2020, Abu Dhabi
- [16] IRENA, “Innovation outlook: Ocean energy technologies”, International Renewable Energy Agency, 2020, Abu Dhabi

- [17] IRENA, “Renewable Power Generation Costs in 2020”, International Renewable Energy Agency, 2021, Abu Dhabi
- [18] IRENA, “Offshore renewables: An action agenda for deployment”, International Renewable Energy Agency, 2021, Abu Dhabi
- [19] E. van Druten, K. Kruit, “Electricity from Water: National Potentials for 2030 and 2050”, Witteveen+Bos, CE Delft, 2021
- [20] World Bank Group, ESMAP and SERIS, “Where Sun Meets Water: Floating Solar Market” Report. Washington, DC: World Bank, 2019
- [21] Previsic.M, Chozas.J, “International Levelised Cost of Energy for Ocean Energy Technologies”, IEA, 2015, DOI:10.13140/RG.2.2.34304.38407
- [22] EU-SCORES, “LCOE Analysis for Baseline Project Scenarios”, D7.9, Version 3, 2022
- [23] Soppe.W, Kingma.A, Hoogeland.M, Brink.R, Kroon.J, Folkerts.W, “Challenges and Potential for Offshore Solar”, TNO, 2022
- [24] Daroen.I, “Risk Assessment of Offshore Floating PV Systems”, TU Delft, 2021
- [25] LiVecchi. A, “Powering the Blue Economy: Exploring Opportunities for Marine Renewable Energy in Maritime Markets”. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2019 Washington, D.C.

7.2 Ηλεκτρονικές Πηγές/ Ιστοσελίδες

- [1] European Commission, [Delivering the European Green Deal - European Commission \(europa.eu\)](https://european-council.europa.eu/media/e3b0c1de-4281-4780-8966-4c3a112a1f44/p128841_en.pdf)
- [2] Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, [BMWK - 7th Energy Research Programme of the Federal Government](https://www.bmwi.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/07/bmwk-7th-energy-research-programme-of-the-federal-government.html)
- [3] Blue Energy, [Renewable energy solutions - Bluewater Energy Services](https://www.blue-energy.com/en/renewable-energy-solutions)
- [4] SINN Power, [SINN Power | Erneuerbare Energie](https://www.sinn-power.com/en/erneuerbare-energie)
- [5] Solar Duck, [Merganser Pilot • SolarDuck](https://www.solar-duck.com/en/merganser-pilot)
- [6] Swimsol, [Floating Solar PV for the Sea - SolarSea. Rooftop solar for islands \(swimsol.com\)](https://www.swimsol.com/en/floating-solar-pv-for-the-sea)
- [7] Oceans Of Energy, [North Sea 3 - Oceans of Energy](https://www.oceansofenergy.com/en/north-sea-3)

- [8] Ocean Sun, [Ocean Sun | Towards a clean energy future](#)

7.3 Νομοθεσίες

- [1] Νόμος 4951/2022, ΦΕΚ 129/Α 4.7.2022 (Μέρος Δ) “Πλαίσιο Ανάπτυξης Πιλοτικών Θαλάσσιων Πλωτών Φωτοβολταϊκών Σταθμών”