

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής από την ενέργεια των
κυμάτων"



Της φοιτήτριας :
Ιωαννίδου Σοφίας
Αρ. Μητρώου: 516034

Επιβλέπων:
Ονοματεπώνυμο:
Κιοσκερίδης Ν. Ιορδάνης
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία 22-06-2022

Τίτλος Δ.Ε. Διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής από την ενέργεια των κυμάτων

Κωδικός Δ.Ε. [22171](#)

Όνοματεπώνυμο φοιτήτριας: Ιωαννίδου Σοφία

Όνοματεπώνυμο εισηγητή : Ιορδάνης Ν. Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 20-03-2022

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 22-06-2022

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Ιωαννίδου Σοφία που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

«Στην οικογένεια μου που με στήριξε και με στηρίζει.»

Πρόλογος

Ο ωκεανός προσφέρει τεράστια ποσά ενέργειας που εδώ και πολλά χρόνια έμενε ανεκμετάλλευτη. Όμως κατά την διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης, δηλαδή πριν από περίπου πενήντα χρόνια γεννήθηκε η ανάγκη για φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια.[2] Στα μέσα λοιπόν της δεκαετίας του '70 ξεκίνησαν οι πρώτες έρευνες και δημοσιεύσεις μελετών με το Ηνωμένο Βασίλειο να είναι το πρώτο κράτος που παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας την δύναμη των θαλάσσιων και παλιρροϊκών κυμάτων ώστε να ηλεκτροδοτήσει το εθνικό του δίκτυο το έτος 2000 [19]. Λόγω των σημερινών συνθηκών με την ανατίμηση της βενζίνης και του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά και της οικολογικής κρίσης καθώς η Γη στερεύει από ορυκτά καύσιμα είναι εύλογο να στραφεί το βλέμμα όλων στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Όχι μόνο στις φωτοβολταϊκές διατάξεις και στις ανεμογεννήτριες οι οποίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες τις ώρες και όλες τις ημέρες του χρόνου καθώς εξαρτώνται από τα καιρικά φαινόμενα τα οποία δεν είναι σταθερά, αλλά και στη σχεδόν απεριόριστη ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων. Οι τεχνολογίες των διατάξεων ηλεκτροπαραγωγής από τα κύματα δεν είναι διαδεδομένες, όμως είναι πολλά υποσχόμενες, όπως περιγράφεται και στην παρούσα διπλωματική.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο ‘Διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής από την ενέργεια κυμάτων’ πραγματεύεται όπως προδίδει και ο τίτλος τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα. Αρχικά περιγράφεται η βασική αρχή της έννοιας του κύματος και τα χαρακτηριστικά του, καθώς και των θεωριών του Airy, του Stokes και άλλων, ώστε ως επόμενο βήμα της δημιουργίας διατάξεων ηλεκτροπαραγωγής να είναι η τοποθεσία τους. Δηλαδή είτε επί της ακτής, ή κοντά σε αυτή, είτε στα ανοικτά της θάλασσας, όπου το κυματικό δυναμικό βρίσκεται στο ζενίθ. Όλα τα παραπάνω λαμβάνονται υπόψη ως βασικοί παράμετροι για την επιλογή της τεχνολογίας για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας. Κύριοι πυλώνες θεωρούνται οι μετατροπείς ταλαντευόμενης υδάτινη στήλη OWC, οι συσκευές υπερύψωσης OTD και τα ταλαντευόμενα σώματα Oscillating Bodies. Μία απλή κατασκευή χωρίς εξοπλισμό ισχύος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάποιο τρόπο, οπότε η κάθε τεχνολογία απαιτεί και τα ανάλογα εξαρτήματα για την ‘επεξεργασία’ της κυματικής-κινητικής ενέργειας που προσλαμβάνεται από τις συσκευές και της μετατροπής της. Για ακόμη μία φορά η τοποθεσία και τα χαρακτηριστικά των θαλάσσιων κυμάτων έχουν καθοριστικό ρόλο σε συνδυασμό με τις συσκευές δέσμευσης της κυματικής ενέργειας για την επιλογή τουρμπινών, γεννητριών, ή συστημάτων άμεσης μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια, όπως για παράδειγμα των τουρμπινών αέρος, Wells, Kaplan, Denniss Auld, παλμικών τουρμπινών, των επαγωγικών μηχανών με βραχυκυκλωμένο κλωβό SCIG, σύγχρονων γεννητριών SG, σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη PMSG και γραμμικών γεννητριών μόνιμου μαγνήτη PLMG. Τέλος στην εν λόγω διπλωματική εργασία γίνεται προσομοίωση στο πρόγραμμα Simulink της διάταξης OWC με την χρήση της τουρμπίνας Wells και της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (PMSG) και παρατίθενται τα αποτελέσματα της.

"Power generating devices from wave energy"

"Ioannidou Sofia"

Abstract

In this thesis, entitled 'Power generating devices from wave energy' deals with the devices used to generate electricity from sea waves, as the title suggests. Initially described the knowledge of the wave theory, the theory of Airy, Stokes and others and its characteristics, so the next step in the creation of a power generation devices should be their location. The location can, either be on the coast, near it, or off shore, where the wave potential is maximum. All of the above are considered as key parameters for the selection of technology for the exploitation of wave energy. The main technologies are the oscillating water column converters OWC, the overtopping devices OTD and the oscillating bodies. A simple construction without power equipment cannot be used in any way, so each technology requires the appropriate components to 'process' the wave's kinetic energy which has been harvested by the devices and to convert her. Once again, the location and characteristics of sea waves play a key role combined with wave energy capture devices for the selection of turbines, generators, or direct electrical conversion systems to convert the captured energy into electricity, such as wind turbines, Wells, Kaplan, Denniss Auld, impulse turbines, Squirrel-cage induction generator SCIG, Synchronous Generator SG, Permanent magnet synchronous generator PMSG, Permanent magnet linear generator PMLG. Finally, in this thesis, the device which is simulated in Simulink is the Oscillating Water Column(OWC) with Wells turbine and a Permanent Synchronous Magnet Generator (PSMG) and its results are presented.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς όλους τους ανθρώπους που συνέβαλαν επιστημονικά, ηθικά και συναισθηματικά για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Πιο συγκεκριμένα τον καθηγητή μου και επιβλέπων κύριο Ιορδάνη Ν. Κιοσκερίδη για την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής και των φοιτητικών μου χρόνων και τέλος την οικογένεια μου για την ψυχολογική και οικονομική στήριξη σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Συνομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Γενικά για τις Α.Π.Ε. (=Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας)	1
1.3 Χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας παγκοσμίως	2
1.4 Επίλογος.....	4
Κεφάλαιο 2ο: Κύματα.....	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Τι είναι κύμα	5
2.2.1 Χαρακτηριστικά κύματος.....	5
2.2.2 Ταχύτητα και θεμελιώδης εξίσωση κυματικής	6
2.3 Παραγόμενη κυματική ενέργεια.....	7
2.3.1 Έργο- Ποσότητα Ενέργειας.....	7
2.3.2 Δυναμική Ενέργεια PE.....	8
2.3.3 Κινητική Ενέργεια KE.....	9
2.3.4 Ισχύς θαλάσσιου κύματος	9
2.4 Επίλογος.....	9
Κεφάλαιο 3ο: Θεωρίες κυμάτων	10
3.1 Εισαγωγή.....	10
3.2 Η Θεωρία του Airy.....	11
3.3 Η Θεωρία του Stokes	12
3.4 Διεργασίες τροποποίησης χαρακτηριστικών κύματος	13
3.4.1 Ανάκλαση Κύματος -WaveReflection	13
3.4.2 Διάθλαση Κύματος-WaveRefraction	13
3.4.3 Περίθλαση κύματος- Wave Diffraction	14

3.4.4	Θραύση κυμάτων.....	14
3.5	Επίλογος.....	15
Κεφάλαιο 4ο:	Τεχνολογίες εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.....	16
4.1	Εισαγωγή.....	16
4.2	Κατηγορίες Θέσεων και Τύπων εφαρμογής.....	16
4.2.1	Τύποι κυμάτων με βάση την κατεύθυνση του ανέμου.....	17
4.2.2	Κατηγοριοποίηση διατάξεων με βάση την απόσταση από την ακτή.....	17
4.3	Κατηγορίες διατάξεων με βάση την αρχή λειτουργίας τους.....	18
4.3.1	Μετατροπείας Ταλαντευόμενη Υδάτινη Στήλη-OWC.....	19
4.3.2	Μετατροπείας Συσκευές υπερύψωσης -Overtopping devices-OTD.....	21
4.3.3	Μετατροπείας Σημειακός Απορροφητής- Point absorber.....	22
4.3.4	Μετατροπείας Εξασθενητής –Attenuator.....	24
4.4	Επίλογος.....	25
Κεφάλαιο 5ο:	Κατηγορίες εξοπλισμού ισχύος.....	26
5.1	Εισαγωγή.....	26
5.2	Συσκευές ΡΤΟ.....	26
5.2.1	Τουρμπίνα αέρος.....	27
5.2.2	Τουρμπίνα Wells.....	28
5.2.3	Παλμική Τουρμπίνα (Impulse Turbine).....	29
5.2.4	Τουρμπίνα Denniss-Auld.....	29
5.2.5	Υδραυλικά Συστήματα.....	30
5.2.6	Τουρμπίνα Kaplan.....	31
5.3	Συσκευές ΡΤΟ άμεσης μετατροπής κίνησης.....	32
5.3.1	Επαγωγική μηχανή με βραχυκυκλωμένο κλωβό (SCIG).....	32
5.3.2	Σύγχρονη Γεννήτρια (SG).....	33
5.3.3	Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PMSG).....	34
5.3.4	Γραμμική Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PLMG).....	35
5.4	Επίλογος.....	36
Κεφάλαιο 6ο:	Έλεγχος συστημάτων ΡΤΟ.....	37
6.1	Εισαγωγή.....	37
6.2	Άμεσα Ελεγχόμενοι Ανορθωτές- Directly controlled rectifiers.....	37
6.2.1	Συντελεστής Ισχύος- PF.....	37
6.2.1	Ανορθωτής πλάτους παλμού- PWM.....	38
6.3	Γέφυρα διόδου με ενισχυτή DC/DC.....	39
6.4	Μη Ελεγχόμενοι Ανορθωτές.....	40

6.5	Επίλογος.....	40
Κεφάλαιο 7ο: Προσομοίωση συστήματος OWC		41
7.1	Εισαγωγή.....	41
7.2	Θεωρητικές εξισώσεις για την τουρμπίνα Wells.....	41
7.3	Παράμετροι-στοιχεία για την προσομοίωση στο πρόγραμμα Simulink	42
7.4	Μοντέλο Συστήματος- Simulink.....	42
7.5	Μοντέλο τουρμπίνας Wells- Simulink.....	43
7.5.1	Σταθερή ταχύτητα ω_{t1} 2800rpm και πλάτος $dp_1=7000P_a$	44
7.5.2	Σταθερή ταχύτητα ω_{t2} 3000rpm και πλάτος $dp_2=12000P_a$	46
7.6	Μοντέλο Ηλεκτρογεννήτριας - Simulink.....	48
7.6.1	Προσομοίωση ολικού συστήματος με την ηλεκτρογεννήτρια $dp_{1.1}=7000Pa$	49
7.6.2	Προσομοίωση ολικού συστήματος με την ηλεκτρογεννήτρια $dp_{1.2}=12000Pa$	53
7.7	Επίλογος.....	56
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΗΓΕΣ ΠΙΝΑΚΩΝ & ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....		61

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως.....	2
Πίνακας 3.2: Μετασχηματισμοί της ταχύτητας και μήκους κύματος.....	11
Πίνακας 6.3: Προδιαγραφές Ανορθωτή.....	38
Πίνακας 6.4: Προδιαγραφές Ανορθωτή.....	39
Πίνακας 7.5: Παράμετροι για προσομοίωση τουρμπίνας Wells.....	43

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ποσοστά χρήσης ανανεώσιμων πηγών ως ενέργεια.....	3
Σχήμα 1.2: Ποσοστά χρήσης πηγών για ηλεκτρική ενέργεια.....	4
Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστικά κύματος.....	6
Σχήμα 2.2: Ποσότητα ενέργειας ανά τύπο κύματος.....	8
Σχήμα 3.1: Κύματα Stokes.....	12
Σχήμα 3.2: Ανάκλαση κύματος.....	13
Σχήμα 3.3: Περίθλαση κύματος- Wave Diffraction.....	14
Σχήμα 4.1: Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών.....	17
Σχήμα 4.2: Ταλαντευόμενη στήλη νερού -OWC.....	17
Σχήμα 4.3: Συσκευή υπερύψωσης- OTD.....	19
Σχήμα 4.4: -i- Σημειακοί Απορροφητές, -ii- Σημειακός Απορροφητής με γραμμική γεννήτρια.....	20
Σχήμα 4.5: Εξασθενητής- Attenuator.....	21
Σχήμα 4.6: Εσωτερικό τμήμα εξασθενητή- PCM.....	21
Σχήμα 4.7: Μέθοδοι μετατροπής κυματικής ενέργειας με PTO.....	22
Σχήμα 4.8: Τουρμπίνα αέρος.....	22
Σχήμα 4.9: Τουρμπίνα Wells και προφίλ πτερυγίου.....	23
Σχήμα 4.10: Παλμική τουρμπίνα.....	24
Σχήμα 4.11: Τουρμπίνα Denniss-Auld.....	25
Σχήμα 4.12: Παράδειγμα υδραυλικού συστήματος.....	25
Σχήμα 4.13: Τουρμπίνα Kaplan.....	29
Σχήμα 5.1 : Εξαρθήματα επαγωγικής μηχανής βραχυκυκλωμένου κλωβού.....	30
Σχήμα 5.2 : Σύγχρονη γεννήτρια -i- Δύο πόλων, -ii- Τεσσάρων πόλων.....	31
Σχήμα 5.3: Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PMSG).....	32
Σχήμα 5.4: Γραμμική γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. (PLMG).....	32
Σχήμα 6.1: Ανορθωτής πλάτους παλμού- PWM.....	38
Σχήμα 6.2: Γέφυρα διόδου με ενισχυτή DC/DC.....	39
Σχήμα 7.1: Μοντέλο Simulink.....	42
Σχήμα 7.2: Μοντέλο τουρμπίνας Wells- Simulink.....	43
Σχήμα 7.3: Πτώση πίεσης τουρμπίνας Wells, $dp_1(\text{Pa})\text{-Time(s)}$	44
Σχήμα 7.4: Συντελεστής ροής τουρμπίνας Wells $\varphi_1\text{-Time(s)}$	44
Σχήμα 7.5: Ροπή τουρμπίνας Wells $T_{11}\text{- Time(s)}$	44
Σχήμα 7.6: Παραγόμενη ισχύς τουρμπίνας Wells $P_{11}(\text{Watt})\text{- Time(s)}$	45
Σχήμα 7.7: Πτώση πίεσης τουρμπίνας Wells, $dp_2(\text{Pa})\text{-Time(s)}$	46
Σχήμα 7.8: Συντελεστής ροής τουρμπίνας Wells $\varphi_2\text{-Time(s)}$	46

Σχήμα 7.9: Ροπή τουρμπίνας Wells T_{t2} -Time(s)	46
Σχήμα 7.10: Παραγόμενη ισχύς τουρμπίνας Wells P_{t2} (Watt)- Time(s)	47
Σχήμα 7.11: Πεδίο μετρήσεων-Simulink	48
Σχήμα 7.12: Παράμετροι ηλεκτρογεννήτριας- Simulink	48
Σχήμα 7.13: Ενεργός τιμή ρεύματος γεννήτριας 16Amp i_{s1} (Amp)-Time(s)	49
Σχήμα 7.14: Παραγόμενη τάση γεννήτριας 160V u_{s1} (V)-Time(s)	49
Σχήμα 7.15: Αριθμός στροφών γεννήτριας 1800rpm rpm-Time(s)	50
Σχήμα 7.16: Ροπή τουρμπίνας T_t - Ροπή γεννήτριας T_e για $dp=7000Pa$	50
Σχήμα 7.17: Τριφασικά ρεύματα συστήματος για $dp=7000Pa$	51
Σχήμα 7.18: Πτώση πίεσης τουρμπίνας ως σύνολο του συστήματος dp (Pa)-Time(s) για $dp=7000Pa$..	51
Σχήμα 7.19: Συντελεστής ροής τουρμπίνας $\phi_{1.1}$ στο συνολικό σύστημα ϕ -Time(s) για $dp=7000Pa$..	52
Σχήμα 7.20: Ροπή τουρμπίνας $T_{t1.1}$ στο συνολικό σύστημα T (Nm)-Time(s)	52
Σχήμα 7.21: Ισχύς τουρμπίνας $P_{t1.1}$ στο συνολικό σύστημα για $dp=7000Pa$	52
Σχήμα 7.22: Ενεργός τιμή ρεύματος γεννήτριας 37Amp i_{s2} (Amp)-Time(s)	53
Σχήμα 7.23: Παραγόμενη τάση γεννήτριας 188V u_{s2} (V)-Time(s)	53
Σχήμα 7.24: Αριθμός στροφών γεννήτριας 2250rpm rpm-Time(s)	53
Σχήμα 7.25: Ροπή τουρμπίνας T_t - Ροπή γεννήτριας T_e T (Nm)-Time(s)για $dp=12000Pa$	54
Σχήμα 7.26: Τριφασικά ρεύματα συστήματος για $dp=12000Pa$	54
Σχήμα 7.27: Πτώση πίεσης τουρμπίνας ως σύνολο του συστήματος dp (Pa)-Time(s) για $dp=12000Pa$..	55
Σχήμα 7.28: Συντελεστής ροής τουρμπίνας $\phi_{1.2}$ στο συνολικό σύστημα ϕ -Time(s) για $dp=12000Pa$..	55
Σχήμα 7.29: Ροπή τουρμπίνας $T_{t1.2}$ στο συνολικό σύστημα T (Nm)-Time(s)	55
Σχήμα 7.30: Ισχύς τουρμπίνας $P_{t1.2}$ στο συνολικό σύστημα για $dp=12000Pa$	56

Συντομογραφίες

χλμ	χιλιόμετρα
A.Π.Ε.	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
TWh	TerraWatthours
WEC	Wave energy converter
OWC	Oscillating Water Column
OTD	Over Topping Devices
PTO	Power Take-off device
SCIG	Squirrel-cage induction generator
DFIG	Brushless doubly-fed induction generator
SG	Synchronous Generator
PMSG	Permanent magnet synchronous generator
PMLG	Permanent magnet linear generator
PF	Power factor
PWM	Pulse Width Modulated

Κεφάλαιο 1ο: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.1 Εισαγωγή

Η ανθρωπότητα τα τελευταία χρόνια πέραν της οικονομικής και υγειονομικής κρίσης, έχει έρθει αντιμέτωπη με μία ακόμη κρίση. Αυτή της κλιματικής αλλαγής. Ύστερα από πολλές αλληπάλληλες εξορύξεις ορυκτών για την παραγωγή ηλεκτρισμού -ηλεκτρικής ενέργειας-, την μη ανακύκλωση των ήδη υπάρχοντων ειδών και την σπατάλη του νερού, οι άνθρωποι έχουν πάρει μία γεύση από την (εκδίκηση της γης προς αυτούς) καθώς οι πόροι στερεύουν, οι κλιματικές ζώνες μεταβάλλονται ανά 100-200 χλμ. προς τον Βορρά για κάθε 1 βαθμό Κελσίου που αυξάνεται η θερμοκρασία του πλανήτη[1] και οι καιρικές συνθήκες έχουν επιδεινωθεί. Ισχυρότεροι άνεμοι, υψηλότερες θερμοκρασίες που είναι υπεύθυνες για το λιώσιμο των τεράστιων όγκων πάγου με αποτέλεσμα αύξηση της στάθμης της θάλασσας, υπερχειλίση των ποταμών προκαλώντας πλημμύρες στις γύρω περιοχές κατοικήσιμες και μη.

Δεδομένων των συνθηκών αυτών, οι επιστήμονες έκριναν αναγκαίο να καταφύγουν σε εναλλακτικές βιώσιμες για το περιβάλλον τεχνολογίες για την παραγωγή ενέργειας ώστε να επιτευχθεί ουδέτερο ή έστω να μειωθεί το ισοζύγιο του Άνθρακα καθώς είναι ο πρωταρχικός παράγοντας για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και όλων των παραπάνω.

1.2 Γενικά για τις Α.Π.Ε. (=Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας)

Απ' αρχαιοτάτων χρόνων ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε Α.Π.Ε. για την κάλυψη των αναγκών του, όπως την καύση βιομάζας (ξύλων, φύλλων, κλπ.) για θερμότητα, αργότερα χρησιμοποιούσε την ορμή του νερού (συνήθως των ποταμών) ως κινητήρια δύναμη των μύλων για να αλέθει σιτάρι[3]. Με την πάροδο των χρόνων οι ανάγκες του μεγαλώνουν, όμως οι πόροι που χρησιμοποιεί έχουν αρχίσει να στερεύουν.

Ύστερα από μελέτες κατέληξαν ότι οι Α.Π.Ε. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας επιτυγχάνουν τον μηδενισμό των εκπομπών του διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂) αποκαλώντας τις πηγές καθαρής ενέργειας. Οι πηγές αυτές βρίσκονται σε αφθονία στον πλανήτη, ανάλογα φυσικά με τον γεωγραφικό τόπο στον οποίο βρίσκονται και μπορούν να αξιοποιηθούν. Υπάρχουν διάφορες μορφές Ανανεώσιμων πηγών με τις δημοφιλέστερες να είναι:

- i. Ο ήλιος. Η Ηλιακή Ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί με δύο τρόπους. Είτε με θερμικές εφαρμογές, δηλαδή την συλλογή της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας για παράδειγμα ηλιακοί θερμοσίφωνες, είτε ως φωτοβολταϊκές εφαρμογές για την παραγωγή ηλεκτρισμού με την χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών. Για τον δεύτερο τρόπο που αφορά περισσότερο την συγκεκριμένη εργασία είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη η θέση του ηλίου για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών μονάδων για την πρόσληψη μεγαλύτερης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς αυτή πρέπει να βρίσκεται κάθετα στις επιφάνειες συλλογής. Όμως η χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι αρκετά περιορισμένη καθώς το κόστος θεωρείται μεγάλο και δεν υπάρχουν οι απαραίτητες επιδοτήσεις με αποτέλεσμα μόλις το 0,1% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών να μπορεί να καλυφθεί. [4]
- ii. Ο άνεμος. Η Αιολική Ενέργεια όπως και η ηλιακή αποτελούν πηγές ενέργειας των οποίων η μετατροπή σε ηλεκτρισμό είναι προσιτές ως προς το κόστος. Πρόκειται για μεγάλες και ψηλές εγκαταστάσεις αποτελούμενες από τα πτερύγια (δρομέας) για την πρόσληψη και μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική και της ηλεκτρογεννήτριας η οποία μετατρέπει την μηχανική σε ηλεκτρική. Το ποσοστό απόδοσης εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό και τον σωστό

σχεδιασμό του δρομέα. Ένα από τα μειονεκτήματα τους είναι ότι προκαλούν αρκετό θόρυβο και είναι δύσκολο να τοποθετηθούν σε κατοικημένες περιοχές.[4]

Λιγότερο γνωστές αλλά εξίσου σημαντικές είναι:

iii. Ο κύκλος του νερού. Μέσω της υδατόπτωσης και την χρήση υδροηλεκτρικών έργων το νερό έχοντας δυναμική ενέργεια γυρίζει υδραυλικές τουρμπίνες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ισχύ 3.060MW καλύπτοντας έτσι το 28% της συνολικής ισχύος συμβατικών σταθμών της ΔΕΗ.[5]

iv. Η ενέργεια από γεωθερμία. Η γεωθερμική ενέργεια αντλείται από την θερμότητα η οποία είναι αποθηκευμένη στο εσωτερικό της γης υπό την μορφή αερίων, ξηρών πετρωμάτων και στο μάγμα καθώς επίσης βρίσκεται και στα υπόγεια νερά με τις θερμοκρασίες να ξεπερνούν τους 1000°C και στον πυρήνα της γης να παρατηρείται θερμοκρασία μεγαλύτερη των 4000°C.[4]

v. Η ενέργεια από βιομάζα. Βιομάζα θεωρείται οποιαδήποτε οργανική ουσία (απόβλητα φυτικής, ζωικής προέλευσης κλπ.). Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται καθώς καίγεται η βιομάζα και ζεσταίνει μία δεξαμενή με νερό. Οι υδρατμοί κινούν μία τουρμπίνα η οποία είναι συνδεδεμένη με μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Παγκοσμίως, το 2017 είχαν παραχθεί 551TWh σημειώνοντας αύξηση 10% σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά.[6]

vi. Τέλος οι θάλασσες και οι ωκεανοί, από όπου μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την παλιρροϊκή ενέργεια, την ενέργεια των ωκεανών και την ενέργεια των κυμάτων που αποτελούν και το θέμα αυτής της διπλωματικής κι θα παρουσιαστεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο. Η φιλοσοφία είναι περίπου η ίδια με τις προηγούμενες. Η κινητική ενέργεια εξαιτίας του νερού περιστρέφει μία τουρμπίνα μετατρέποντας την σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μίας γεννήτριας και μεταφέρεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.[7]

1.3 Χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας παγκοσμίως

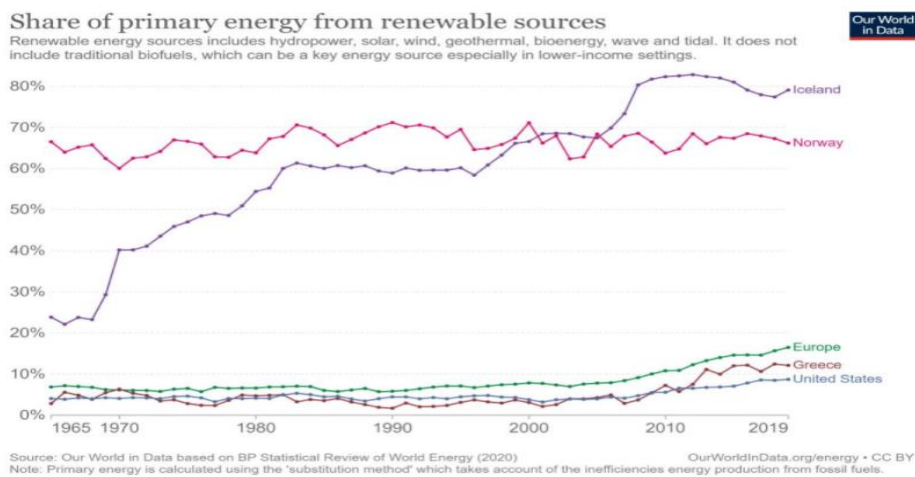
Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν οι χώρες με την μεγαλύτερη εκπομπή Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂) παγκοσμίως αλλά και οι χώρες που εκμεταλλεύονται τις ανανεώσιμες πηγές για ηλεκτροδότηση χρησιμοποιώντας στατιστικά στοιχεία και γραφήματα.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, στο διάστημα των εβδομήντα ετών (1950-2020) υπάρχει ραγδαία αύξηση με την Κίνα να κατέχει το υψηλότερο ποσοστό εκπομπών διοξειδίου του Άνθρακα ανάμεσα στις χώρες της Ευρώπης, των Ηνωμένων Πολιτειών και της Ασίας καθώς το 2020 σε όλη την Ήπειρο οι εκπομπές έφθασαν τους 20,32 δισεκατομμύρια τόνους και περίπου το μισό αφορούσε αποκλειστικά την Κίνα. Φυσικά οι εκπομπές του Διοξειδίου Άνθρακα δεν προέρχονται μόνο από τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα στην Αμερική μόνο το ποσοστό του 25% από τις συνολικές εκπομπές αφορά τον ηλεκτρισμό, σύμφωνα με μία μελέτη από το U.S. E.P.A.. [8]

Πίνακας 1.1 Ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως

Region	Annual CO ₂ emissions tonnes			
	1950	2020	Absolute Change	Relative Change
Asia	476.12 million t	20.32 billion t	+19.84 billion t	+4,167%
China	78.84 million t	10.67 billion t	+10.59 billion t	+13,432%
Asia (excl. China & India)	336.11 million t	7.21 billion t	+6.87 billion t	+2,044%
North America	2.74 billion t	5.78 billion t	+3.03 billion t	+110%
Europe	2.38 billion t	4.95 billion t	+2.56 billion t	+108%
United States	2.54 billion t	4.71 billion t	+2.17 billion t	+85%
EU-28	1.78 billion t	2.93 billion t	+1.15 billion t	+65%
EU-27	1.28 billion t	2.60 billion t	+1.32 billion t	+103%
India	61.18 million t	2.44 billion t	+2.38 billion t	+3,891%
Europe (excl. EU-27)	1.11 billion t	2.35 billion t	+1.24 billion t	+112%
Europe (excl. EU-28)	608.62 million t	2.02 billion t	+1.42 billion t	+233%
Russia	414.23 million t	1.58 billion t	+1.16 billion t	+281%
Africa	93.45 million t	1.33 billion t	+1.23 billion t	+1,319%

Στο Γράφημα 1 υπάρχουν σαν σύνολο οι χώρες, δηλαδή οι Ηπειροι της Αμερικής, της Ευρώπης και οι χώρες που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς την ανάπτυξη και ποσοστό χρήσης των Ανανεώσιμων πηγών, η Ισλανδία, η Νορβηγία και τέλος η Ελλάδα. Από το 1965 η Νορβηγία κρατά τα ηνία στην εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών προς όφελος της, όχι μόνο για ηλεκτροδότηση, με ποσοστό 66,5% μέχρι και το 2005, όπου η Ισλανδία με μία γρήγορη άνοδο ξεπέρασε κάθε άλλη χώρα έχοντας ποσοστό εκμετάλλευσης 82,83% το 2012. Έκτοτε παραμένει η μόνη χώρα με ποσοστό πάνω από 70% [9]. Ωστόσο η Ευρώπη έχει βάλει σαν στόχο την κλιματική ουδετερότητα μέχρι το έτος 2050 καθώς επίσης και την μείωση των επιβλαβών εκπομπών στο περιβάλλον κατά 55% μέχρι το 2030 συγκριτικά με το έτος 1990 [10].

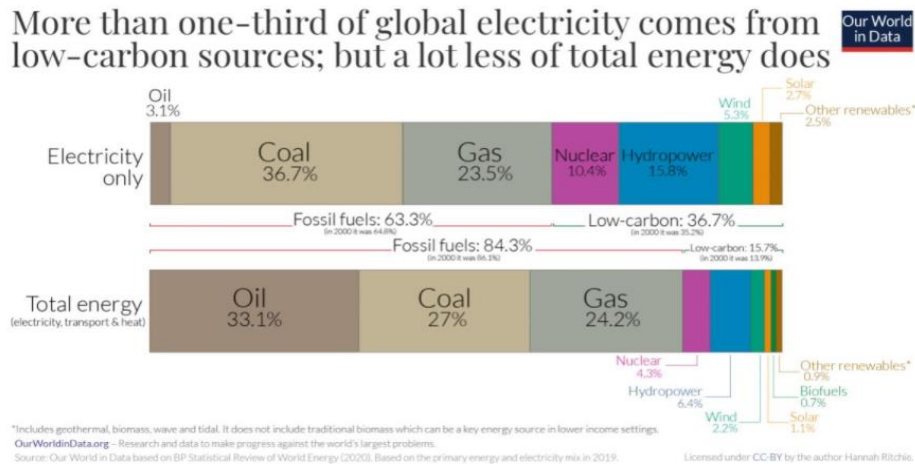


Σχήμα 1.1 Ποσοστά χρήσης ανανεώσιμων πηγών ως ενέργεια

Όσον αφορά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας όπως βλέπουμε στη/στο παρακάτω Γράφημα 3 η/το οποία/ο περιέχει στοιχεία από το έτος 2019. Ακόμη το ποσοστό που χρησιμοποιούνται τα ορυκτά καύσιμα, όπως Άνθρακας/Κάρβουνο και Αέριο είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα ποσοστά των ανανεώσιμων πηγών, σχεδόν διπλάσιο, ακόμη και μετά από 19 χρόνια καθώς το 2000 το ποσοστό ήταν 64,8%. Τέλος, η Κίνα η οποία σαν χώρα όπως είδαμε στον Πίνακα 1 έχει δισεκατομμύρια

εκπεμπόμενους ρύπους Διοξειδίου του Άνθρακα(CO₂), το έτος 2020 παρήγαγε 895 Giga Watts ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.[11]

Όταν πρόκειται για την ολική παραγόμενη ενέργεια, είτε για ηλεκτροδότηση, μεταφορικά μέσα, είτε για θέρμανση παρατηρείται ότι μικραίνει ακόμη περισσότερο το ποσοστό χρήσης των Α.Π.Ε. Και στις δύο περιπτώσεις πάντως κυρίαρχη πηγή θεωρείται η Υδροδυναμική Ενέργεια (=Hydrapower) και όχι αδικώς, καθώς η υδροηλεκτρική ενέργεια, η ηλεκτρική ενέργεια δηλαδή που παράγεται από τη φυσική ροή του νερού είναι μία από τις παλαιότερες και άφθονες πηγές ενέργειας στον πλανήτη Γη.



Σχήμα 1.2 Ποσοστά χρήσης πηγών για ηλεκτρική ενέργεια

1.4 Επίλογος

Τέλος, η Ελλάδα έχει ανέβει στο ποσοστό του 19,7 % που αφορά την κατανάλωση ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές, ένα ενθαρρυντικό ποσοστό που δίνει ελπίδα για μια πιο βιώσιμη καθημερινότητα [12]. Όπως ανέφερε και ο Υπουργός Περιβάλλοντος και Ενέργειας κύριος Κώστας Σκρέκας, μετά από την κακοκαιρία "Μήδεια" βγήκαν στην επιφάνεια προβλήματα που θα δημιουργούνταν σε εγκαταστάσεις Πηγών Ενέργειας πιο συγκεκριμένα Αιολικών πάρκων, καθώς επίσης και ότι κρίνεται απαραίτητη η αναβάθμιση των ηλεκτρικών δικτύων και των μηχανισμών σταθεροποίησης του ηλεκτρικού συστήματος πριν από κάποια άλλη ενέργεια." [13]. Βέβαια γίνονται κάποιες μελέτες από την εταιρεία ΕΛΕΤΑΕΝ η οποία είναι μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας WindEurope και εκπροσωπεί την Ελλάδα, ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί ένα θεσμικό πλαίσιο για την μελέτη, εγκατάσταση και χρήση Αιολικών Θαλάσσιων πάρκων. Καλώς η κακώς κύρια και επενδύσιμη ανανεώσιμη πηγή στην χώρα θεωρείται ο ήλιος, δηλαδή τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Το γεγονός αυτό κάνει την μελέτη και εκμετάλλευση άλλων Ανανεώσιμων Πηγών, όπως για παράδειγμα ενέργεια από τα κύματα να μοιάζει πιο μακρινή, όχι όμως ανέφικτη.

Κεφάλαιο 2ο: Κύματα

2.1 Εισαγωγή

Ένα από τα αγαπημένα θαλάσσια σπορ, το surfing (σέρφινγκ) γεννήθηκε στην Πολυνησία, μια μεγάλη ομάδα νησιών διασκορπισμένα στον κεντρικό και νότιο Ειρηνικό Ωκεανό και αποτελούσε αναπόσπαστο κομμάτι του πολιτισμού τους. Στην Ευρώπη λέγεται ότι κατέφθασε περίπου τον 17ο αιώνα στην Ταϊτή. [19] Στο διάσημο αυτό άθλημα ο σέρφερ χρησιμοποιεί την μηχανική δύναμη των κυμάτων που ασκούνται στο σώμα του για να υπάρξει τελικά η κινητική ενέργεια προσφέροντας ένα εντυπωσιακό αποτέλεσμα. Τις δυνάμεις αυτές θέλησαν οι άνθρωποι από τα χρόνια του Μεσαίωνα να εκμεταλλευτούν προς όφελος τους με διάφορους τρόπους και για αυτές κάνει λόγο το Κεφάλαιο 2 μαζί με τον ορισμό του κύματος και τα χαρακτηριστικά του.

2.2 Τι είναι κύμα

Τα κύματα είναι σημαντικό να τονιστεί από την αρχή ότι δεν μεταφέρουν ύλη, αλλά ενέργεια και πιο συγκεκριμένα μηχανική, αποτέλεσμα του αθροίσματος κινητικής (KE) και δυναμικής ενέργειας (PE). Η ενέργεια αυτή μεταφέρεται μεταξύ των σωματιδίων του μέσου στο οποίο διαδίδονται. Υποθέτοντας ότι υπάρχει ένα σωματίδιο σε μία γραμμή κύματος (=wave line) λόγω της κυματικής κίνησης θα ακολουθεί και αυτό με κίνηση από πάνω προς τα κάτω και το αντίστροφο προκαλώντας μία δόνηση. Τα δονούμενα σωματίδια σε σύνολο προκαλούν την λεγόμενη Απλή Αρμονική Κίνηση (=Simple Harmonic Motion) με βάση την εξίσωση 2.1 [14]

$$y = \beta \sin \frac{2\pi}{\lambda} (vt - x) \quad (2.1)$$

Όπου: β : πλάτος του κύματος (m)

v : ταχύτητα του κύματος (m/s)

λ : μήκος κύματος (m)

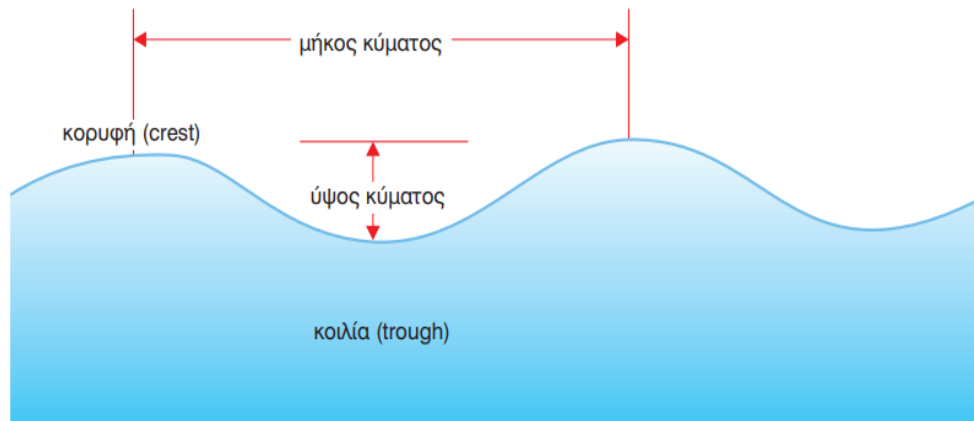
t : χρόνος κύκλου του κύματος (s)

Τα ηχητικά, τα σεισμικά και τα θαλάσσια κύματα όπου και αυτά εξετάζονται (θαλάσσια κύματα) στην παρούσα εργασία ονομάζονται μηχανικά κύματα καθώς πρόκειται για περιοδικές ταλαντώσεις των μέσων που μεταφέρουν την μηχανική ενέργεια δηλαδή, του αέρα, της Γη -τις τεκτονικές πλάκες- και του νερού αντίστοιχα.

2.2.1 Χαρακτηριστικά κύματος

Όπως προαναφέρθηκε τα κύματα όταν “δημιουργούνται” προκύπτουν περιοδικές ταλαντώσεις κατά τις οποίες εμφανίζεται μία αλληλουχία από κορυφές (wave crests) και από κοιλίες (wave troughs) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά τα οποία διαφαίνονται και στο Σχήμα 2:

- Συχνότητα-f-: Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι η συχνότητα, δηλαδή ο αριθμός των κυμάτων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο στη μονάδα του χρόνου.
- Περίοδος –T- : Η Περίοδος είναι αντίστοιχα ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για τη διέλευση δύο διαδοχικών κορυφών ή δύο διαδοχικών κοιλιών από ένα συγκεκριμένο σημείο .



Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστικά κύματος

- Μήκος κύματος $-\lambda-$: Η απόσταση μεταξύ δύο κοιλιών ή δύο κορυφών καθορίζουν το μήκος κύματος που είναι εξίσου ένας σημαντικός παράγοντας στον υπολογισμό της ταχύτητας και κατ' επέκταση της επιλογής διάταξης για την ηλεκτροπαραγωγή.
- Ύψος κύματος $-H-$: Ως ύψος ενός κύματος θεωρείται η απόσταση μεταξύ του υψηλότερου σημείου –την κορυφή, όπως φαίνεται και στην Σχήμα 2.- και του χαμηλότερου σημείου –την κοιλία-. Το ύψος του κύματος δεν είναι σταθερό και μεταβάλλεται συνεχώς με αποτέλεσμα να επαναυπολογίζονται και οι υπόλοιπες μεταβλητές.
- Ταχύτητα $-u-$: Ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό που λαμβάνεται υπόψη, είναι η ταχύτητα, της οποίας το μέτρο εξαρτάται από το βάθος των νερών της θάλασσας στο οποίο μετράται. Με αποτέλεσμα όταν το βάθος είναι θεωρείται μεγάλο η ταχύτητα να είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με μικρότερο βάθος νερού. [15] Το συγκεκριμένο γεγονός οφείλεται στην επίδραση που έχει ο πυθμένας στα χαρακτηριστικά του κύματος. Η κίνηση των σωματιδίων ενός κύματος διαφέρει από μέτρο σε μέτρο.

2.2.2 Ταχύτητα και θεμελιώδης εξίσωση κυματικής

Ο άνεμος είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει και είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τις παραμέτρους του προκύπτοντος κύματος δηλαδή την συχνότητα, την ταχύτητα και τη διάρκεια των αέριων μαζών καθορίζουν τη σχέση μεταξύ της διάρκειας του κύματος και του μεγέθους του (το μήκος και το ύψος) κατ' επέκταση και της ταχύτητας του καθώς από την κυματική εξίσωση προκύπτει ότι η συχνότητα, είναι ανάλογη της ταχύτητας όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση με γνώμονα τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.2)$$

$$u = \lambda * f \Rightarrow u = \lambda * \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.3)$$

Όπου,

$$\omega = \sqrt{gk} , \quad g \approx 9,780 \text{ m/s}^2 \quad (2.4)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

Που προκύπτει ότι:

$$u = \sqrt{\frac{\lambda g}{2\pi}} \quad (2.6)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις αυτές είναι προφανές ότι κρίνεται απαραίτητο στις διατάξεις που μελετώνται και υλοποιούνται να μπορούν να προσαρμόσουν τις μεταβλητές ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες της θαλάσσιας δραστηριότητας.[16]

Οι ταλαντώσεις που οφείλονται στα υποθαλάσσια ηφαιστεια ή κάποια σεισμική δραστηριότητα δημιουργούνται από την απότομη διαφορά πίεσης και βαρύτητας που προκαλείται από το βυθό της θάλασσας και όχι μόνο.[16] Η απόσταση της επιφάνειας με τον πυθμένα της θάλασσας, είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας ως προς την ταχύτητα του κύματος. Όσο το βάθος του νερού υπερβαίνει το 1/2 του μήκους κύματος τόσο η ταχύτητα είναι ανεξάρτητη του βάθους του νερού. Κύματα Ρηχών υδάτων θεωρούνται όσα το βάθος του νερού είναι μικρότερο από το 1/20 του μήκους κύματος. Κύματα βαθέων υδάτων είναι εκείνα που το βάθος του νερού υπερβαίνει το 1/2 το μήκος κύματος επίσης η περιοχή μεταξύ τα βαθέων και ρηχών υδάτων ονομάζεται ζώνη μετάβασης.

2.3 Παραγόμενη κυματική ενέργεια

Η μέση κυματική ενέργεια είναι το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας των μορίων του νερού που οφείλεται στην κατακόρυφη ταλάντωσή τους και της κινητικής ενέργειας που οφείλεται στην περιστροφική κίνηση των μορίων του νερού. Όσον αφορά την ολική παραγόμενη ενέργεια E_T ανά μονάδα όγκου ορίζεται ως το άθροισμα της δυναμικής και κινητικής ενέργειας, όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις.[14]

$$E_T = PE + KE \quad (2.7)$$

$$E_T = \frac{2\pi^2 \rho v^2 \beta^2}{\lambda^2} \quad (2.8)$$

2.3.1 Έργο- Ποσότητα Ενέργειας

Το έργο ή αλλιώς η ποσότητα ενέργειας που παράγεται ή καταναλώνεται κατά την διάρκεια μίας μεταβολής στην μετακίνηση ενός σώματος και σε αυτή την περίπτωση των σωματιδίων του νερού εκφράζεται ως το γινόμενο της δύναμης $F(N)$ επί την μετατόπιση $d(m)$ του σώματος και μετράται σε μονάδες Joule.[14]

$$W = F \times d \quad (2.9)$$

Όπου,

$$F = m \times a \quad (2.10)$$

Προκύπτει,

$$W = (m \times a) \times d \quad (2.11)$$

Ανά μονάδα όγκου και μετατόπιση dy η εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$W = m \times d \times \left(\frac{d^2 y}{dt^2}\right) \quad (2.12)$$

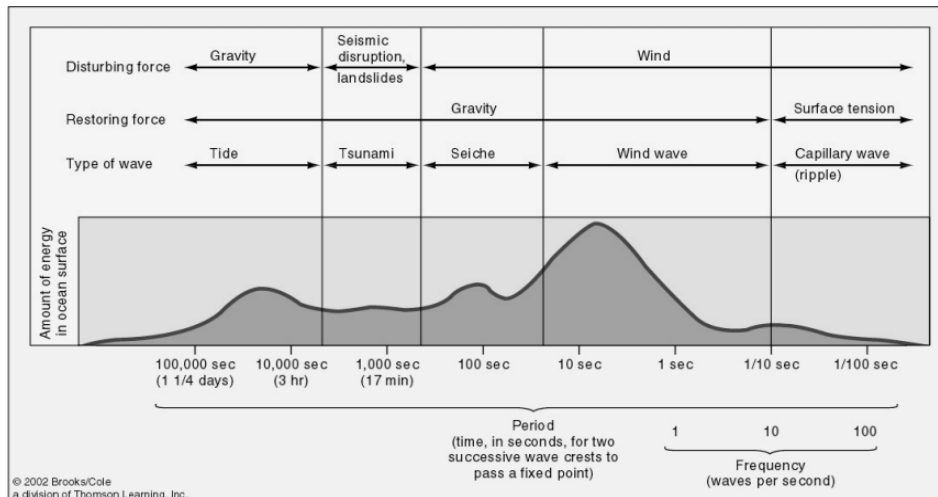
Όπου τελικά,

$$W = \int \rho \left[\frac{4\pi^2 \beta v^2}{\lambda^2} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (vt - x) \right] dy \quad (2.13)$$

Το παραγόμενο έργο με μετατόπιση $0 \rightarrow y$ υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2.14)

$$W = \int_0^y \rho \left[\frac{4\pi^2 \beta v^2}{\lambda^2} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (vt - x) \right] dy \quad (2.14)$$

Στην Σχήμα 2 παρουσιάζεται η Σχήμα στην επιφάνεια της θάλασσας ανάλογα με τον τύπο κύματος αναφερόμενη στην ποσότητα ενέργειας που παράγεται Αναγράφεται το είδος-τύπος του κύματος η δύναμη από την οποία δημιουργείται βαρύτητα, άνεμος, seiche-(στα Ελληνικά κυματανάπαλη) που πρόκειται για ωκεανογραφικό και ναυτιλιακό όρο με τον οποίο χαρακτηρίζεται η ρυθμική ταλάντωση του νερού που παρατηρείται είτε σε λίμνη, είτε σε κλειστούς κόλπους κλπ. Στο κάτω μέρος βρίσκεται η περίοδος, ο χρόνος για δύο συνεχόμενες κορυφές που περνούν από ένα σημείο αναφοράς.[17]



Σχήμα 2.2 Ποσότητα ενέργειας ανά τύπο κύματος.

2.3.2 Δυναμική Ενέργεια PE

Όταν ένα σώμα ή ένα σύστημα έχει δυναμική ενέργεια λέγεται ότι έχει την δυνατότητα να παράγει έργο όσο βρίσκεται σε κάποιο πεδίο δυνάμεων και εξαρτάται από την θέση και την κατάσταση του. Θεωρείται ως αποθηκευμένη ενέργεια που περιμένει να μετατραπεί σε κινητική. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες δυναμικής ενέργειας όπως, η ελαστική, η βαρυτική και η χημική. Στην παρούσα εργασία θα γίνει λόγος για τις δύο πρώτες κατηγορίες. Μετράται σε Joule και ανά μονάδα όγκου δίνεται από την σχέση: [14]

$$PE = \frac{2\pi^2 \rho v^2}{\lambda^2} \beta^2 \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (vt - x) \right] \quad (2.15)$$

Διαφορετικά, με βάση την παράμετρο της αλατότητας ρ της θάλασσας η εξίσωση ορίζεται και ως εξής:

$$PE = \frac{1}{4} \rho g A^2 \quad (2.16)$$

2.3.3 Κινητική Ενέργεια ΚΕ

Η κινητική ενέργεια είναι μία μορφή ενέργειας την οποία αποκτά ένα σώμα ή σωματίδιο εξαιτίας της κίνησης και της μάζας που έχει. Το είδος της κίνησης που μπορεί να αποκτήσει είναι είτε η μετακίνηση από ένα σημείο Α σε ένα σημείο Β, κυκλική είτε δόνηση ή και συνδυασμός αυτών. Η γενική μορφή της εξίσωσης που την διέπει είναι το 1/2 του γινομένου μάζας επί το τετράγωνο της ταχύτητας του σώματος. Με βάση το θέμα της εργασίας όμως μας ενδιαφέρει η εξίσωση που περιγράφει της κινητική ενέργεια ενός κύματος και παρατίθεται στη σχέση (2.17) .[18]

$$KE = \frac{2\pi^2 \rho v^2}{\lambda^2} \cos^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} (vt - x) \right] \quad (2.17)$$

Διαφορετικά, με βάση την παράμετρο της αλατότητας ρ της θάλασσας η εξίσωση ορίζεται ως εξής:

$$KE = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.18)$$

2.3.4 Ισχύς θαλάσσιου κύματος

Το μέγεθος που ενδιαφέρει περισσότερο είναι αυτό της ισχύος που παράγει το κύμα. Η ισχύς P για κύμα μήκους 1m ύψους H και περίοδο T (sec) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P = \rho_w \times g^2 \times H^2 \times T \times \frac{1}{\pi} \quad \text{W/m} \quad (2.19)$$

,όπου ρ_w είναι η πυκνότητα μάζας του νερού που διαφοροποιείται ανάλογα το σημείο δειγματοληψίας καθώς η πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι συνάρτηση της αλατότητας S , της θερμοκρασίας T_c και της πίεσης P_p , οπότε σε κάθε ωκεανό και θάλασσα είναι διαφορετική η τιμή της ρ_w . [19], [20]. Η επιτάχυνση της βαρύτητας g η οποία έχει τιμή περίπου $9,8 \text{m/sec}^2$ εξαρτάται και αυτή από το γεωγραφικό πλάτος της μέτρησης, με μικρές αποκλίσεις.

2.4 Επίλογος

Σε γενικές γραμμές μπορεί να ειπωθεί ότι, η παραγόμενη ενέργεια από τα κύματα εξαρτάται αποκλειστικά από το ύψος του κύματος ανεξαρτήτως των υπολοίπων παραγόντων. Οποιαδήποτε αύξηση του χρόνου ή του μήκους του νερού στο οποίο δρα ο άνεμος, προκύπτει μία ισοδύναμη αύξηση του ύψους και του μήκους του προκύπτοντος κύματος. [14],[15] Η Ενέργεια των κυμάτων που παράγεται οφείλεται στην δυναμική ενέργεια που αποκτούν τα μόρια, λόγω του αέρα ή της διαφοράς θερμοκρασίας, η οποία μετατρέπεται σε κινητική μέσω ταλαντώσεων. Η αλατότητα έχει ένα εξίσου σημαντικό ρόλο για τον υπολογισμό της ενέργειας αλλά και της ισχύς γι' αυτό τον λόγο πρέπει να γίνεται προσεκτική μελέτη ως προς την επιλογή της θάλασσας στην οποία θα γίνει η τοποθέτηση της όποιας συσκευής.

Κεφάλαιο 3ο: Θεωρίες κυμάτων

3.1 Εισαγωγή

Τα θαλάσσια κύματα μπορεί να δημιουργούνται από διάφορους παράγοντες. Για τα κύματα που εμφανίζονται στην επιφάνεια της θάλασσας, όπου το νερό έχει μικρότερη πυκνότητα, υπεύθυνες είναι οι αέριες μάζες που δημιουργούνται λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και “σπάνε” την ισορροπία των μορίων του νερού και προκαλούν τις περιοδικές κινήσεις. Τα εσωτερικά κύματα όπως αναφέρονται από τους επιστήμονες όπου η πυκνότητα είναι πολύ μεγαλύτερη, δημιουργούνται από υποθαλάσσιες σεισμικές δονήσεις εξαιτίας της ηφαιστειακής δραστηριότητας ή από τα θαλάσσια ρεύματα και τη βαρύτητα. [16]. Υπάρχουν φυσικά και άλλοι τύποι ωκεάνιων κυμάτων και δίνονται αναφορικά παρακάτω για εγκυκλοπαιδικές γνώσεις χωρίς όμως απαραίτητα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας καθώς η ισχύς διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του κύματος :

- Οι Παλίρροιες,
- Τα τσουνάμι,
- Παραγόμενα λόγω πίεσης.

Οι μεταβολές των χαρακτηριστικών εξαρτώνται από τον τύπο του κύματος και από το βάθος της θάλασσας. Από τα βαθιά νερά μέχρι τα ρηχά είναι πολλές οι διαφοροποιήσεις, για τον λόγο αυτό υπάρχουν διάφορες θεωρίες που προσπαθούν να τις περιγράψουν, όπως η Θεωρία του Airy, του Stokes για τις οποίες θα γίνει λόγος στην παρούσα διπλωματική και για εγκυκλοπαιδικές γνώσεις αναφέρονται εδώ ότι χρησιμοποιούνται, η Θεωρία των μεμονωμένων κυμάτων, των τυχαίων ή των κυμάτων τυχαίας θάλασσας. Τέλος επιγραμματικά θα αναφερθούν οι διεργασίες που επενεργούν στην τροποποίηση των χαρακτηριστικών ενός κύματος.

3.2 Η Θεωρία του Airy

Πρόκειται για μία γραμμική θεωρία κυματισμών, υπό την προϋπόθεση παραδοχών και απλοποιήσεων, όπου το ρευστό είναι τέλειο, ο πυθμένας σταθερός, αδιαπέραστος και οριζόντιος (σταθερό βάθος), η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μηδέν και το ύψος του κύματος. Η είναι πολύ μικρότερο του βάθους D και του μήκους L , καθώς και στην παραδοχή αστρόβιλης ροής.[21] Κατά αυτή τη θεωρία το κύμα αποτελεί ημιτονοειδή ταλάντωση και αφορά τα κύματα των οποίων το ύψος H είναι πολύ μικρό σε σχέση με το βάθος της θάλασσας D και το μήκος του κύματος L . Η θεωρία αυτή έχει την δυνατότητα να καλύψει όλες τις περιπτώσεις του πηλίκου D/L όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1 με τους μετασχηματισμούς της ταχύτητας και του μήκους, με γνώμονα τις γενικές εξισώσεις της ταχύτητας και μήκους του κύματος ως εξής: [14]

$$C = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right) \quad (3.1)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right) \quad (3.2)$$

Όπου h το προφίλ της ημιτονοειδούς ταλάντωσης δηλαδή το ύψος του κύματος την χρονική στιγμή t σε απόσταση x που δίνεται από την σχέση:

$$h = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (3.3)$$

Πίνακας 3.2 Μετασχηματισμοί της ταχύτητας και μήκους κύματος.

Ρηχά	Ενδιάμεσα	Βαθιά
$D < \frac{L}{20}$	$< D <$	$\frac{L}{2} < D$
$L = T\sqrt{gD}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$	$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \rightarrow L = 1.56T^2$
$C = \sqrt{gD}$	$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$	$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \rightarrow C = 1.56T$

Στην θεωρία αυτή τα μόρια του νερού διαγράφουν κυκλική τροχιά με διάμετρο R που μειώνεται εκθετικά με το βάθος D σύμφωνα με την εξίσωση (3.1).

$$R = H * e^{-\left(\frac{2\pi D}{L}\right)} \quad (3.4)$$

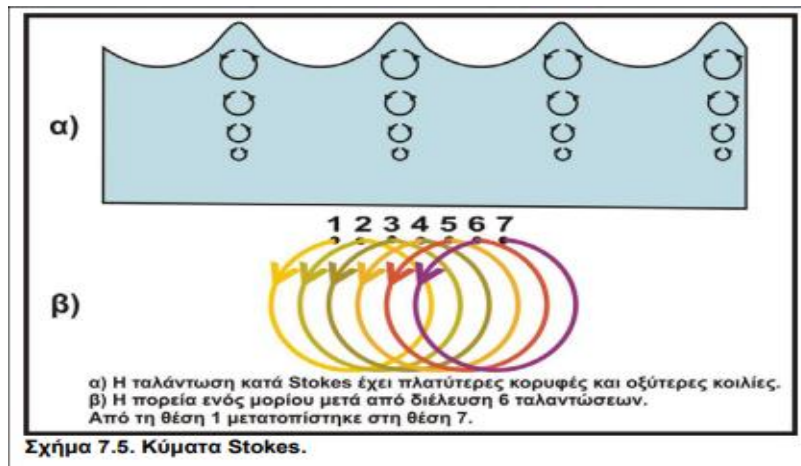
Παρατηρείται ότι στα βαθιά νερά, δηλαδή σε βάθη μεγαλύτερα από το μισό του μήκους κύματος η κίνηση μειώνεται τόσο που μπορεί να θεωρηθεί ότι τα μόρια του νερού παραμένουν ακίνητα. Αντιθέτως στα πολύ ρηχά νερά, λόγω της τριβής με τον πυθμένα η κυκλική τροχιά παύει να υπάρχει και δημιουργείται μία ελλειψοειδής κίνηση με τον κεντρικό άξονα να είναι παράλληλος με τον πυθμένα.

3.3 Η Θεωρία του Stokes

Η ταλάντωση που δημιουργείται σύμφωνα με τον Stokes έχει τη μορφή ημιτονοειδούς καμπύλης με πεπλατυσμένες κοιλίες και οξύτερες κορυφές. Η θεωρία αυτή έρχεται να συμπληρώσει κάποια κενά που αφήνει η θεωρία του Airy. Όπως για παράδειγμα την έλλειψη του ύψους του κύματος στην εξίσωση της ταχύτητας καθώς ο Airy θεωρεί δεδομένο ότι το ύψος θα είναι πάντα μικρότερο του μήκους, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει πάντοτε. Οπότε ο Stokes για να ισχύει η θεωρία του έθεσε ως προϋπόθεση το βάθος να είναι μεγάλο σε σχέση με το μήκος του κύματος. Συγκεκριμένα, $D/L > 0.1$ έτσι ώστε η ταχύτητα να υπολογιστεί εκ νέου: [14]

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \left(1 + \frac{\pi^2 H^2}{2L^2}\right)} \quad (3.5)$$

Η κίνηση των σωματιδίων του νερού είναι κυκλική όπως και στη θεωρία του Airy, όμως δεν είναι πλήρης όπως φαίνεται στην Σχήμα 3, αλλά διαγράφουν τόξα λίγο μικρότερα των 360° ώστε το επόμενο να ξεκινά από εκεί όπου σταμάτησε το προηγούμενο έχοντας ως αποτέλεσμα την μετάδοση της μάζας κατά την διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Σχήμα 3.1 Κύματα Stokes

Με την ταχύτητα της μάζας να διαμορφώνεται ως εξής:

$$C_m = \frac{\pi H^2}{L^2} C \quad (3.6)$$

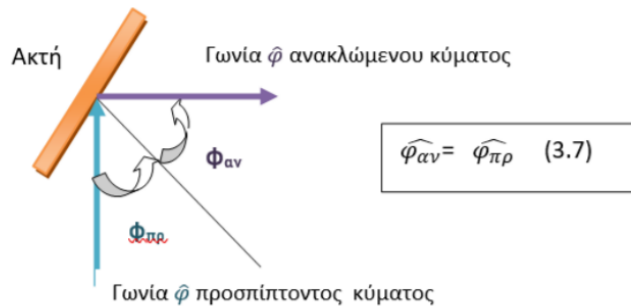
,όπου C η ταχύτητα φάσης κύματος.

3.4 Διεργασίες τροποποίησης χαρακτηριστικών κύματος

Όπως προαναφέρθηκε τα χαρακτηριστικά ενός κύματος σε βαθιά νερά αλλάζουν καθώς μεταφέρεται προς την ακτή με μικρότερο βάθος πυθμένα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις διεργασίες που τροποποιούν αυτά τα χαρακτηριστικά οι οποίες περιλαμβάνουν την ανάκλαση, την διάθλαση, την περίθλαση και την θραύση των κυμάτων.

3.4.1 Ανάκλαση Κύματος -WaveReflection

Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι όταν ένα μηχανικό κύμα αλλάξει μέσο μετάδοσης ή συναντήσει κάποιο εμπόδιο, αλλάζει και διεύθυνση διάδοσης. Στην περίπτωση που το προσπίπτον κύμα προσκρούσει σε μία ακτογραμμή (ιδανικά ευθεία) ή σε ένα τεχνητό τείχος θα ανακλαστεί- θα αλλάξει κατεύθυνση προς τα ανοιχτά την θάλασσα υπό γωνία ανάκλασης ίση με την γωνία πρόσπτωσης χάνοντας μικρό ποσοστό ενέργειας. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι οι κορυφές των κυμάτων είναι παράλληλες μεταξύ τους και κάθετη σε αυτές είναι η κυματική ακτίνα διάδοσης. Η ισότητα από την εξίσωση (3.7) είναι ο βασικός κανόνας την ανάκλασης.



Σχήμα 3.2 Ανάκλαση κύματος

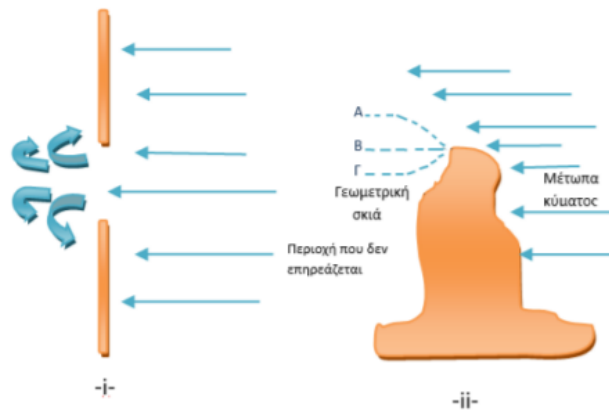
Όταν η περίοδος των διαδοχικών προσπιπτόντων κυμάτων είναι ίδια, δημιουργείται ένα είδος στάσιμου κύματος καθώς αλληλοεπηρεάζονται τα ανακλώμενα με τα προσπίπτοντα κύματα.[17]. Κατά αυτή την διεργασία παρουσιάζεται κυματισμός μόνο με κατακόρυφη κίνηση του νερού μπροστά στο “εμπόδιο” –τείχος.

3.4.2 Διάθλαση Κύματος-WaveRefraction

Η διάθλαση είναι μία διεργασία η οποία επηρεάζει την κυματική ενέργεια κατά μήκος της ακτής με την περίοδο να παραμένει σταθερή, αφού καθορίζεται από την πηγή εκπομπής. Όμως για να συνεχίσει να ισχύει η κυματική εξίσωση πρέπει να αλλάξει η ταχύτητα διάδοσης u και κατ' επέκταση το μήκος κύματος λ όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο με αποτέλεσμα την αλλαγή κατεύθυνσης των κυμάτων.[22]

3.4.3 Περίθλαση κύματος- Wave Diffraction

Το φαινόμενο της περίθλασης εμφανίζεται κατά την πρόσκρουση του κύματος σε κάποια χερσόνησο, ακρωτήρι ή γενικά κυματοθραύστη, όπου ο κυματισμός διαδίδεται στην σκιαζόμενη πλευρά του κυματοθραύστη, στην ουσία η ενέργεια του κύματος μεταδίδεται και πίσω από την κατασκευή. Κατά το φαινόμενο, το ύψος του κύματος μειώνεται και η κατεύθυνση μεταβάλλεται.



Σχήμα 3.3 Περίθλαση κύματος- Wave Diffraction

Στην Σχήμα 4 απεικονίζεται ο κυματισμός –i- όταν συναντά στένωμα και –ii- όταν συναντά νησί, χερσόνησο, κλπ. Τα σημεία A,B και Γ αντιπροσωπεύουν: Το σημείο A=1/10, το 0,1 του αρχικού ύψους H του κύματος, το B=1/2 το μισό του αρχικού ύψους H και Γ=1, το μέγιστο ύψος του κύματος[23],[24].

3.4.4 Θραύση κυμάτων

Όταν ένα κύμα φτάσει πολύ κοντά στην ακτογραμμή ή η κλίση του κύματος υπερβεί μία τιμή είτε ο άνεμος επιδράσει καταστρεπτικά στην κορυφή του κύματος δημιουργείται το φαινόμενο της θραύσης. Το συγκεκριμένο φαινόμενο βοηθά στην δέσμευση ενέργειας.

Στην πρώτη περίπτωση το κύμα θα υποστεί θραύση λόγω της αυξανόμενης κλίσης του μετώπου του και της μεγαλύτερης ταχύτητας που αναπτύσσει η κορυφή σε σχέση με την ταχύτητα διάδοσης. Στην ουσία όταν το βάθος d είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος λ και το ύψος του κύματος ξεπεράσει τα $0.8d$ έχουμε θραύση κύματος. Η ζώνη κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται η θραύση ονομάζεται ζώνη θραύσης. Στην δεύτερη περίπτωση όταν στα βαθιά νερά η κλίση του κύματος, η οποία ορίζεται ως λόγος του ύψους h και του μήκους κύματος λ , υπερβεί την τιμή 0.17 πραγματοποιείται θραύση του κύματος. Στην τελευταία περίπτωση, όπου η μεγάλη ισχύς των ανέμων “ρίχνουν” την κορυφή του κύματος από την βάση της παρατηρείται το φαινόμενο της θραύσης.[24]

3.5 Επίλογος

Η θεωρία του Stokes συμπληρώνει την θεωρία του Airy για τον κυματισμό των σωματιδίων του νερού στα ρηχά και βαθιά νερά της θάλασσας. Πρόκειται για πολύ σημαντικές θεωρίες πάνω στις οποίες βασίστηκαν όλα τα μοντέλα δέσμευσης της κυματικής ενέργειας WEC. Εκτός των θεωριών για τα σωματίδια αυτά κάθε αυτά, σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση των χαρακτηριστικών του κύματος είναι και οι διεργασίες της ανάκλασης, της διάθλασης, της περίθλασης και της θραύσης των κυμάτων. Όλες οι θεωρίες εναρμονίζονται και συνθέτονται για την δημιουργία βέλτιστων κατασκευών από τους μηχανικούς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

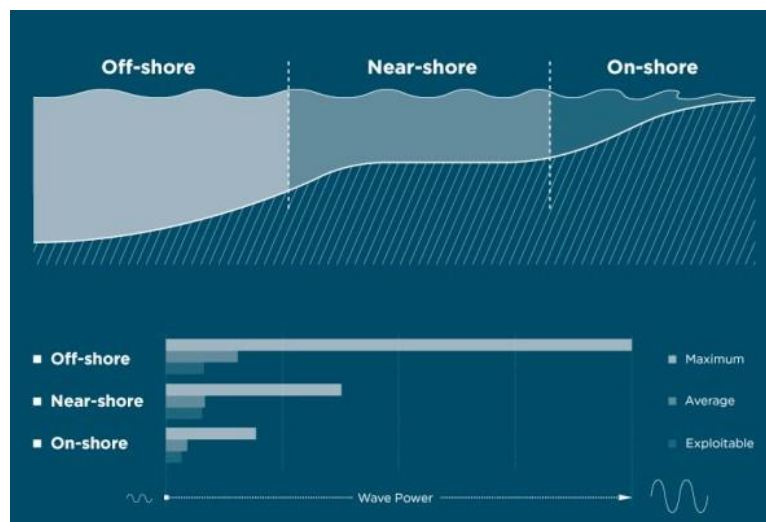
Κεφάλαιο 4ο: Τεχνολογίες εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.

4.1 Εισαγωγή

Τα κύματα ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας δεν είναι πολύ διαδεδομένη. Αυτό συμβαίνει διότι η σχέση κόστους- ωφέλειας είναι άιση. Το κόστος κατασκευής είναι πολύ μεγαλύτερο λόγω των υλικών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε ένα τόσο σκληρό περιβάλλον όπως αυτό της θάλασσας, όπου η αλατότητα μπορεί να φτάσει το 39,4% σε κάποιες θάλασσες του Ατλαντικού[20]. Επίσης το κόστος της συντήρησης αυτών των κατασκευών και η μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας στη στεριά είναι ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα. Οπότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σύμφωνα με τις παρακάτω παραγράφους, η θέση της κατασκευής και ο τύπος της εφαρμογής για την μετέπειτα σωστή επιλογή των εξαρτημάτων και τεχνολογιών ώστε να παρέχεται η μέγιστη αποδοτικότητα.

4.2 Κατηγορίες Θέσεων και Τύπων εφαρμογής

Ανάλογα με την θέση που θα εγκατασταθεί η κατασκευή, στην ακτογραμμή, κοντά στην ακτή ή στα ανοιχτά της θάλασσας πρέπει να εφαρμοστεί και η ανάλογη τεχνολογία και μελέτη. Στην εκάστοτε περίπτωση η ταχύτητα και τα ποσά ενέργειας των κυμάτων διαφέρει. Για τον λόγο αυτό οι κατασκευές κατηγοριοποιούνται πρώτα ως προς την τοποθεσία της εγκατάστασης και την αρχή λειτουργίας.



Σχήμα 4.1 Διακυμάνσεις Ισχύος στην εκάστοτε θέση

Στην Ελλάδα οι περιοχές στις οποίες εμφανίζεται υψηλό κυματικό δυναμικό είναι στα νησιά του Ιονίου Πελάγους, στα στενά μεταξύ της Κρήτης- Κάσου- Κυθήρων- Καρπάθου- Ρόδου, καθώς επίσης και στο κεντρικό Αιγαίο, βόρεια των Κυκλάδων, ανάλογα τον μήνα καθώς τον Σεπτέμβριο εμφανίζονται τα μικρότερα ύψη.[46]

4.2.1 Τύποι κυμάτων με βάση την κατεύθυνση του ανέμου

- Onshore Waves- Χερσαία κύματα

Onshore κύματα θεωρούνται αυτά τα οποία δημιουργούνται από τον άνεμο με κίνηση από την ανοιχτή θάλασσα προς την στεριά με αποτέλεσμα να μην έχουν σχήμα και μορφή και να σπάνε (θρυμματίζονται) στην ακτή. Ο συγκεκριμένος τύπος θεωρείται ο πιο οικονομικός, καθώς δεν είναι μεγάλη η απόσταση για την μεταφορά του παραγόμενου ρεύματος στο δίκτυο, οπότε η εγκατάσταση και η συντήρηση του δικτύου είναι απλή και πιο εύκολη.[25]

- OffshoreWaves- Υπεράκτια Κύματα

Offshore θεωρούνται τα κύματα που δημιουργούνται εξαιτίας του ανέμου που ξεκινά από την στεριά με κατεύθυνση τα ανοικτά της θάλασσας. Όπως φαίνεται και στην Σχήμα 5 οι εγκαταστάσεις που βρίσκονται μακριά από την στεριά παράγουν τη μέγιστη ισχύ, εξαιτίας των κυμάτων στα βαθιά νερά, που όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα.[25]

4.2.2 Κατηγοριοποίηση διατάξεων με βάση την απόσταση από την ακτή

Οι κατασκευές-συσκευές, κατηγοριοποιούνται με κύριο γνώμονα την απόσταση από την ακτή για την ανάλογη απόδοση της κυματικής ενέργειας όπως εικονίζεται και στο Γράφημα 4 ως εξής:[24],[25]

- Onshore- Επί της ακτογραμμής

Λόγω της σταθερότητας του εδάφους υπάρχει το προνόμιο σταθερών διατάξεων και μικρότερου κόστους μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας, καθώς τα μήκη των καλωδίων είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με αυτά των υπεράκτιων διατάξεων. Τέλος η συντήρηση και τυχόν επισκευή γίνεται από όλους τους μηχανικούς ανεξαρτήτως καιρού ή ικανότητας κατάδυσης. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των onshore διατάξεων είναι το περιορισμένο κυματικό δυναμικό και οι ανωμαλίες των τοπογραφικών χαρακτηριστικών μίας ακτογραμμής.

- Nearshore/ Coastal- Παράκτιες

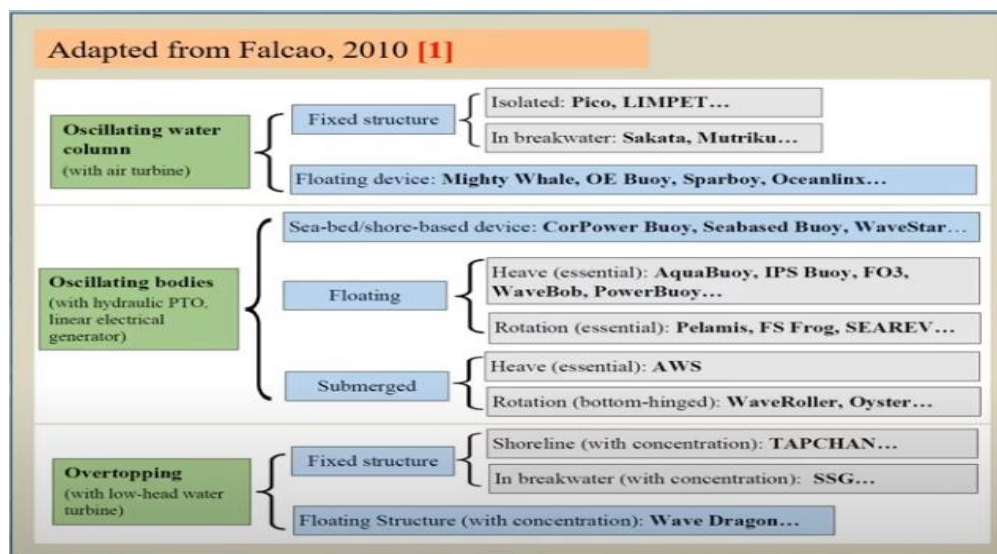
Οι παράκτιες διατάξεις μπορούν να εγκαθίστανται σε απόσταση που δεν ξεπερνά τα 500m από την ακτή και σε βάθος περίπου 20 με 30m από την επιφάνεια της θάλασσας. Το πρόβλημα που δημιουργείται σε αυτές τις διατάξεις είναι ότι η κατασκευή θα πρέπει να αντέξει όχι μόνο στην αλατότητα του νερού, αλλά και στις αντίξοες καιρικές συνθήκες όπως για παράδειγμα τις καταιγίδες.

- Offshore-Υπεράκτιες

Οι αποδοτικότερες σε κυματικό δυναμικό είναι οι υπεράκτιες διατάξεις, όπου η κυματική ενέργεια είναι η υψηλότερη στα βαθύτερα και ανοιχτά νερά της θάλασσας. Το γεγονός αυτό καθίσταται και ως πρόβλημα αν η κατασκευή δεν είναι φτιαγμένη με τρόπο ώστε να μπορεί να διαχειριστεί τα μεγάλα αυτά φορτία. Το βάθος της εγκατάστασης μπορεί να ξεπεράσει και τα 40m από την επιφάνεια, είτε η κατασκευή να επιπλέει. Όμως είναι η πιο κοστοβόρα επιλογή διότι η διαδικασία εγκατάστασης-συντήρησης απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό και ο εξοπλισμός που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί λόγω διάβρωσης από το θαλασσινό νερό πρέπει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

4.3 Κατηγορίες διατάξεων με βάση την αρχή λειτουργίας τους

Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες διατάξεων είναι, όπως φαίνεται και στην Σχήμα 5 είναι οι εξής τρεις: [26]



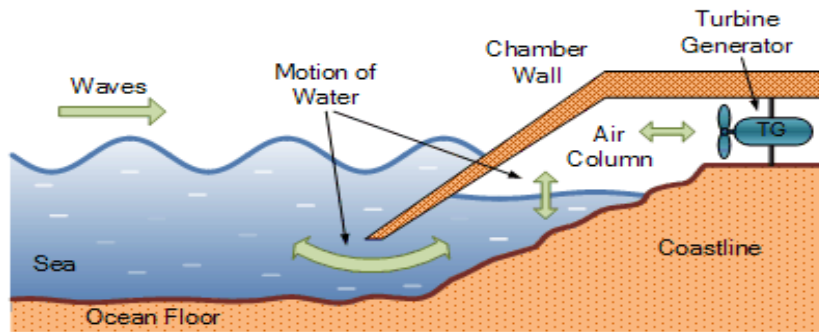
Σχήμα 4.2 Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών.

Η κάθε κατηγορία, εκμεταλλεύεται διαφορετικά την κυματική ενέργεια καθώς χρησιμοποιεί διαφορετική διάταξη για την παραγωγή ρεύματος. Η περιοχή εγκατάστασης της διαφέρει εξίσου όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο ανάλογα με το μέγεθος και το κόστος της διάταξης.

4.3.1 Μετατροπέας Ταλαντευόμενη Υδάτινη Στήλη-OWC

Η διάταξη αυτού του μετατροπέα εγκαθίσταται κυρίως παράκτια ως συμπαγής και σταθερή κατασκευή. Αποτελείται από μία γεννήτρια στροβίλου και μία στήλη νερού.

Όπως φαίνεται και στην Σχήμα 7 η υδάτινη στήλη είναι ένα τεχνητό τείχος συνήθως φτιαγμένο από σκυρόδεμα-τσιμέντο ή χάλυβα και εγκατεστημένο στην ακτή ή σε κάποιο βράχο έχοντας μία κλίση τέτοια ώστε να υπάρχει μία απόσταση-κενό από το πυθμένα. Το κενό αυτό λειτουργεί σα δοχείο πίεσης, καθώς υπάρχει αέρας εγκλωβισμένος ανάμεσα στα κύματα που είναι σε κίνηση και στην τουρμπίνα αέρος.



Σχήμα 4.3 Ταλαντευόμενη στήλη νερού -OWC

Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή. Με την διαρκή κίνηση των κυμάτων ο αέρας που είναι παγιδευμένος μέσα στην στήλη (AirColumn) συμπιέζεται όταν η στάθμη του νερού είναι ανεβασμένη και αποσυμπιέζεται όταν το νερό υποχωρεί. Κατά την συμπίεση και αποσυμπίεση του αέρα στην τουρμπίνα (TG) δημιουργείται αξονική ροή (Τύπου Wells) που με την σειρά της κινεί μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Ολοκληρωμένα πρωτότυπα OWC άρχισαν να κατασκευάζονται μετά την δεκαετία του '80 στην Νορβηγία, Ιαπωνία, Ινδία, Πορτογαλία και στο Ηνωμένο Βασίλειο, όπως για παράδειγμα το Pico, το Sakata, το Mutriku και άλλα. Το εμβαδόν των μετατροπέων σε αυτές τις χώρες κυμαινόταν στα 80 με 250 m², με χωρητικότητα ισχύος 60-500kW. Στο εργοστάσιο της Σκωτίας, ονομαζόμενο OSPREY, το οποίο καταστράφηκε από την θάλασσα το 1995 θεωρούνταν το μεγαλύτερο έχοντας ισχύ 2MW.

Κάποιες δεκαετίες πριν την δημιουργία των OWC σταθερής δομής, περίπου το 1960-1970 είχαν μελετηθεί και τεθεί σε λειτουργία πλωτές διατάξεις OWC στην Ιαπωνία. Χρησιμοποιήθηκε η ίδια αρχή λειτουργίας καθώς και η τουρμπίνα αέρος είναι αυτή που κινεί την γεννήτρια ρεύματος. Η βασική διαφορά είναι ότι πρόκειται για πλωτή διάταξη η οποία είναι αγκυροβολημένη όχι πολύ μακριά από την ακτή. Τέτοιου είδους διατάξεις είναι η Mighty Whale, OceanEnergy, Superbuoy και άλλα.[26]

Για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων ισχύος που δημιουργούνται στον μετατροπέα κυματικής ενέργειας χρησιμοποιείται ένα μοντέλο εξομοιωτή DC busvoltage με τη βοήθεια του μικροελεγκτή P89V51RD2, ο οποίος χρησιμοποιεί τις διακυμάνσεις για να ενεργοποιήσει τον DC/DC ψαλιδιστή-εξομοιωτή.[16]

Όσον αφορά την ενέργεια που παράγει η συγκεκριμένη διάταξη διαμορφώνεται ως εξής:[14]

$$E_{owc-sw} = E_t V \quad (4.1)$$

Όπου, $V = \pi r^2 h \quad (4.2)$

V: όγκος μετατόπισης νερού m³

r: ακτίνα του φρεατίου (champer) m

Κεφάλαιο 4

h : απόσταση/ύψος της επιφάνεια του νερού που διακυμαίνεται από το χαμηλότερο στο υψηλότερο σημείο του OWC m

Έστω ότι η απόσταση h είναι διπλάσιο του πλάτους τότε,

$$h = 2\beta \quad (4.3)$$

οπότε και ο όγκος V του νερού διαφοροποιείται ως:

$$V = 2\pi r^2 \beta \quad (4.4)$$

Με αποτέλεσμα η εξίσωση (4.1) να μετατρέπεται σε:

$$E_{owc-sw} = \frac{4\pi^3 \rho v^2 \beta^3 r^2}{\lambda^2} \quad (4.5)$$

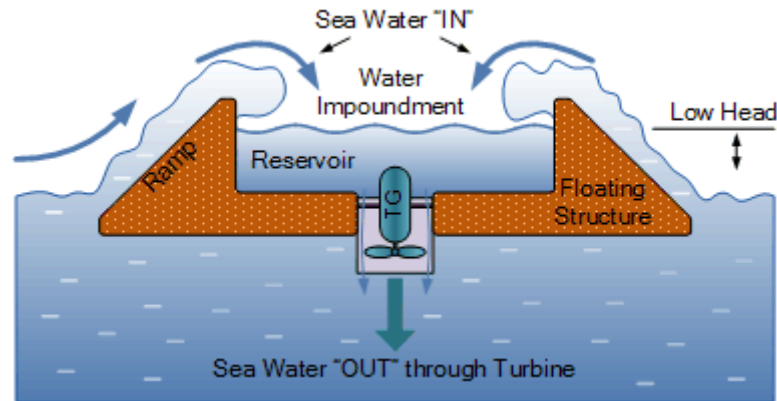
Όπου,

ρ : πυκνότητα μάζας θαλασσινού νερού kg/m^3

r : εσωτερική διάμετρος του θαλάμου OWC

4.3.2 Μετατροπείς Συσκευές υπερύψωσης -Overtopping devices-OTD

Οι διατάξεις των συσκευών υπερύψωσης εγκαθίστανται συνήθως μακριά από την ακτή, στα ανοικτά της θάλασσας (off-shore). Βέβαια υπάρχουν όπως για παράδειγμα το πρωτότυπο Toftestallen στην Νορβηγία όπου είχε τοποθετηθεί σε ένα βραχώδη γκρεμό περίπου το 1985 με ονομαστική ισχύ 350kW. Πρόκειται για διατάξεις που δεν ακολουθούν την γραμμική θεωρία κυμάτων όπως οι OWC και OBD.



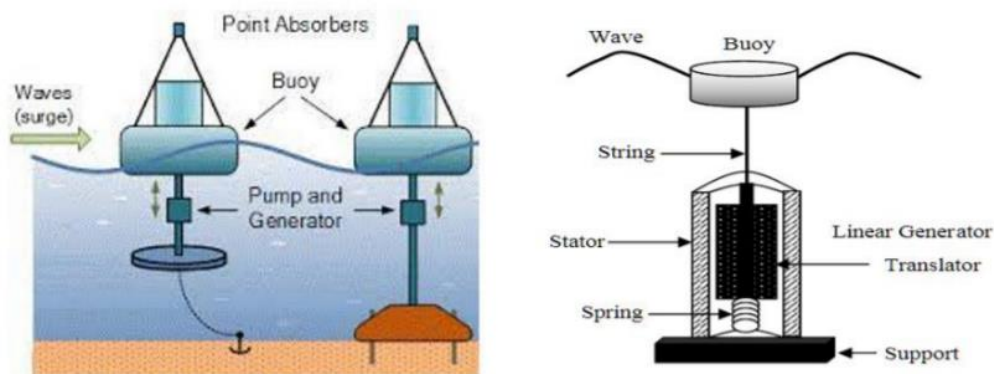
Σχήμα 4.4 Συσκευή υπερύψωσης- OTD

Οι συσκευές υπερύψωσης αποτελούνται από τέσσερα στοιχεία. Τον συλλέκτη νερού από τα κύματα ή αλλιώς ανακλαστήρες που μπορεί να είναι είτε ράμπα, πιο συγκεκριμένα διπλή όπως στον OTD Wave Dragon, 1999 μία παράκτια κατασκευή, που μπορεί να δεσμεύσει έως και 70% περισσότερη ενέργεια σε φυσιολογικές συνθήκες, είτε σε σχήμα κέρατος (horn-shaped), όπως στο Tarchan της Νορβηγίας. Το “ρεζερβουάρ” το οποίο βρίσκεται υψηλότερα από την στάθμη της θάλασσας ώστε να μπορεί να μαζεύεται εκεί το νερό και να παρέχεται στις τουρμπίνες για την εξασφάλιση σταθερής παραγωγής ρεύματος. Το τρίτο στοιχείο αφορά το PTO, μετατροπέα Low-head hydraulic turbine που βρίσκεται στο κυρίως σώμα της κατασκευής και θα αναλυθεί περαιτέρω στην επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου. Το τελευταίο στοιχείο που ολοκληρώνει την διάταξη OTD είναι το σύστημα αγκυροβόλησης. Για παράδειγμα το OTD Wave Dragon συνδέεται με τον πυθμένα της θάλασσας με μία αλυσίδα η οποία επιτρέπει στην διάταξη να περιστρέφεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμεταλλεύεται την αμφίδρομη κίνηση των κυμάτων προς όφελος της.[25],[26]

Με λίγα λόγια η αρχή λειτουργίας των διατάξεων υπερύψωσης περιλαμβάνει την περισυλλογή του νερού από τους ανακλαστήρες στο ρεζερβουάρ από όπου εξασφαλίζεται η ομαλή μετάβαση του στις υδραυλικές τουρμπίνες Low-head, επιστρέφοντας μετά στη θάλασσα, και κατ' επέκταση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μίας γεννήτριας.

4.3.3 Μετατροπείς Σημειακός Απορροφητής- Point absorber

Υπάρχουν αρκετές διατάξεις παλλόμενων σωμάτων με την κάθε μία να εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό με λίγο διαφορετικό τρόπο δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας όπου ονομάζονται σημειακοί απορροφητές (Point absorber). Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ως ενιαίο ανυψωμένο σώμα και συστήματα ανύψωσης δύο σωμάτων, όπως φαίνεται και στην Σχήμα 8. Η ανάγκη για συστήματα δύο σωμάτων προέκυψε από τις δυσκολίες που δημιουργούνταν από το ενιαίο σύστημα, λόγω των αποστάσεων της θαλάσσιας επιφάνειας και του βυθού αλλά και των ρευμάτων που σχηματίζονταν από τις παλιρροιακές ταλαντώσεις. Βέβαια οι μετατροπείς ανύψωσης πολλών σωμάτων χρειάζονται προσεκτική και ιδιαίτερη μεταχείριση στα συστήματα ελέγχου καθώς δημιουργούνται πολλά προβλήματα ως προς τη διαχείριση.[26]



Σχήμα 4.5 -i- Σημειακοί Απορροφητές, -ii- Σημειακός Απορροφητής με γραμμική γεννήτρια

Οι συσκευές με παλλόμενο σώμα αποτελούνται από δύο τμήματα μηχανικά συνδεδεμένα μεταξύ τους με ένα κάθετο άξονα [27] Ανάλογα με την κατασκευή, μπορούν να τοποθετηθούν παράκτια ή υπεράκτια, σε διάφορα βάθη, αρκεί η γεννήτρια ρεύματος να είναι πάντοτε χαμηλότερα από τον συλλέκτη ενέργειας (σημαδούρα).[27]

Η βασική λειτουργία ενός σημειακού απορροφητή είναι να δεσμεύει την ενέργεια των κυμάτων από όλες τις κατευθύνσεις με την βοήθεια της σημαδούρας σε ένα σημείο. Η σημαδούρα έχει την δυνατότητα να κινείται είτε πάνω κάτω είτε να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της με την βοήθεια εσωτερικού ελατηρίου ώστε η ενέργεια που δεσμεύει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κινητική, πνευματική, ή υδραυλική ανάλογα με την εφαρμογή και την γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. [28],[29],[30],[31]

Για την επιλογή των χαρακτηριστικών της σηματοδούρας πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εξισώσεις (4.6), (4.7) και (4.8) οι οποίες προκύπτουν με βάση τον δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα για την κίνηση:[38]

$$M_b x_b + D_b(x_b - h_w) + K_b(x_b - h_w) = -F_m \quad (4.6)$$

$$T_m = K_c F_m \quad (4.7)$$

$$K_b = A_b \rho g \quad (4.8)$$

Όπου, M_b : η μάζα της σηματοδούρας

x_b : η μετατόπιση της σηματοδούρας από το σημείο ισορροπίας

D_b : η σταθερά απόσβεσης

h_w : το ύψος του κύματος

K_b : η σταθερά του ελατηρίου που είναι ανάλογη με το εμβαδόν της σηματοδούρας A_b

F_m : η αντίρροπη δύναμη

T_m : η μηχανική ροπή

K_c : η σχέση μετάδοσης

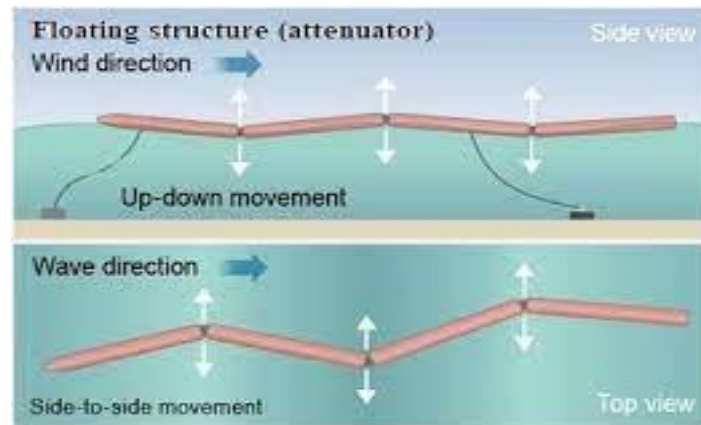
ρ : η πυκνότητα του νερού

g : η σταθερά της βαρύτητας

Για να διατηρεί μία συγκεκριμένη θέση ο σημειακός απορροφητής είναι συνδεδεμένος με το σύστημα ΡΤΟ του μέσω καλωδίου ή απευθείας και στη συνέχεια στο βυθό της θάλασσας. Σημαντικό ρόλο στην απόδοση του μετατροπέα έχει η γεωμετρία, το μέγεθος της σηματοδούρας και η φυσική συχνότητα ταλάντωσης της, αφού θα πρέπει να συνάδει με την συχνότητα των θαλάσσιων κυμάτων της περιοχής όπου θα τοποθετηθεί η κατασκευή, επίσης τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας, που είναι κρίσιμες μεταβλητές για την σωστή λειτουργία και καλύτερη απόδοση της διάταξης.[27] Ο συγκεκριμένος μετατροπέας χρησιμοποιεί γραμμική ηλεκτρική γεννήτρια αποφεύγοντας έτσι την ύπαρξη εξαρτημάτων που είναι πιθανό να αποτύχουν, περισσότερες λεπτομέρειες θα δοθούν σε επόμενη παράγραφο.[7]

4.3.4 Μετατροπέας Εξασθενητής –Attenuator

Ο Εξασθενητής είναι μία πλωτή συσκευή η οποία τοποθετείται σχετικά κοντά στην ακτή αλλά και στα ανοικτά της θάλασσας για μεγαλύτερη αποδοτικότητα και είναι μερικώς βυθισμένο, όπως η πρώτη θαλάσσια φάρμα το έτος 2008 αποτελούμενη από τρεις συσκευές Pelamis των 750kW η οποία βρίσκονταν 5km μακριά από ακτή στην Πορτογαλία.



Σχήμα 4.6 Εξασθενητής- Attenuator

Ο μετατροπέας, αποτελείται από κυλίνδρους τα ονομαζόμενα floaters διαμέτρου 3.5m έως 30m, όπου ανά δύο βρίσκονται οι μονάδες power conversion module (PCM) διαμέτρου 5m που περιέχουν τη συσκευή PTO. Τα floaters συνδέονται με τα PCM μέσω αρθρωτών συνδέσμων με βαθμό ελευθερίας δύο, δηλαδή τους επιτρέπεται να κάνουν μέχρι δύο κινήσεις.



Σχήμα 4.7 Εσωτερικό τμήμα εξασθενητή- PCM

Όσον αφορά τα PTO, χωρίζονται σε δύο ξεχωριστά κομμάτια. Την κύρια μετάδοση η οποία αποτελείται από υδραυλικούς κυλίνδρους και αποθηκεύει το παραγόμενο έργο σε συσσωρευτές Ως υδραυλικό μέσο χρησιμοποιείται συνήθως λάδι, για το συγκεκριμένο θα γίνει λόγος σε επόμενη παράγραφο. Η δευτερεύουσα μετάδοση στην οποία υπάρχουν οι υδραυλικοί κινητήρες που είναι συνδεδεμένοι με τριφασικές ασύγχρονες γεννήτριες και μετατρέπουν την ενέργεια από τους συσσωρευτές σε ηλεκτρική ώστε να μεταφερθεί. Η μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω καλωδίων που συνδέουν τον μετατροπέα με τον βυθό. Η διάταξη έχει σύστημα αγκυροβόλησης που την κρατά σε ένα σημείο, χωρίς όμως να την επηρεάζει στην κίνηση της από την διαρκή κίνηση των κυμάτων.[25] Εν ολίγοις η αρχή λειτουργίας του εξασθενητή βασίζεται στην αποτύπωση της κίνησης των κυμάτων με τον τέτοιο τρόπο ώστε κατά την διάρκεια της κίνησης αυτής να μεταφέρεται στους κυλίνδρους προς δύο κατευθύνσεις, μία παράλληλα και μία κάθετα στην επιφάνεια κίνηση που με την σειρά τους να κινούν τον επόμενο κύλινδρο [27] και να παράγεται “ταυτόχρονα” κι η ηλεκτρική ενέργεια.

4.4 Επίλογος

Στο κεφάλαιο 4 αναλύθηκαν οι κατηγορίες θέσεων και τύπων εφαρμογής στις off-shore διατάξεις κατά τις οποίες λαμβάνεται η μέγιστη κυματική ενέργεια έχοντας όμως και το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις λόγω των υλικών που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν, λόγω της απόστασης για την διανομή της ενέργειας αυτής μέσω καλωδίων, λόγω της προσεκτικής επιλογής των υλικών για τα καλώδια και των ΡΤΟ εξαιτίας των σκληρών συνθηκών της θάλασσας αλλά και λόγω υψηλότερου κόστους συντήρησης. Στις διατάξεις που χρησιμοποιούνται near-shore με μέση τιμή της κυματικής ενέργειας όμως με χαμηλότερου κόστους υλικών και συντήρησης και τέλος των on-shore εφαρμογών, όπου η χρήση πόρων είναι πολύ μικρότερη με απλά εκμεταλλεύσιμη ενέργεια εξαιτίας χαμηλού κυματικού δυναμικού και ανωμαλιών του εδάφους. Επίσης περιγράφονται οι πιο διαδεδομένες κατηγορίες διατάξεων των μετατροπέων ταλαντευόμενης στήλης νερού ΟWC, συσκευών υπερύψωσης ΟΤΔ, των μετατροπέων ταλαντευόμενων σωμάτων όπως οι σημειακοί απορροφητές και οι εξασθενητές. Τέλος η κάθε επιλογή θέσης και αρχής λειτουργίας των διατάξεων ηλεκτροπαραγωγής από τα κύματα έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της αναγράφεται σε κάθε παράγραφο αντίστοιχα.

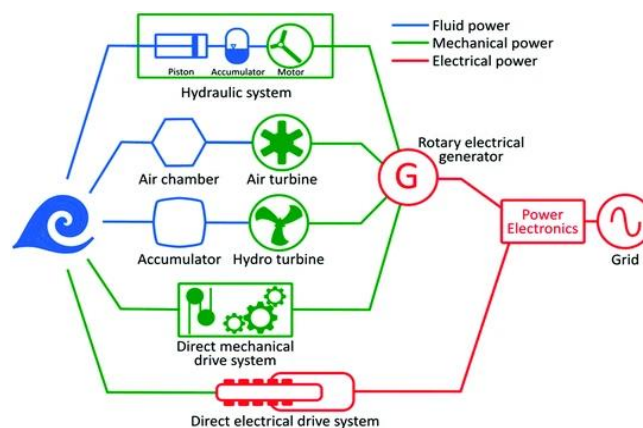
Κεφάλαιο 5ο: Κατηγορίες εξοπλισμού ισχύος

5.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ώστε να επιτευχθεί η μεταφορά η κυματικής ενέργειας στο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής και έπειτα στο δίκτυο. Τις μεθόδους αυτές διαπραγματεύεται το Κεφάλαιο 5 δηλαδή τις τουρμπίνες αέρος, τις παλμικές τουρμπίνες (Impulse Turbines), τα υδραυλικά συστήματα, τις γεννήτριες και αναφορικά όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2.2 τις σηματοδούρες. Ο σωστά επιλεγμένος εξοπλισμός καθορίζει το βαθμό απόδοσης μίας διάταξης ως προς το ωφέλιμο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται και το κόστος αυτής.

5.2 Συσκευές PTO

Μία την βοήθεια των συσκευών PTO (Power Takeoff) επιτυγχάνεται η όλη διαδικασία της μετατροπής κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Μία τέτοια συσκευή έχει ως ρόλο να μεσολαβεί μεταξύ μίας πηγής ενέργειας (στην περίπτωση των WEC, τα κύματα) και μίας διάταξης (ηλεκτροπαραγωγής). Πρόκειται για συσκευές οι οποίες επιτρέπουν την μηχανική ενέργεια της πηγής να φτάσει σε ένα εξοπλισμό ο οποίος δεν διαθέτει δικό του κινητήρα. Όπως φαίνεται και στην Σχήμα 11 τέτοιες συσκευές είναι οι τουρμπίνες αέρος, οι τουρμπίνες Wells, Denniss-Auld, Kaplan, οι παλμικές τουρμπίνες τα υδραυλικά συστήματα και τα συστήματα άμεσης ηλεκτρικής και μηχανικής κίνησης όπου θα γίνει λόγος στην παράγραφο 5.2. [32]

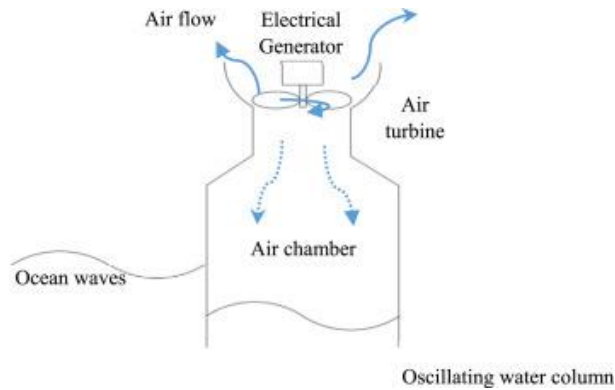


Σχήμα 5.1 Μέθοδοι μετατροπής κυματικής ενέργειας με PTO

Οι συσκευές PTO αποτελούν το 20 με 30% του συνολικού κόστους των διατάξεων αυτών, καθώς η αξιοπιστία και η λειτουργικότητα τους καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα, που είναι το ποσό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.[33]

5.2.1 Τουρμπίνα αέρος

Η τουρμπίνα αέρος (air turbine) έχει ως βασική λειτουργία την συμπίεση του αέρα μέσα σε ένα θάλαμο ως αποτέλεσμα της αυξομείωσης της στάθμης του νερού της θάλασσας, κινώντας τα πτερύγια μία ηλεκτρικής γεννήτριας όπως φαίνεται και στην Σχήμα 14.

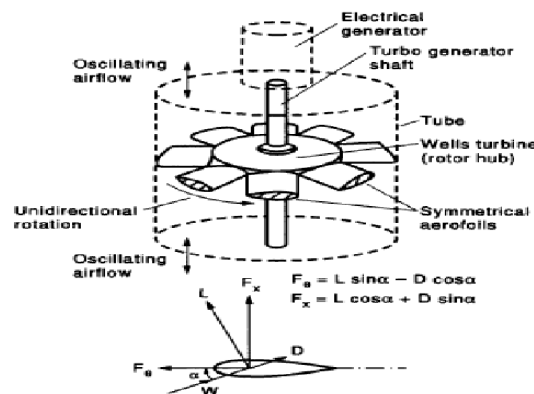


Σχήμα 5.2 Τουρμπίνα αέρος

Λόγω αυτής της αυξομείωσης της πίεσης στο θάλαμο είναι απαραίτητες οι βαλβίδες αντεπιστροφής οι οποίες ελέγχουν την αμφίδρομη κίνηση των πτερυγίων της γεννήτριας. Κρίνονται απαραίτητες, όμως για να μην ξεπεραστεί το κόστος της κατασκευής πρέπει το μέγεθος τους να είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με το θεωρητικό μοντέλο. Μία άλλη επιλογή είναι χρήση αυτό-διορθωμένης τουρμπίνας η οποία στην ουσία μετατρέπει την αμφίδρομη κίνηση σε μονοκατευθυντική όπως τα πτερύγια της τουρμπίνας Wells και της παλμικής τουρμπίνας. [33]

5.2.2 Τουρμπίνα Wells

Η τουρμπίνα Wells είχε εφευρεθεί στα μέσα του 1970 από τον Dr. Allan Wells και έκτοτε χρησιμοποιείται και συνίσταται για διατάξεις OWC σε περιβάλλοντα χαμηλής πίεσης ώστε να αποφευχθεί η αναγκαιότητα ακριβών τεχνολογιών για την προσαρμογή του αέρα και λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής της.[25],[26] Πρόκειται για μία τουρμπίνα αξονικής ροής, αυτόματης ανόρθωσης δηλαδή ο άξονας περιστρέφεται συνεχώς προς στην ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από τη ροή του ανέμου χάρη στην συμμετρική αεροδυναμική που είναι φτιαγμένα τα περύγια της. Όμως η συμμετρία αυτή οδηγεί σε πτώση της απόδοσης κατά την μετατροπή.[25] Ένα σημαντικό γεγονός είναι ότι εγκαθίσταται πλήρως στην ακτή χωρίς να υπάρχουν στοιχεία της διάταξης που να διαβρώνονται από το θαλασσινό νερό, δεν έχει πολλά κινούμενα μέρη με αποτέλεσμα μικρότερη πιθανότητα βλάβης. Σαν μέγιστη απόδοση μίας πλήρους μεγέθους τουρμπίνας η Wells έχει 0.7-0.8 απόδοση, ένα αρκετά καλό εύρος. Φυσικά υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα για την Wells τα οποία προκύπτουν από την αποφυγή άλλων προβλημάτων, όπως και πρέπει να ληφθούν υπόψη [34]. Δηλαδή δημιουργείται θόρυβος λόγω δονήσεων και αεροδυναμικής. Επίσης για την εκκίνηση της τουρμπίνας χρειάζεται ένας κινητήρας ή μία γεννήτρια, γεγονός που δεν την καθιστά άμεσα προτεινόμενη.



Σχήμα 5.3 Τουρμπίνα Wells και προφίλ πτερυγίου

Το μαθηματικό μοντέλο για μία τουρμπίνα αέρος (Well's κλπ) που χρησιμοποιείται δίνεται ως εξής:[16]

$$dP = Ca \times Kt \times \frac{1}{\alpha} \times (V_x^2 + (r \times \omega_t)^2) \quad (4.6)$$

$$T_t = Ct \times Kt \times r \times (V_x^2 + (r \times \omega_t)^2) \quad (4.7)$$

dP : Διαφορική πίεση στο OWC N/m^2

T_t : Παραγόμενη μική ροπή από την τουρμπίνα αέρος Nm

Ca : Συντελεστής εισόδου

Ct : Συντελεστής ροπής

Kt : Η σταθερά της τουρμπίνας

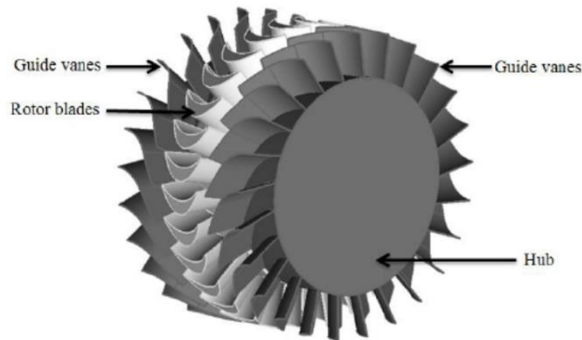
V_x : Απόλυτη αξονική ταχύτητα ροής αέρα m/s

a : Δακτυλιοειδής περιοχή του ρότορα m^2

r : Ακτίνα ρότορα του παλμικού στροβίλου

5.2.3 Παλμική Τουρμπίνα (Impulse Turbine)

Η παλμική τουρμπίνα θεωρείται ο πιο απλός τύπος τουρμπίνας και χρησιμοποιείται ως εναλλακτική λύση στα προβλήματα που δημιουργούνται στην Wells. Η πατέντα της συγκεκριμένης τουρμπίνας εφευρέθηκε το 1975 από τον I.A. Badinsten και χρησιμοποιήθηκε περισσότερο στην Ιαπωνία και ήταν λιγότερο διαδεδομένη στην Ινδία, Κίνα και Ιρλανδία. [26]

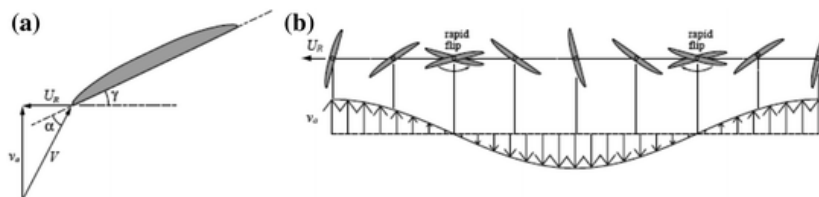


Σχήμα 5.4 Παλμική τουρμπίνα

Πρόκειται για μία αυτό-διορθωμένη τουρμπίνα με δύο σειρές κατευθυντήριων πτερυγίων, όπου περικλείουν συμμετρικά τις λεπίδες του δρομέα όπως φαίνεται στην Σχήμα 14. Ως κύριο ρόλο έχει να επιτρέπει τον συμπιεσμένο αέρα του θαλάμου σε μία διάταξη OWC να διαχέεται άμεσα στον δρομέα, ώστε ο δίσκος να μπορεί να γυρνά ανεξάρτητα από την ροή του αέρα.[33] Επίσης ως κινητήρια δύναμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί το νερό καθώς η παλμική τουρμπίνα χρησιμοποιείται για υψηλές ταχύτητες νερού αλλά μικρού όγκου. [43]

5.2.4 Τουρμπίνα Denniss-Auld

Η τουρμπίνα Denniss-Auld χρησιμοποιήθηκε για την διάταξη MK1 OWC στην Νέα Νότια Ουαλία της Αυστραλίας το 2005. Είναι και αυτή μία αυτό-διορθωμένη τουρμπίνα ακολουθώντας τα πρότυπα της Wells, όπου τα πτερύγια της περιστρέφονται γύρω από την ουδέτερη θέση τους έτσι ώστε η γωνία προσπίπτουσας ροής, ε , να έχει την καλύτερη δυνατή τιμή.[33]

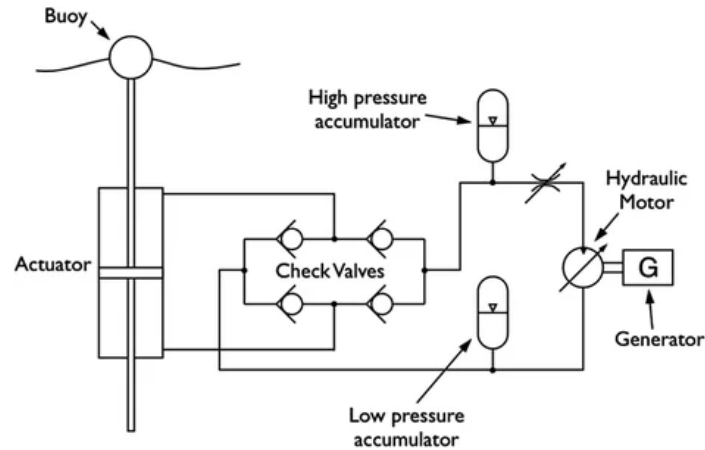


Σχήμα 5.5 Τουρμπίνα Denniss-Auld

Όταν η γωνία ε πάρει την τιμή 0 τα πτερύγια βρίσκονται κατά μήκος του επιπέδου. Με τιμή $\varepsilon = \frac{\pi}{2}$ τα πτερύγια βρίσκονται στο επίπεδο διατομής. Οι λεπίδες του δρομέα μπορούν να διαφοροποιούνται μεταξύ των τιμών, $-\alpha < \varepsilon < \alpha$, όπου $\alpha \cong 55^\circ$ [26] Τα κατευθυντήρια πτερύγια πρέπει να είναι πανομοιότυπα ώστε να επιτευχθεί η σωστή λειτουργία και περιστροφή του δρομέα ελεγχόμενα από την πίεση του θαλάμου των διατάξεων OWC.

5.2.5 Υδραυλικά Συστήματα

Κατά τη δέσμευση ενέργειας από τα κύματα ενδέχεται να υπάρχουν κάποιες προκλήσεις λόγω του μεγάλου ποσού ενέργειας σε συνδυασμό με την χαμηλή ταχύτητα και συχνότητα του κύματος. Για τον λόγο αυτό, τα υδραυλικά συστήματα θεωρούνται τα ιδανικότερα.

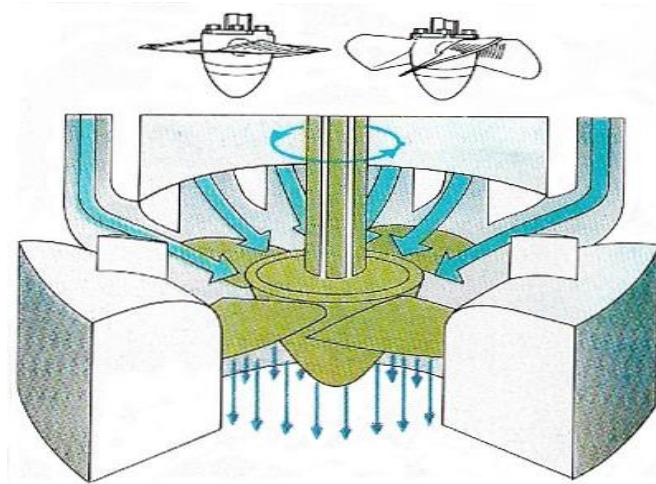


Σχήμα 5.6 Παράδειγμα υδραυλικού συστήματος

Συνήθως χρησιμοποιούνται στις διατάξεις σημειακών απορροφητών ή εξασθενητών όπως φαίνεται και στην Σχήμα 16, όπου μία σηματοδούρα κινείται κάθετα στον άξονα της από τα κύματα κινώντας έτσι τον υδραυλικό κύλινδρο ο οποίος με την σειρά του εξαναγκάζει τις βαλβίδες αντεπιστροφής να ωθήσουν το υγρό προς τον υδραυλικό κινητήρα. Ενδιάμεσοι παράγοντες είναι οι συσσωρευτές αερίων χαμηλής και υψηλής πίεσης που αποθηκεύουν το φορτίο που δέχονται από τις βαλβίδες για την εξομάλυνση της κυματικής ενέργειας ώστε να δώσει κίνηση στην γεννήτρια με σταθερή ταχύτητα. Το γεγονός που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα είναι η σωστή επιλογή του υγρού-λαδιού που θα χρησιμοποιηθεί στα υδραυλικά συστήματα καθώς αποτελεί περιβαλλοντικό βάρος. Για να αποφευχθεί η χρήση μη βιοδιασπώμενων και φιλικών προς το περιβάλλον υγρό μπορούν να εκμεταλλευτούν το θαλασσινό νερό με τη χρήση των υδραυλικών τουρμπινών που εμφανίζεται κυρίως στις OTD διατάξεις ή στα συστήματα υδραυλικών αντλιών. [35]

5.2.6 Τουρμπίνα Kaplan

Η τουρμπίνα Kaplan αναπτύχθηκε από τον Αυστριακό μηχανικό Βίκτωρ Καπλάν περίπου το 1915 και θυμίζει προπέλα πλοίου.[36] Ανήκει στις υδραυλικές τουρμπίνες, οι οποίες όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο χρησιμοποιούν ως μέσο κίνησης των προπελών το θαλασσινό νερό με αξονική ροή.



Σχήμα 5.7 Τουρμπίνα Kaplan

Καθώς διαχέεται το νερό στις φτερωτές αλλάζει η τιμή της πίεσης του με αποτέλεσμα να χάνει ισχύ. Η ισχύς αυτή ανακτάται όταν το υγρό φτάσει στην κεφαλή της τουρμπίνα και από το υπόλοιπο τρεχούμενο νερό. Οι υδραυλικές τουρμπίνες χρησιμοποιούνται σε μετατροπείς υπερύψωσης OTD και προσφέρουν έως και 90% αποδοτικότητα και θεωρούνται φιλικές προς το περιβάλλον.[33]

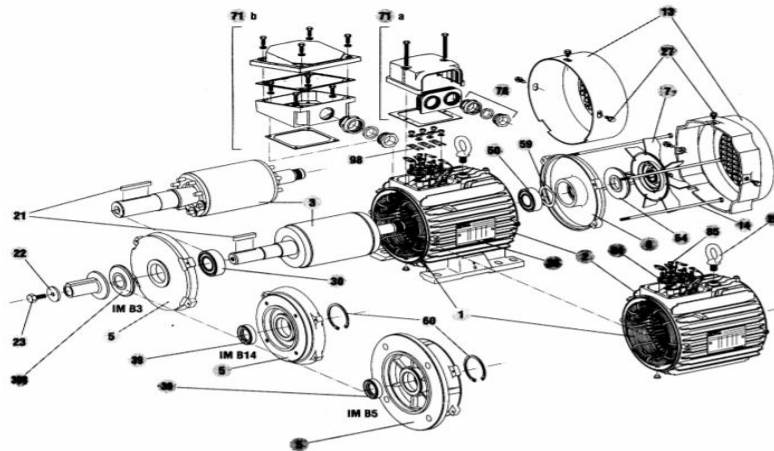
5.3 Συσκευές PTO άμεσης μετατροπής κίνησης

Λόγω μεγάλου κόστους και όγκου πολλών εξαρτημάτων και συντήρησης αυτών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το κυματικό δυναμικό, δημιουργήθηκε η ανάγκη για πιο μικρές με ίδια ή μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης συσκευές χωρίς την ανάγκη επιπλέον εξαρτημάτων. Για τον λόγο αυτό οι επαγωγικές, σύγχρονες μηχανές και οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών ή μη καθώς και οι γραμμικές γεννήτριες μόνιμων μαγνητών λύνουν αρκετά προβλήματα που δημιουργούνται κατά την χρήση άλλων PTO, δημιουργώντας όμως άλλα ίσως πιο διαχειρίσιμα ανάλογα με την εφαρμογή. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα παραπάνω.

5.3.1 Επαγωγική μηχανή με βραχυκυκλωμένο κλωβό (SCIG)

Οι επαγωγικές μηχανές με βραχυκυκλωμένο κλωβό χρησιμοποιούνται λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής αξιοπιστίας τους. Δεν απαιτούν μεγάλη ανάγκη για συντήρηση και παρέχουν την δυνατότητα χρήσης τους σε δυσμενή περιβάλλοντα όπως είναι αυτό της θάλασσας.[4] Οι μηχανές/γεννήτριες αποτελούνται από τον δρομέα, ο οποίος συντίθεται από μονωμένα μεταξύ τους ελάσματα προσαρμοσμένα στον άξονα. Τα ελάσματα τα οποία φέρουν οδοντώσεις σχηματίζοντας κατά αυτό τον τρόπο αυλακώσεις κατά μήκος του δρομέα. Στις αυλακώσεις που δημιουργούνται τοποθετείται τριφασικό τύλιγμα ράβδοι δηλαδή από χαλκό ή ορείχαλκο και τα άκρα τους ενώνονται μεταξύ τους με δακτυλίους βραχυκύκλωσης σε σύνδεση αστέρα.[4],[39]

Αποτελούνται επίσης από τον κεντρικό άξονα της μηχανής/γεννήτριας, τα ρουλεμάν, τον ανεμιστήρα και το κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης, όπως φαίνεται και στην Σχήμα 19 παρακάτω.



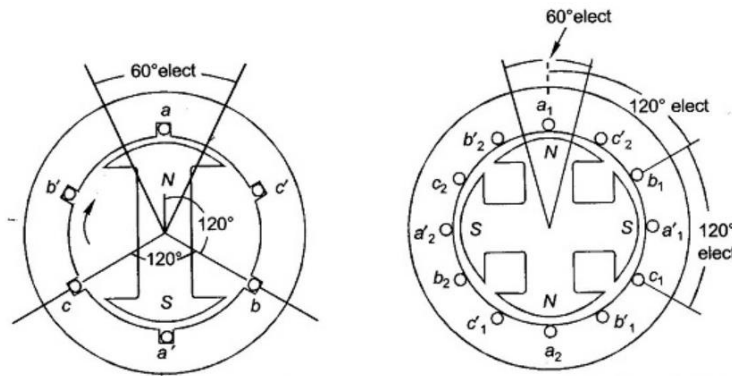
Σχήμα 5.8 Εξαρτήματα επαγωγικής μηχανής βραχυκυκλωμένου κλωβού

Η σύνδεση αυτή των δακτυλίων και με των ψηκτρών δίνει την δυνατότητα σύνδεσης ρυθμιστικών αντιστάσεων που στην ουσία η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει κατά πόσο μπορεί να τροποποιηθεί η χαρακτηριστική ταχύτητα-ροπή του κινητήρα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.[39]

Στο τύλιγμα του κλωβού του δρομέα τα ρεύματα που δημιουργούνται επάγονται από το μαγνητικό πεδίο του στάτη και η ταχύτητα του δρομέα είναι διαφορετική από αυτή του στρεφόμενου πεδίου του στάτη.[4] Τέλος η αρχή λειτουργίας των SCIG είναι όμοια με εκείνη του μετασχηματιστή.[4]

5.3.2 Σύγχρονη Γεννήτρια (SG)

Η αρχή λειτουργίας των σύγχρονων γεννητριών είναι απλή. Η διαφορά με την SCIG βρίσκεται στην υλοποίηση και τη λειτουργία του δρομέα, δηλαδή στην σύγχρονη γεννήτρια παράγει αυτόνομα μαγνητικό πεδίο B_r . Το πεδίο του δρομέα στις SG παράγεται είτε μέσω του dc ρεύματος διέγερσης, όπου το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα μέσω δύο δακτυλίων που εφάπτονται με τις ψήκτρες στον άξονα του δρομέα, είτε μέσω μόνιμων μαγνητών που θα αναλυθεί περισσότερο στην επόμενη παράγραφο. Όσο ο δρομέας περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο B_r στρέφεται με την ίδια ταχύτητα και προσδίδει στο τύλιγμα του στάτη τριφασικές τάσεις, οι οποίες έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 120° . Όπως αναγράφεται και στο σχήμα 20.[4] Στις σύγχρονες γεννήτριες ο στάτης έχει την ίδια μορφή με αυτή των επαγωγικών μηχανών και αποτελείται από μία κυλινδρική δομή. Η δομή αυτή κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα που σχηματίζουν αυλακώσεις.



Σχήμα 5.9 Σύγχρονη γεννήτρια -i- Δύο πόλων, -ii- Τεσσάρων πόλων

Στον στάτη τα ρεύματα και οι τάσεις που δημιουργούνται μπορούν να θεωρηθούν ημιτονοειδούς μορφής καθώς στις αυλακώσεις που δημιουργούνται σε αυτόν (στον στάτη) εισάγεται το τριφασικό τύλιγμα της μηχανής το οποίο συνδέεται σε σύνδεση αστέρα ή τριγώνου. Η συχνότητα των τάσεων στο στάτη ω_e , εξαρτάται από δύο μεταβλητές, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (4.8) και έχει ως μονάδα μέτρησης (rpm):

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m \Rightarrow f_e = \frac{P}{120} \cdot n_m \quad (4.8)$$

Όπου $\omega_e = 2\pi f_e$: η κυκλική συχνότητα τροφοδοσίας του στάτη

P : ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας

ω_m : η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

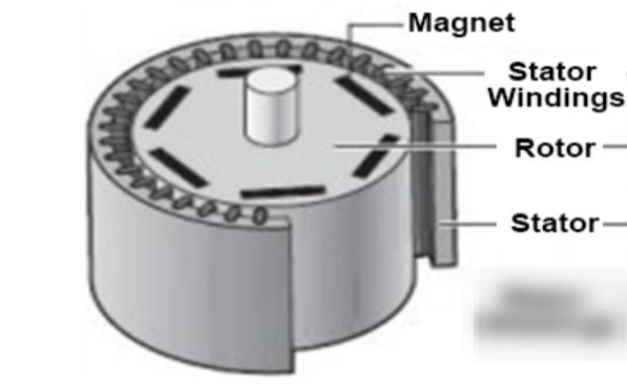
f_e : η συχνότητα των τάσεων

n_m : η ταχύτητα του δρομέα

Οι σύγχρονες μηχανές έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν είτε ως γεννήτριες είτε ως κινητήρες ανάλογα με την εφαρμογή που επιλεγούν. Τέλος, για εγκυκλοπαιδικές γνώσεις αναφέρεται ότι οι σύγχρονες γεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την μορφή του δρομέα, στις σύγχρονες μηχανές με κυλινδρικό δρομέα ή κυλινδρικούς πόλους και στις μηχανές με έκτυπους πόλους όπως εικονίζεται και στην Σχήμα 20. [4]

5.3.3 Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PMSG)

Για τις σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη οι επιστήμονες εκμεταλλεύτηκαν το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Άγγλου φυσικού Μιχαήλ Φαραντέυ το έτος 1831 κατά το οποίο όταν ένα πηνίο περιστρέφεται μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στις άκρες του πηνίου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. [40] Και αυτή η γεννήτρια αποτελείται από δύο κύρια μέρη, τον ρότορα ο οποίος είναι το επαγωγίμο κινητό μέρος και περιβάλλεται από τα πηνία και τον στάτη που παραμένει ακίνητος περιβαλλόμενος από τους μαγνήτες. Το μαγνητικό υλικό συντίθεται από νεοδύμιο σίδηρο βορίου περιέχοντας σπάνιες γαίες με αποτέλεσμα το κόστος να είναι πολύ υψηλό σε σχέση με αυτό των συμβατικών σύγχρονων μηχανών με διέγερση.[4],[41]

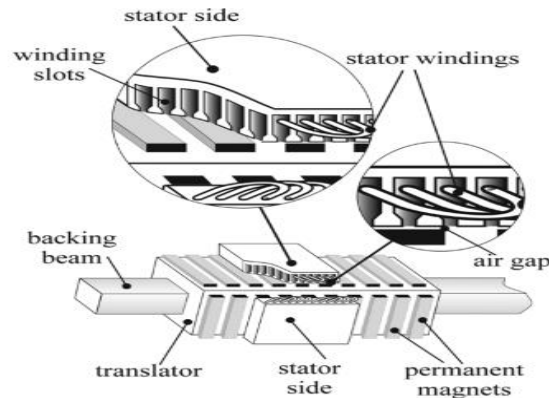


Σχήμα 5.10 Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PMSG)

Ανήκουν στην κατηγορία των αυτοδιεγερόμενων μηχανών και τροφοδοτούνται από έναν ημιτονοειδή παλμό.[40] Αναφορικά οι LPSG διακρίνονται σε δύο τύπους ανάλογα με τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα, δηλαδή στις μηχανές ακτινικής ροής (radial flux), όπου το τύλιγμα του στάτη τοποθετείται κατά την διεύθυνση του άξονα και το μαγνητικό πεδίο έχει ακτινική διεύθυνση όπως προδίδει και το όνομα της. Ο δεύτερος τύπος LPSG αφορά τις μηχανές αξονικής ροής (axial flux) κατά τις οποίες λειτουργεί αντίθεση σχεδίαση, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο τοποθετείται κατά τον άξονα της μηχανής, ενώ το τύλιγμα του στάτη τοποθετείται ακτινικά. [4] Τέλος με βάση την τοποθέτηση των μαγνητών στον δρομέα οι PMSG χωρίζονται εξίσου σε ακόμη δύο τύπους γεννητριών, τις γεννήτριες εσωτερικού μαγνήτη και τις γεννήτριες έκτυπων πόλων.[40]

5.3.4 Γραμμική Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PLMG)

Η γραμμική γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιεί την ευθύγραμμη κίνηση για την παραγωγή ρεύματος και έχει την δυνατότητα να μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική χωρίς την βοήθεια των συσκευών PTO, δηλαδή για την άμεση μετάδοση της κίνησης του προσπίπτοντος κύματος, δεν απαιτείται πολύπλοκο μηχανικό σύστημα καθώς επίσης δεν είναι αναγκαία η ύπαρξη κυκλώματος ελέγχου για την συγκεκριμένη γεννήτρια. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πυκνότητα και ο συντελεστής ισχύος να είναι αρκετά υψηλοί.



Σχήμα 5.11 Γραμμική γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. (PLMG)

Η αρχή λειτουργίας της PLMG είναι αρκετά απλή. Ανάλογα με την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθούν ένας, δύο ή περισσότεροι μαγνήτες στη συσκευή παράγουν ηλεκτρισμό από την γραμμική κίνηση τους καθώς δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο ανάμεσα στους μαγνήτες και τα δυναμοελάσματα. Υπάρχουν οπές από όπου διέρχεται ο αέρας ώστε να συμπιεστεί στα ελατήρια και να συνεχίσει η γραμμική κίνηση των μαγνητών δίνοντας ξανά την απαραίτητη ώθηση.[42]

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται η δομή μίας γραμμικής γεννήτριας, η οποία αποτελείται από τους μόνιμους μαγνήτες που μπορεί να έχουν για παράδειγμα κυλινδρικό σχήμα, να είναι ορθογώνια ή να μοιάζουν με δαχτυλίδια. Ο στάτης που είναι φτιαγμένος συνήθως από ελάσματα μικρού πάχους τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους με ρητίνες ή από περιελίξεις χαλκού με στόχο τη μείωση απωλειών δινορευμάτων τα οποία προκαλούν θέρμανση του πυρήνα και είναι ανάλογα με το μήκος της διαδρομής.[4] Και τέλος από τις οπές που διέρχεται αέρας για την ώθηση των μαγνητών με αποτέλεσμα την συνέχιση της κίνησης τους.

Η γραμμική γεννήτρια μόνιμων μαγνητών δεν εκπέμπει ρύπους CO² καθώς για την λειτουργία της δεν χρειάζεται κάποιο ορυκτό καύσιμο. Θεωρείται κατάλληλη για εφαρμογές παράκτιων σταθμών. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν αρκετά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν ώστε να είναι πιο αποτελεσματική και βιώσιμη επιλογή η γεννήτρια, όπως για παράδειγμα ο απομαγνητισμός των μόνιμων μαγνητών λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργείται κατά την διάρκεια της λειτουργίας της. Επίσης κατά τον κύκλο εργασίας της γεννήτριας παράγεται αρκετός θόρυβος και δονήσεις. Τέλος το κόστος παραμένει υψηλό λόγω των υλικών των μαγνητών τα οποία προέρχονται από σπάνια πετρώματα της γης.[42]

5.4 Επίλογος

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται ο εξοπλισμός ισχύος για τις διάφορες διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής από τα κύματα. Για την ‘εξόρυξη’ της κυματικής ενέργειας χρειάζονται συσκευές οι οποίες να μπορούν να μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτές είναι όπως προαναφέρθηκαν οι επαγωγικές, σύγχρονες μηχανές και οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών ή μη καθώς και οι γραμμικές γεννήτριες μόνιμων μαγνητών. Οι περισσότερες συσκευές που αναφέρονται στο Κεφάλαιο αυτό ακολουθούνται συνήθως από κυκλώματα ελέγχου, μετατροπείς και μετά καταλήγουν στο δίκτυο όπως θα περιγραφούν και στο επόμενο Κεφάλαιο 6.

Κεφάλαιο 6ο: Έλεγχος συστημάτων PTO

6.1 Εισαγωγή

Το εύρος συχνοτήτων των κυμάτων διαφοροποιείται ανάλογα με το χρόνο, την εποχή και τα αναπάντεχα έντονα καιρικά φαινόμενα, καταιγίδες, παλίρροιες και άλλα. Το εύρος συχνοτήτων όμως των μετατροπέων είναι στενό με αποτέλεσμα την ανάγκη κυκλωμάτων ελέγχου αυτών των διαταραχών της ζώνης συχνοτήτων προσαρμογής ανάλογα τις συσκευές. [33] Βέβαια, τα κυκλώματα ανόρθωσης κατανέμονται σε ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα. Τα κυκλώματα ελέγχου χρησιμοποιούνται στις περισσότερες διατάξεις και αναφέρονται στον έλεγχο της παραγόμενης τάσης από το σύστημα μετατροπής κυμάτων μέσω της αλλαγής του κύκλου λειτουργίας (duty cycle) των μετατροπέων και της γωνίας έναυσης (firing angle). Σε ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή, η τάση εξόδου μπορεί να προσαρμοστεί και να ρυθμιστεί μόνο από την συχνότητα και της τάση εισόδου, όπως για παράδειγμα σε γεννήτριες υψηλής αυτεπαγωγής.[13]

6.2 Άμεσα Ελεγχόμενοι Ανορθωτές- Directly controlled rectifiers

Στα κυκλώματα άμεσου ελέγχου, η παραγόμενη τάση των διατάξεων ισχύος μπορεί να ελεγχθεί και να αλλάξει ύστερα από την διαφοροποίηση της γωνίας έναυσης (firing angle) και του κύκλου λειτουργίας του (duty cycle). Στην παράγραφο αυτή θα γίνει λόγος για την σημαντική μεταβλητή συντελεστή ισχύος PF, ο δείκτης δηλαδή της ωφέλιμης ισχύς από την πηγή στο φορτίο και δύο ελεγχόμενων ανορθωτών, και θα γίνουν απλές αναφορές PWM και γέφυρας διόδου με ενισχυτή DC/DC.

6.2.1 Συντελεστής Ισχύος- PF

Σκοπός είναι να διατηρείται σε υψηλή τιμή ο συντελεστής ισχύος, περίπου κοντά στη μονάδα έτσι ώστε να επιτυγχάνονται υψηλές αποδόσεις μεταξύ της γεννήτριας και του μετατροπέα με αποτέλεσμα την μεταφορά της πραγματικής ισχύος για την μέγιστη αξιοποίηση της μηχανής, καθώς επίσης κρατούνται χαμηλές οι αρμονικές της μηχανής και του κυκλώματος ανορθωτή. [13]

Ο συντελεστής ισχύος ορίζεται από τον λόγο της πραγματικής ισχύος προς την φαινομενική ισχύ δηλαδή,[13]

$$PF = \frac{\text{Πραγματική ισχύς}}{\text{Φαινομενική ισχύς}} = \frac{P}{S} \quad (6.1)$$

Όπου,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt \quad (6.2)$$

Με τις μεταβλητές v_i να αναπαριστούν τις σειρές Fourier, όπου α_{vn} και α_{in} η καθυστέρηση φάσης των κυματομορφών τάσης και ρεύματος αντίστοιχα.

$$v = \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{2V_n} \sin(n\omega t + \alpha_{vn}) \quad (6.3)$$

$$i = \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{2I_n} \sin(n\omega t + \alpha_{in}) \quad (6.4)$$

$$S = VI \quad (6.5)$$

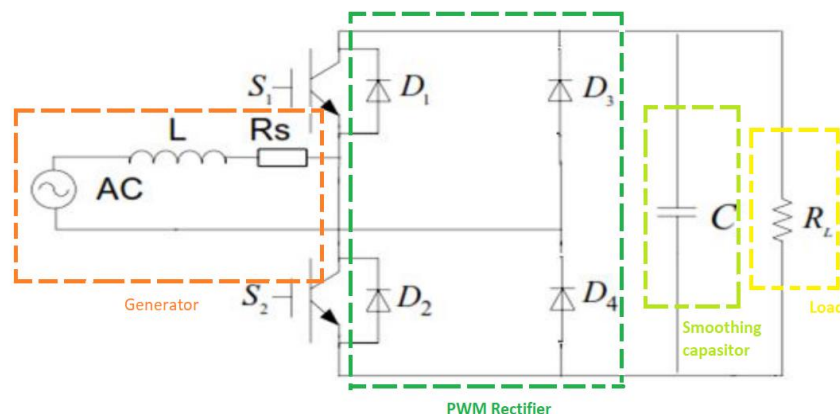
Και τις τιμές RMS να αναπαρίστανται από τις V και I

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (6.6)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (6.7)$$

6.2.1 Ανορθωτής πλάτους παλμού- PWM

Η χρήση ενός ανορθωτή PWM εξασφαλίζει τον γραμμικό έλεγχο ενός ρότορα- κινητήρα ώστε να παρέχεται μία σταθερή τάση και τον συντελεστή ισχύος να είναι κοντά στην μονάδα, όπως φαίνεται στις προδιαγραφές του Πίνακα 6.3. Χρησιμοποιείται γενικότερα σε εφαρμογές όπου απαιτείται μετατροπή από εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή καθώς θεωρείται η πιο καλή λύση. Εμφανίζονται όμως κάποια προβλήματα, ειδικότερα με θέματα ψύξης λόγω απαίτησης υψηλής συχνότητας μεταγωγής δηλαδή, αριθμού κύκλων λειτουργίας αναμετάδοσης και απελευθέρωσης ανά μονάδα χρόνου για την διατήρηση ημιτονοειδούς κυματομορφής του ρεύματος και αποφυγή αρμονικών.



Σχήμα 6.1 Ανορθωτής πλάτους παλμού- PWM

Πίνακας 6.3 Προδιαγραφές Ανορθωτή

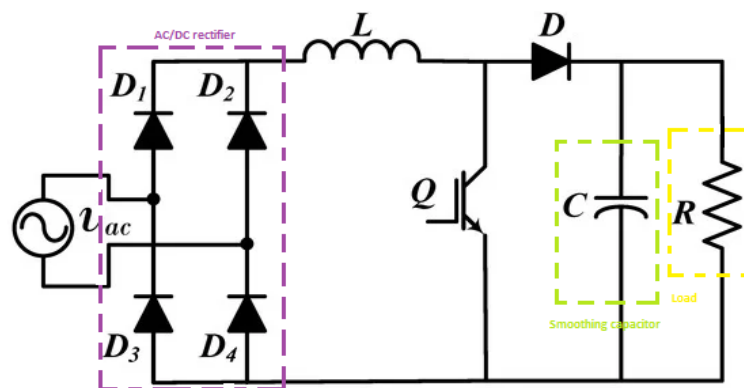
Ανορθωτής	Συντελεστής Ισχύος - PF	Ισχύς Εξόδου (kW)	Τάση Εξόδου (V)	Απόδοση η	Απώλειες μεταγωγής
PWM	≈ 1	2.685	73.76	91%	283

Η τιμή της συνεχούς τάσης DC εξόδου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση ροής του ρεύματος (Back EMF voltage) ώστε να μπορεί να λειτουργεί ο ανορθωτής, διαφορετικά, όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 22 ο PWM λειτουργεί ως ανορθωτής πλήρους γέφυρας επιφορτίζοντας τον πυκνωτή εξομάλυνσης στην μέγιστη τιμή της πηγής.

Για να μπορέσει να ελεγχθεί το ρεύμα εισόδου θα πρέπει η τάση εξόδου να είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου.[15]

6.3 Γέφυρα διόδου με ενισχυτή DC/DC

Σε αυτό τον ανορθωτή γίνεται πρώτα μετατροπή του εναλλασσόμενου σήματος εισόδου σε συνεχές με τον AC/DC rectifier όπως φαίνεται στο Σχήμα 23 και μετά ενισχύεται μέχρι την επιθυμητή τιμή και μπορεί να ελέγχεται. Η λειτουργία της γέφυρας διόδων είναι παρόμοια με αυτή του PWM, με την διαφορά ότι χρησιμοποιούνται δύο διακόπτες ανά μισό κύκλο εργασίας ώστε να μειώνονται οι απώλειες μεταγωγής, όπως φαίνεται και στις προδιαγραφές του ανορθωτή στον Πίνακα 4, όμως το ρεύμα φάσης δεν είναι ακριβώς ημιτονοειδές προκαλώντας αρμονικές.[13]



Σχήμα 6.2 Γέφυρα διόδου με ενισχυτή DC/DC

Πίνακας 6.4 Προδιαγραφές Ανορθωτή

Ανορθωτής	Συντελεστής Ισχύος - PF	Ισχύς Εξόδου (kW)	Τάση Εξόδου (V)	Απόδοση η	Απώλειες μεταγωγής
Γέφυρα διόδου με ενισχυτή DC/DC	0.988	2.615	87.16	93%	179

6.4 Μη Ελεγχόμενοι Ανορθωτές

Με τη χρήση μη ελεγχόμενων ανορθωτών παρέχονται χαμηλότερες απώλειες μεταγωγής, Ο αριθμός των εξαρτημάτων που αποτελούνται είναι σημαντικά μικρότερος σε σχέση με τους ελεγχόμενους ανορθωτές [15] προσδίδοντας έτσι μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο σύστημα και αποδοτικότητα. Ένα βασικό μειονέκτημα όμως είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος PF λόγω της τάσης εξόδου η οποία μετατρέπεται συναρτήσει του πλάτους της τάσης εισόδου. Βέβαια ο συντελεστής μπορεί να βελτιωθεί αν γίνει μείωση της αυτεπαγωγής του μηχανήματος.

Αναφορικά για εγκυκλοπαιδικές γνώσεις υπάρχουν ο ανορθωτής μεταβλητού πυκνωτή, ο οποίος προστίθεται σε σειρά με την γεννήτρια για να βελτιωθεί ο συντελεστής ισχύος αντισταθμίζοντας την επαγωγική αντίδραση. Η οικογένεια αντισταθμιστών σειράς που αποτελείται από τους MERS, SVC, TSSC, FCSC, TCSC, οι οποίοι μπορούν να μεταβάλλουν την χωρητικότητα ώστε να ελέγχεται η περίοδος μεταγωγής της γεννήτριας και να βελτιώσουν τον συντελεστή και την απόδοση του όλου συστήματος. Τέλος υπάρχει και ο μη ελεγχόμενος ανορθωτής γέφυρας διόδου ο οποίος παρέχει στην έξοδο μία DC τάση για οποιαδήποτε AC τάση εισόδου.[15]

6.5 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε αναφορά σε κάποια από τα συστήματα ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο διατάξεων ηλεκτροπαραγωγής από θαλάσσια κύματα.

Συγκριτικά ο ανορθωτής PWM και ο ανορθωτής γέφυρας DC/DC δεν διαφέρουν στα αποτελέσματα τους ως προς τον συντελεστή ισχύος PF καθώς και οι δύο βρίσκονται πολύ κοντά στην μονάδα και η αποδοτικότητα τους είναι 91% και 93% αντίστοιχα. Όμως η τάση εξόδου της γέφυρας είναι ελαφρώς πιο υψηλή με αποτέλεσμα το ρεύμα να μειώνεται καθώς και οι απώλειες αγωγιμότητας και μεταγωγής καταλήγοντας έτσι σε υψηλότερη απόδοση.

Όσον αφορά τους μη ελεγχόμενους ανορθωτές μπορεί να αποτελούνται από λιγότερα εξαρτήματα όμως ο συντελεστής ισχύος είναι αρκετά μικρότερος με αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερη μελέτη ως προς την επιλογή τους.

Βέβαια υπάρχουν και άλλες συσκευές που μπορούν να αξιοποιηθούν σε διάφορες διατάξεις, όμως για εγκυκλοπαιδικούς σκοπούς έγινε αναφορά στους πιο γνωστούς.

Κεφάλαιο 7ο: Προσομοίωση συστήματος OWC

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρουσίαση της προσομοίωσης ενός μετατροπέα ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (OWC) χρησιμοποιώντας την τουρμπίνα Wells με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης MatLab/SimuLink. Στην ουσία θα δοθούν παράμετροι- η εξίσωση ενός κύματος χρησιμοποιώντας την ως είσοδο στην τουρμπίνα Wells, η οποία επιλέχθηκε ύστερα από έρευνα ως η πιο κατάλληλη για την διάταξη αυτή. Θα δοθούν αναλυτικότερες πληροφορίες γι' αυτήν με εξισώσεις, διαγράμματα από το πρόγραμμα προσομοίωσης και τα αποτελέσματα της.

7.2 Θεωρητικές εξισώσεις για την τουρμπίνα Wells

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.2 του Κεφαλαίου 5, η τουρμπίνα Wells είναι μία τουρμπίνα αξονικής ροής, της οποίας η κίνηση των περυγίων είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση του αέρα, γεγονός που την καθιστά την καταλληλότερη συσκευή καθώς η αυξομείωση της πίεσης του αέρα που δημιουργείται στην στήλη από την ταλάντωση των κυμάτων, δημιουργεί και διαφορετική κατεύθυνση του αέρα.

Οπότε ως είσοδο στην τουρμπίνα Wells θεωρείται η πίεση που δημιουργείται από την αποσυμπίεση των κυμάτων, στον ρότορα της τουρμπίνας.[44]

$$dP = C_s \times K \times \frac{1}{a_t} [V_x^2 + (r_t \omega_t)^2] \quad (7.1)$$

Η ροπή T_t της τουρμπίνας δίνεται ως εξής:

$$T_t = C_t \times K \times r_t \times [V_x^2 + (r_t \omega_t)^2] \quad (7.2)$$

Η σταθερά της τουρμπίνας:

$$K = \frac{\rho_a \times n \times l \times b_t}{2} \quad (7.3)$$

Ο συντελεστής ροής της τουρμπίνας:

$$\varphi = \frac{V_x}{r_t \times \omega_t} \quad (7.4)$$

Ο ρυθμός ροής:

$$Q = a_t V_x \quad (7.5)$$

Η ισχύς:

$$P_{in} = dp \times Q \quad (7.6)$$

Η απόδοση της τουρμπίνας Wells:

$$\eta = \frac{\omega_t \times T_t}{dp \times Q} = \frac{C_t}{C_a \times \varphi} \quad (7.7)$$

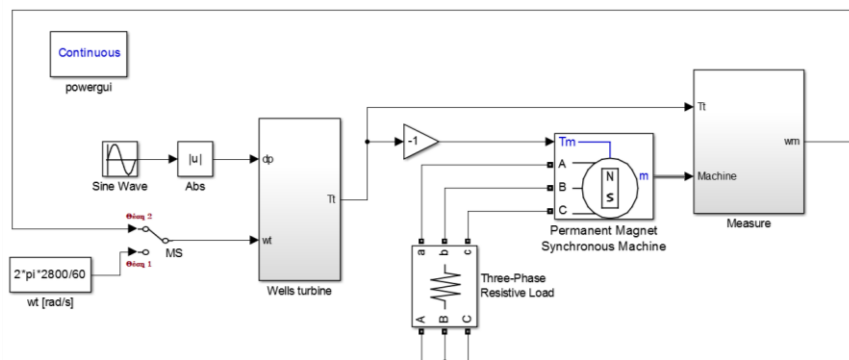
Όπου dp είναι η πτώση πίεσης στον ρότορα και βοηθά στον υπολογισμό της V_x , η οποία με την σειρά της υπολογίζεται μαζί με την γωνιακή ταχύτητα ω_t για το αποτέλεσμα του συντελεστή ροής φ . Ο συντελεστής ισχύος συμβολίζεται με C_a και ο συντελεστής ροπής με C_t και προσδιορίζουν την ροπή της Wells. Τέλος, r_t είναι η μέση ακτίνα της τουρμπίνας και ω_t η γωνιακή ταχύτητα της.

7.3 Παράμετροι-στοιχεία για την προσομοίωση στο πρόγραμμα Simulink

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει η προσομοίωση ενός WEC και συγκεκριμένα για την ταλαντευόμενη υδάτινη στήλη -OWC στο πρόγραμμα Simulink αντλήθηκαν από το επιστημονικό άρθρο των Fares M'zoughi, Soufiene Bouall'egue και Mounir Ayadi που στην βιβλιογραφία αναφέρεται ως [45]. Παρακάτω παρατίθενται τα στιγμιότυπα (κυματομορφές) της τουρμπίνας Wells με σταθερή ταχύτητα στις 2800rpm με 7.000dp και στις 3.000rpm με 12.000dp, του ολικού συστήματος με την ηλεκτρογεννήτρια των 30kW και τα παραγόμενα τριφασικά ρεύματα από την ηλεκτρογεννήτρια στο τριφασικό φορτίο 10Ω και 5Ω, με τα αντίστοιχα μοντέλα, του ολικού συστήματος, της τουρμπίνας Wells και το πλαίσιο μετρήσεων. [45]

7.4 Μοντέλο Συστήματος- Simulink

Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται το μοντέλο του συστήματος στη Simulink χρησιμοποιώντας ως είσοδο τα χαρακτηριστικά του κύματος όταν ο διακόπτης MS βρίσκεται στην Θέση 1 και τα σταθερά χαρακτηριστικά της τουρμπίνας Wells όταν βρίσκεται στην Θέση 2. Η τουρμπίνα που χρησιμοποιείται είναι όπως έχει προαναφερθεί η τουρμπίνα Wells, υπάρχει το τριφασικό φορτίο και η σύγχρονη ηλεκτρογεννήτρια μόνιμου μαγνήτη PSMG. Στο τέλος του μοντέλου είναι τοποθετημένο το πλαίσιο μετρήσεων από όπου αντλούνται οι πληροφορίες για τις κυματομορφές που σχηματίζονται ανάλογα με τη θέση του διακόπτη MS και τα χαρακτηριστικά του κύματος και της τουρμπίνας Wells.



Σχήμα 7.1 Μοντέλο Simulink

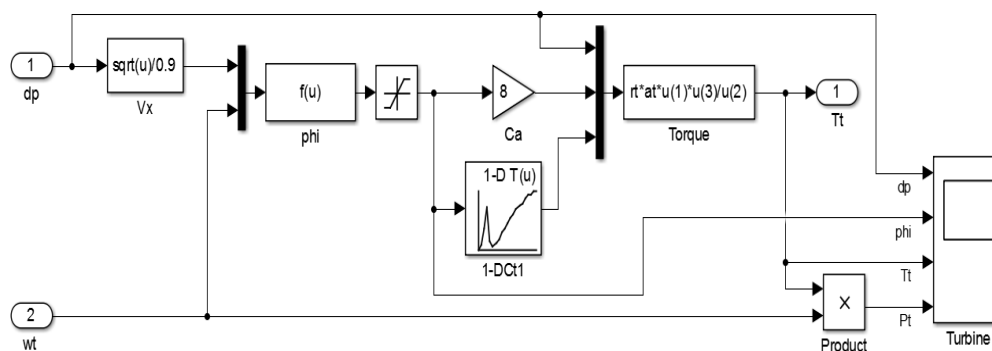
7.5 Μοντέλο τουρμπίνας Wells- Simulink

Σε όλη την έκταση της παραγράφου 7.5 υποθέτουμε ότι διακόπτης MS βρίσκεται στην Θέση 1. Το συγκεκριμένο μοντέλο αντικατοπτρίζει το εσωτερικό της Wells turbine που βρίσκεται στο Σχήμα 7.1 της παραγράφου 7.4. Η εξίσωση V_x της ταχύτητας ροής του αέρα από την τουρμπίνα υπολογίζεται από την εξίσωση 7.1 με την βοήθεια των τιμών όπως φαίνεται στον Πίνακα 5 με τις παραμέτρους για την προσομοίωση της τουρμπίνας και χρησιμοποιείται για την είσοδο του συντελεστή ροής ϕ .

Πίνακας 7.5 Παράμετροι για προσομοίωση τουρμπίνας Wells

n	b	K	a_t	r_t
8	0.4	0.7079	1.1763	0.7285

Ο συντελεστής ροής ϕ υπολογίζεται από την εξίσωση 7.4 και βοηθά στην εύρεση των συντελεστών ισχύος και ροπής για την δημιουργία των γραφημάτων τους.



Σχήμα 7.2 Μοντέλο τουρμπίνας Wells- Simulink

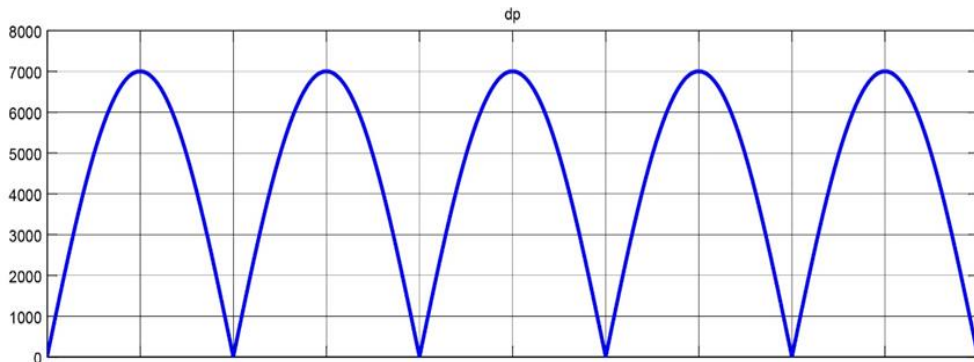
Το διάγραμμα του συντελεστή ισχύος C_a είναι γραμμικό. Το διάγραμμα του συντελεστή ροπής παίρνει τιμές από 0 έως 2 με βήμα 0,1 με μέγιστη τιμή 0,34 και συντελεστή ροής 0,3. Η ροπή της τουρμπίνας αναφέρεται στην εξίσωση 7.8 παρακάτω και υπολογίζεται με βάση τις προηγούμενες εξισώσεις και παραμέτρους ως εξής,

$$T_t = \frac{r_t \times a_t \times C_t}{C_a} dp \tag{7.8}$$

7.5.1 Σταθερή ταχύτητα $\omega=2800\text{rpm}$ και πλάτος $\Delta p_1=7000\text{Pa}$

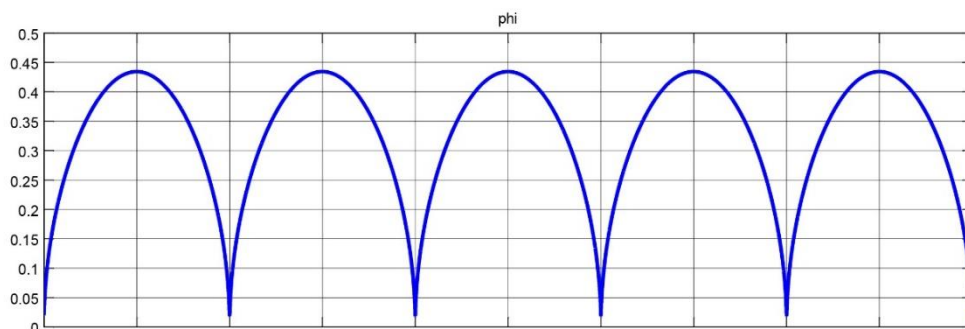
Για την εκκίνηση της τουρμπίνας εφαρμόζεται στην είσοδο ένα ημοτονοειδές σήμα, πτώση πίεσης με σταθερή ταχύτητα 2800rpm , πλάτους 7000Pa και συχνότητα f ίση με $2\pi/20\text{ rad/sec}$ δηλαδή $0,1\pi\text{t}$ όπως φαίνεται και στην εξίσωση 7.4 η οποία αντιπροσωπεύει πόσο δυνατό είναι το κύμα:

$$|7000 \sin(0.1\pi t)| P_{a1} \quad (7.9)$$



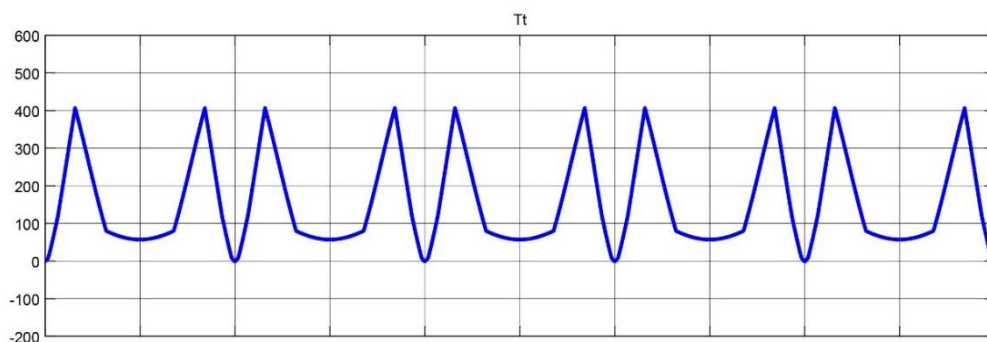
Σχήμα 7.3 Πτώση πίεσης τουρμπίνας Wells, $\Delta p_1(\text{Pa})$ -Time(s)

Με την παραπάνω είσοδο κατά την προσομοίωση και δίχως συσκευή ελέγχου ο συντελεστής ροής ϕ_1 (flow coefficient) παρουσιάζεται ως εξής:



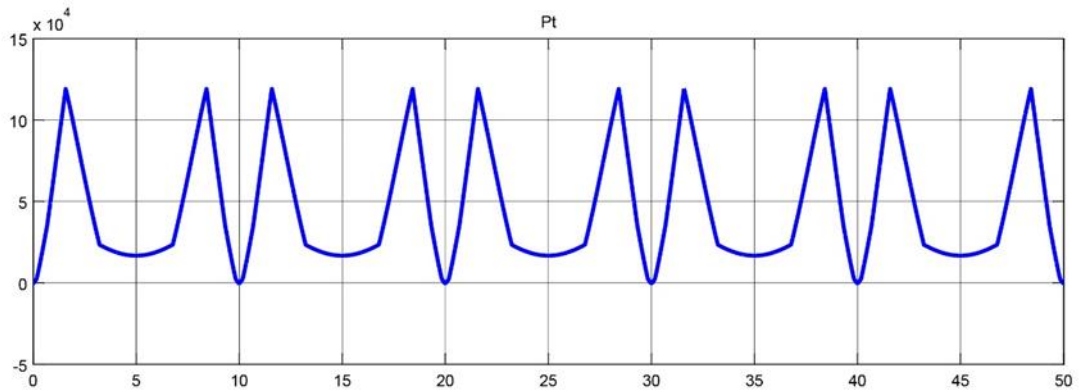
Σχήμα 7.4 Συντελεστής ροής τουρμπίνας Wells ϕ_1 -Time(s)

Ο συντελεστής ροής που εμφανίζεται στο Σχήμα 7.4 είναι αυτός ο οποίος δίνει στην ροπή της τουρμπίνας την μορφή του Σχήματος 7.5.



Σχήμα 7.5 Ροπή τουρμπίνας Wells T_{t1} - Time(s)

Η παραγόμενη ισχύς της τουρμπίνας Wells είναι περιορισμένη λόγω της τιμής κατωφλίου της τουρμπίνας (0,3) που είναι μικρότερη από την μέγιστη τιμή που προσδίδει (0,4458) , όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6. Η ισχύς δίνεται από το γινόμενο της ροπής της τουρμπίνας T_{t1} επί την γωνιακή ταχύτητα της ω_{t1} .

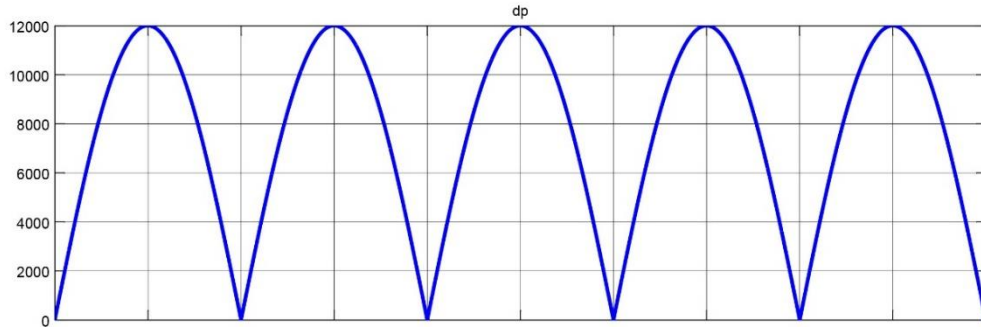


Σχήμα 7.6 Παραγόμενη ισχύς τουρμπίνας Wells P_{t1} (Watt)- Time(s)

7.5.2 Σταθερή ταχύτητα ω_2 3000rpm και πλάτος $dp_2=12000Pa$

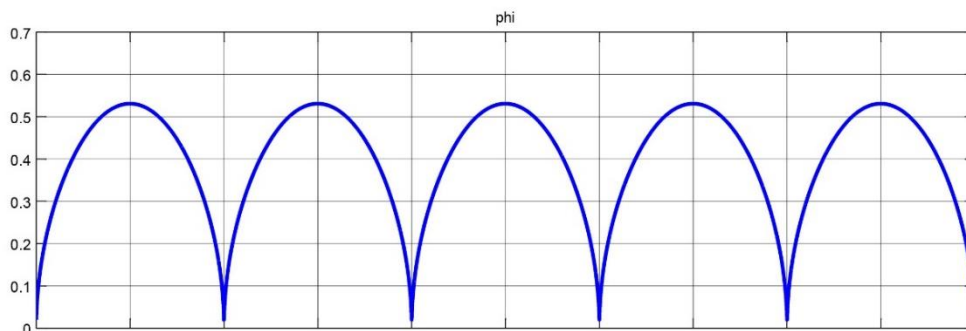
Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα είναι σταθερή στις 3000 στροφές με πλάτος 12000Pa, παρατηρείται ότι ο χρόνος στον οποίο το πλάτος ανεβαίνει στα 12000 Pa είναι ο ίδιος με αυτόν που υπάρχει για ταχύτητα ω_1 2800.

$$|12000 \sin(0.1\pi t)| P_{a2} \quad (7.10)$$



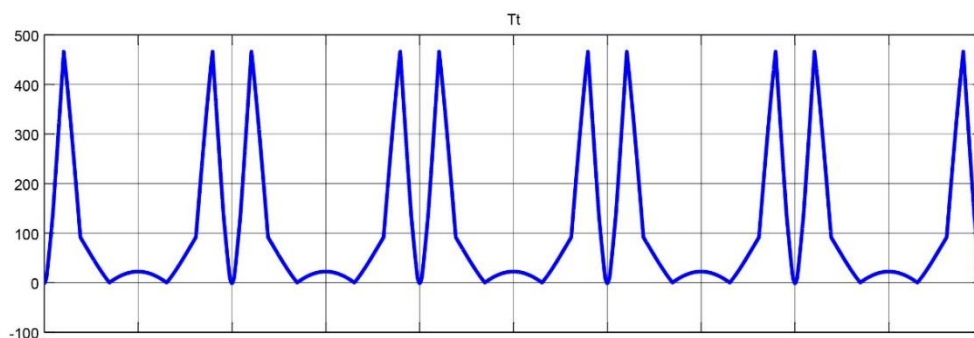
Σχήμα 7.7 Πτώση πίεσης τουρμπίνας Wells, $dp_2(Pa)$ -Time(s)

Με την είσοδο του σχήματος 7.7 κατά την προσομοίωση ο συντελεστής ροής φ_2 (flow coefficient) παρουσιάζεται ως εξής:



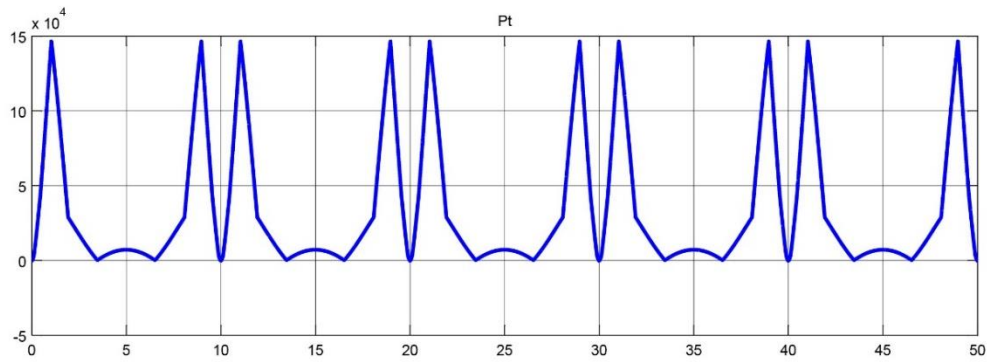
Σχήμα 7.8 Συντελεστής ροής τουρμπίνας Wells φ_2 -Time(s)

Η ροπή διαμορφώνεται ως εξής έχοντας αυτή την φορά ταχύτητα στις 3000rpm και πτώση πίεσης 12000Pa:



Σχήμα 7.9 Ροπή τουρμπίνας Wells T_{t2} -Time(s)

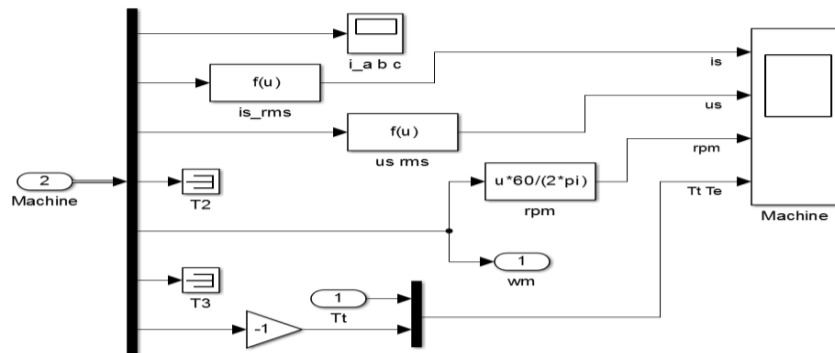
Τέλος στο Σχήμα 7.10 παρουσιάζεται η ισχύς που παράγεται από την τουρμπίνα είναι το γινόμενο της ροπής επί την ταχύτητα που αναπτύσσει.



Σχήμα 7.10 Παραγόμενη ισχύς τουρμπίνας Wells P_t (Watt)- Time(s)

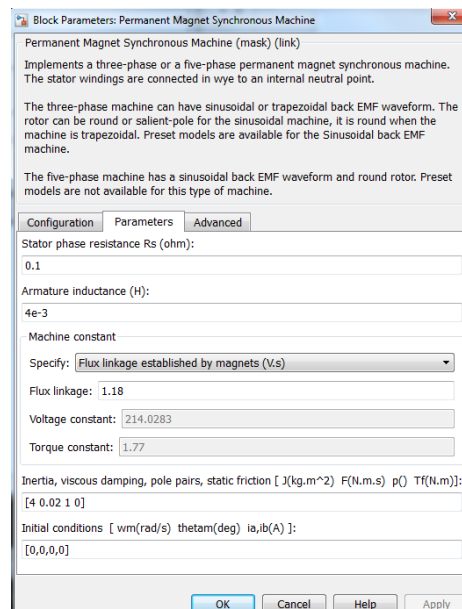
7.6 Μοντέλο Ηλεκτρογεννήτριας - Simulink

Στη Θέση 2 του διακόπτη MS δημιουργείται ένας κλειστός βρόχος μεταξύ του εισερχόμενου κύματος, της τουρμπίνας Wells και της ηλεκτρογεννήτριας μόνιμου μαγνήτη. Ως είσοδος στην ηλεκτρογεννήτρια εφαρμόζεται η ροπή της τουρμπίνας Wells, με αποτέλεσμα να ξεκινά να περιστρέφεται. Η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται η ηλεκτρογεννήτρια χρησιμοποιείται ως είσοδος στην τουρμπίνα και δημιουργείται ένας βρόχος που η τιμή της ταχύτητας των περυγίων της τουρμπίνας καθορίζεται από την ταχύτητα της γεννήτριας.



Σχήμα 7.11 Πεδίο μετρήσεων-Simulink

Η επιλογή της ηλεκτρογεννήτριας γίνεται με βάση τον καθορισμό κάποιων παραμέτρων στην γεννήτρια του Simulink. Στην εν λόγω διπλωματική χρησιμοποιείται ηλεκτρογεννήτρια μόνιμων μαγνητών με ονομαστική ισχύ 30kW και οι παράμετροι που αντλήθηκαν από το επιστημονικό άρθρο που στην βιβλιογραφία αναφέρεται ως [45] θέτουν την αντίσταση φάσης του στάτορα στα 0,1Ω τον επαγωγικό εξοπλισμό στα 0,004H και η σύνδεση ροής γίνεται με την χρήση μαγνητών με τιμή 1,18.



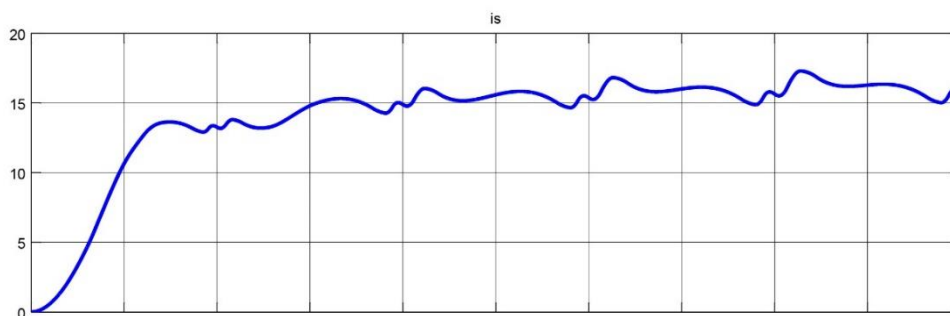
Σχήμα 7.12 Παράμετροι ηλεκτρογεννήτριας- Simulink

Η αδράνεια J του συνολικού συστήματος έχει τιμή 4kgm^2 και προκαλεί την εξομάλυνση της ροπής T_i που παράγει η τουρμπίνα, στην ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας T_e όπως θα αναλυθεί περισσότερο σε επόμενη παράγραφο με την αντίστοιχη κυματομορφή. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται και στο Σχήμα 7.12.:

7.6.1 Προσομοίωση ολικού συστήματος με την ηλεκτρογεννήτρια $dp_{1.1}=7000\text{Pa}$

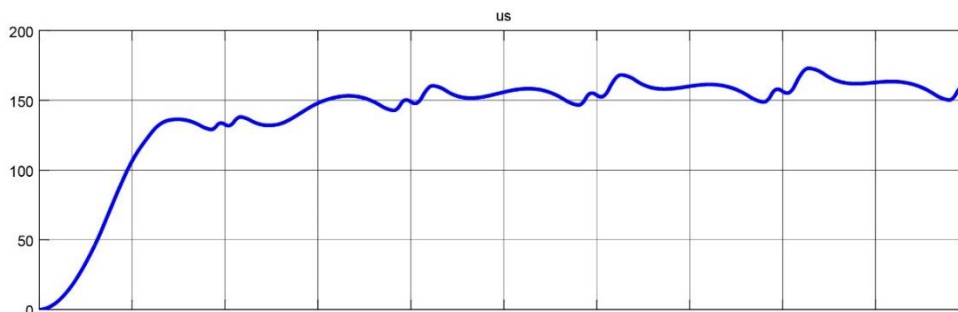
Όσον αφορά τις κυματομορφές που παράγονται από την ηλεκτρογεννήτρια στο συνολικό σύστημα με πτώση πίεσης 7000Pa προκύπτουν ως εξής:

Η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών παράγει ρεύμα i_{s1} όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.13 που παρουσιάζεται η ενεργός τιμή του περίπου στα 16Amp .



Σχήμα 7.13 Ενεργός τιμή ρεύματος γεννήτριας 16Amp $i_{s1}(\text{Amp})$ -Time(s)

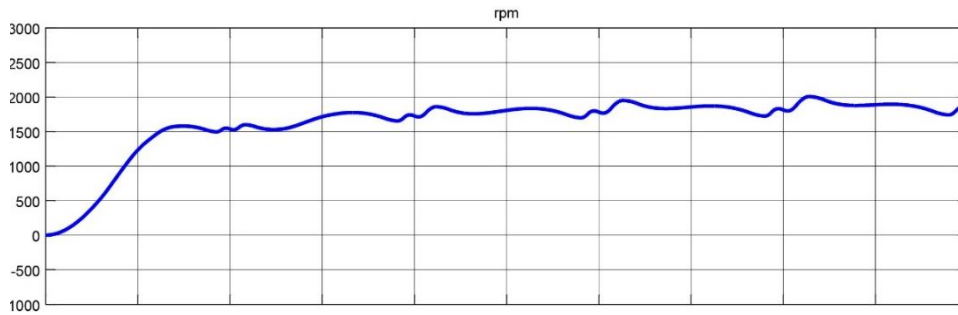
Η τάση u_s που παράγει η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών φαίνεται στο Σχήμα 7.14 με τιμή περίπου στα 160Volt .



Σχήμα 7.14 Παραγόμενη τάση γεννήτριας 160V $u_{s1}(\text{V})$ -Time(s)

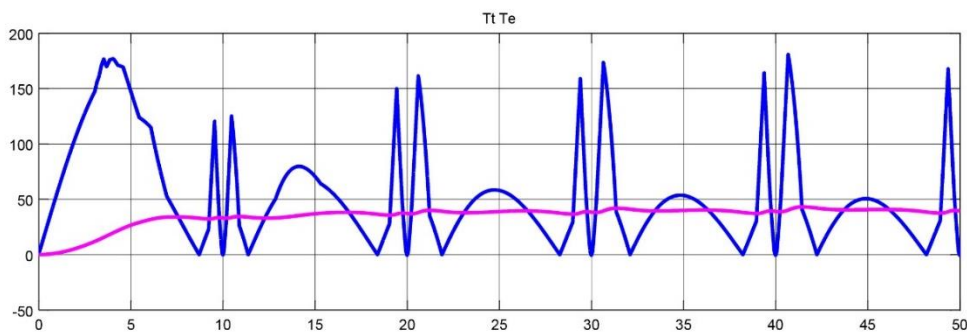
Κεφάλαιο 7

Ο αριθμός των στροφών με τον οποίο περιστρέφεται η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών φαίνεται στο Σχήμα 7.15 με τιμή περίπου στις 1800rpm.



Σχήμα 7.15 Αριθμός στροφών γεννήτριας 1800rpm rpm-Time(s)

Στο Σχήμα 7.16 παρουσιάζονται με μπλε χρώμα η ροπή της τουρμπίνας Wells T_t και με φουξ χρώμα είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e που παράγει η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών και μετράται σε Nm. Η αυξομείωση των κορυφών και των κοιλιών στην ροπή της τουρμπίνας προκύπτουν από τη φύση του κύματος που αυξάνεται και αποσβένει μέσα στον χρόνο. Όσον αφορά την ροπή της γεννήτριας υπάρχει μία εξομάλυνση λόγω της αδράνειας που προσθέτουμε στα χαρακτηριστικά της στο Simulink και ισούται με 4kg m^2 .



Σχήμα 7.16 Ροπή τουρμπίνας T_t - Ροπή γεννήτριας T_e για $d_p=7000\text{Pa}$

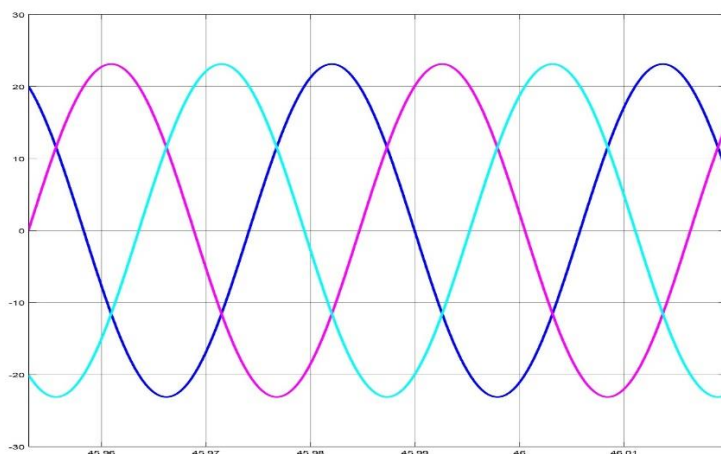
Η παραγόμενη ισχύς του συστήματος υπολογίζεται από τις δύο παρακάτω σχέσεις και είναι ίση με $7,8\text{kW}$ για $d_p=7000\text{Pa}$.

$$P_1 = 3 \times u_s \times i_s \quad (7.11)$$

ή

$$P_1 = T_e \times \left(\frac{2\pi \times rpm}{60} \right) \quad (7.12)$$

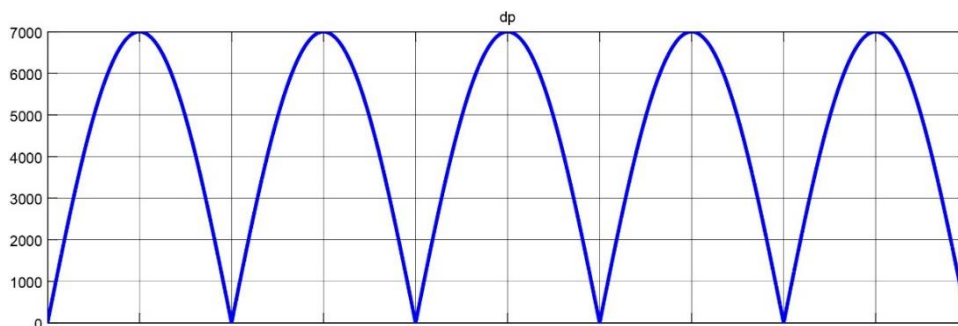
Στην έξοδο της γεννήτριας έχει τοποθετηθεί μία τριφασική αντίσταση των 10Ω και τα παραγόμενα τριφασικά ρεύματα καταναλώνονται πάνω σε αυτή με διαφορά φάσης 120° και πλάτος στα 23Amp παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.17.



Σχήμα 7.17 Τριφασικά ρεύματα συστήματος για $\Delta p=7000\text{Pa}$

Η τουρμπίνα Wells ως μέρος του συστήματος με την γεννήτρια μόνιμων μαγνητών παρουσιάζει διαφορετικές κυματομορφές σε σχέση με αυτές της παραγράφου 7.5.1 που είχε ως είσοδο σταθερή ταχύτητα. Διαμορφώνονται ως εξής:

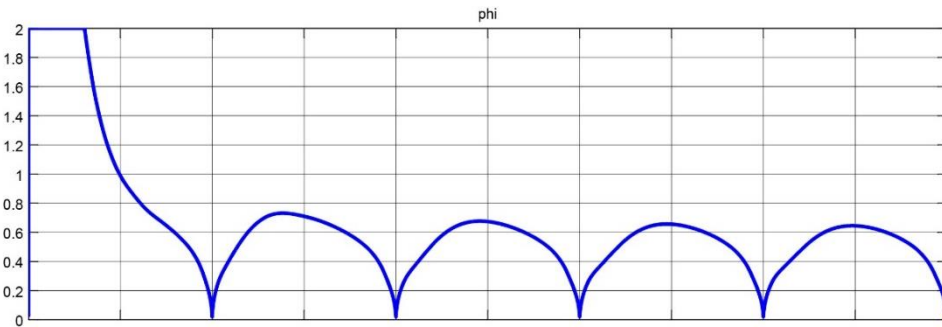
Η πτώση πίεσης παραμένει ίδια με πλάτος 7000Pa και συχνότητα f ίση με $2\pi/20$ rad/sec δηλαδή $0,1\pi$.



Σχήμα 7.18 Πτώση πίεσης τουρμπίνας ως σύνολο του συστήματος $\Delta p(\text{Pa})$ -Time(s) για $\Delta p=7000\text{Pa}$

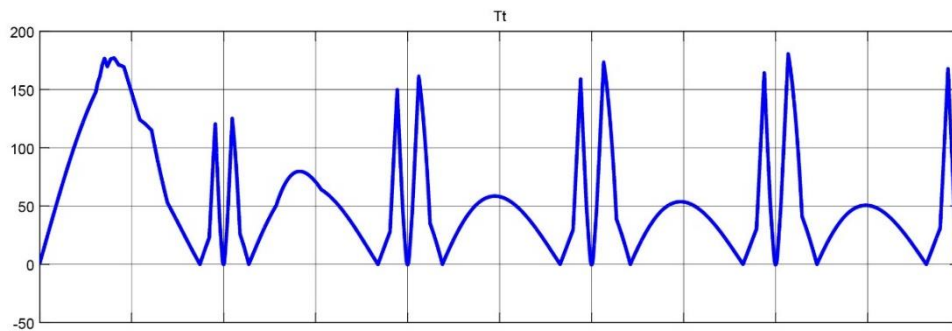
Κεφάλαιο 7

Ο συντελεστής ροής $\phi_{1.2}$ στο Σχήμα 7.19 αλλάζει διότι εμπλέκεται η ταχύτητα της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών στην εξίσωση του, όπως φαίνεται στην εξίσωση 7.4 σε σχέση με την αντίστοιχη κυματομορφή της παραγράφου 7.5.1.



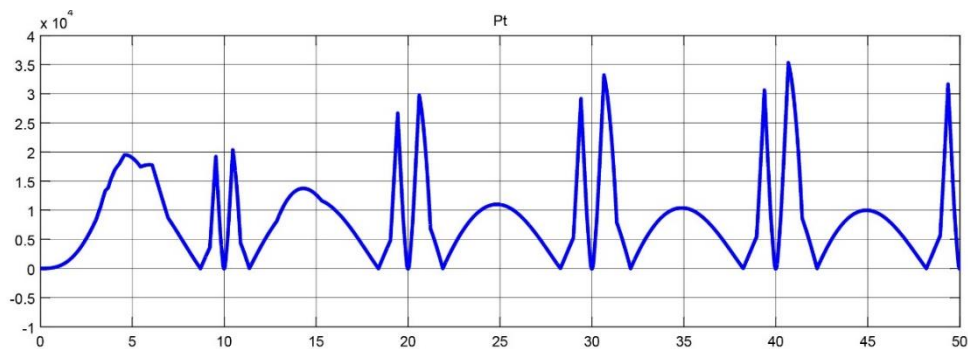
Σχήμα 7.19 Συντελεστής ροής τουρμπίνας $\phi_{1.1}$ στο συνολικό σύστημα ϕ -Time(s) για $d_p=7000\text{Pa}$

Η ροπή T_t της τουρμπίνας Wells όταν λειτουργεί σαν σύνολο με την γεννήτρια διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 7.20 Ροπή τουρμπίνας $T_{t1.1}$ στο συνολικό σύστημα $T(\text{Nm})$ -Time(s)

Τέλος η παραγόμενη ισχύς της τουρμπίνας Wells όταν λειτουργεί σαν σύνολο με την γεννήτρια διαμορφώνεται ως εξής:

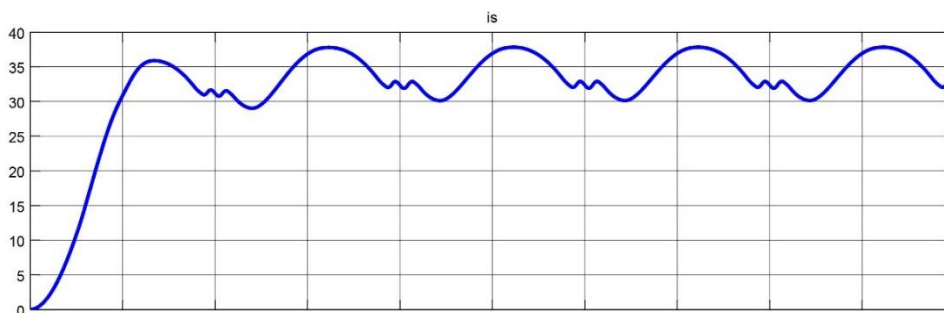


Σχήμα 7.21 Ισχύς τουρμπίνας $P_{t1.1}$ στο συνολικό σύστημα για $d_p=7000\text{Pa}$

7.6.2 Προσομοίωση ολικού συστήματος με την ηλεκτρογεννήτρια $dp_{1.2}=12000Pa$

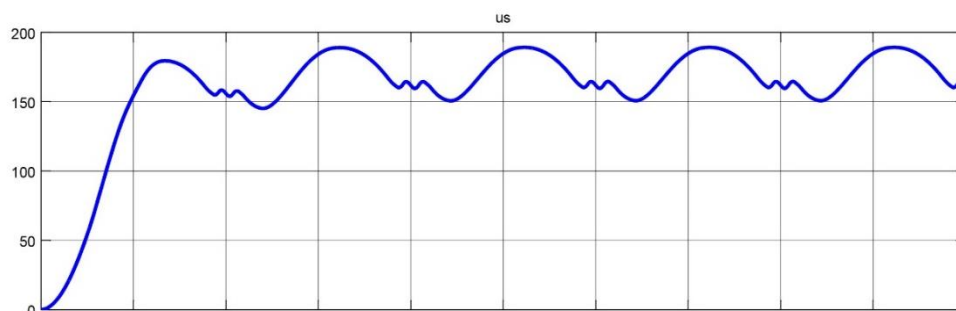
Οι κυματομορφές που παράγονται από την ηλεκτρογεννήτρια στο συνολικό σύστημα με πτώση πίεσης 12000Pa αυτή την φορά ακολουθούν τα σχήματα και τις εξισώσεις της παραγράφου 7.5.2 και προκύπτουν ως εξής:

Η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών παράγει ρεύμα i_{s2} όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.22 που παρουσιάζεται η ενεργός τιμή του περίπου στα 37Ampere.



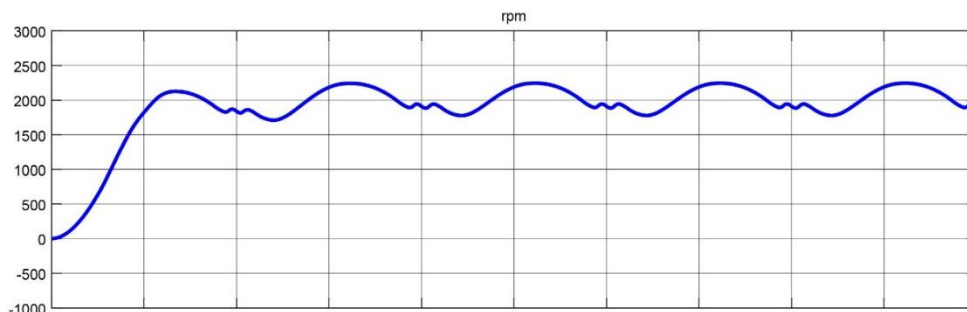
Σχήμα 7.22 Ενεργός τιμή ρεύματος γεννήτριας 37Amp i_{s2} (Amp)-Time(s)

Η τάση u_s που παράγει η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών φαίνεται στο Σχήμα 7.23 με τιμή περίπου στα 188Volt.



Σχήμα 7.23 Παραγόμενη τάση γεννήτριας 188V u_{s2} (V)-Time(s)

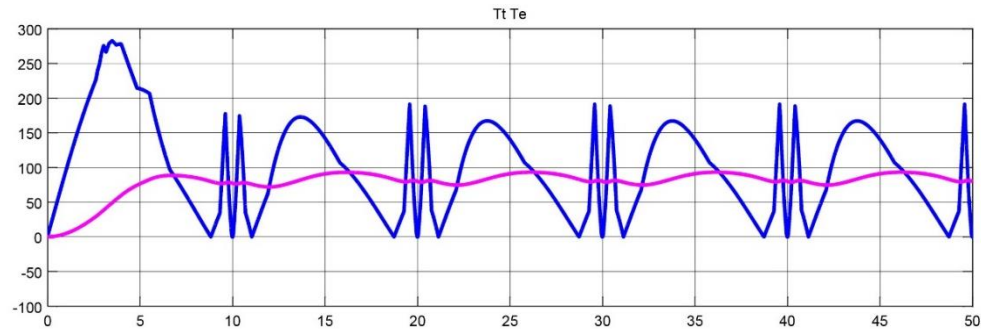
Ο αριθμός των στροφών με τον οποίο περιστρέφεται η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών φαίνεται στο Σχήμα 7.24 με τιμή περίπου στις 2250rpm.



Σχήμα 7.24 Αριθμός στροφών γεννήτριας 2250rpm rpm-Time(s)

Κεφάλαιο 7

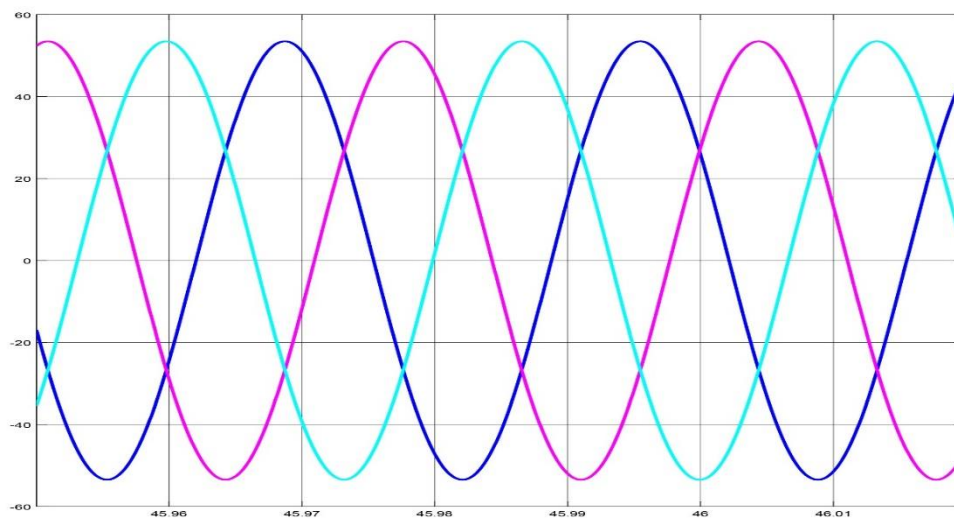
Στο Σχήμα 7.25 παρουσιάζονται όπως και στο Σχήμα 7.16, με μπλε χρώμα η ροπή της τουρμπίνας Wells T_t και με φουξ χρώμα είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e που παράγει η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών και μετράται σε Nm. Ισχύει η ίδια λογική για την αυξομείωση των κορυφών και των κοιλιών στην ροπή της τουρμπίνας και της ροπής της γεννήτριας όπου υπάρχει μία εξομάλυνση λόγω της αδράνειας που προσθέτουμε στα χαρακτηριστικά της στο Simulink και ισούται με 4kg m^2 . Παρατηρείται ότι η κυματομορφή έχει την ίδια μορφή με διαφορετικές τιμές.



Σχήμα 7.25 Ροπή τουρμπίνας T_t - Ροπή γεννήτριας T_e T(Nm)-Time(s)για $dp=12000\text{Pa}$

Η παραγόμενη ισχύς του συστήματος υπολογίζεται επίσης από τις εξισώσεις 7.11 και 7.12 και είναι ίση με 17.3kW για $dp=12000\text{Pa}$

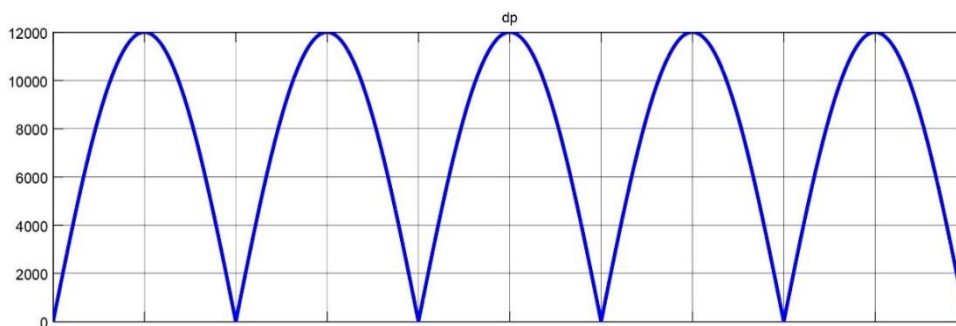
Στην έξοδο της γεννήτριας για $dp = 12000\text{Pa}$ έχει τοποθετηθεί μία τριφασική αντίσταση με ωμικό φορτίο 5Ω και τα παραγόμενα τριφασικά ρεύματα καταναλώνονται πάνω σε αυτή με διαφορά φάσης 120° και πλάτος στα 54Amp παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.26.



Σχήμα 7.26 Τριφασικά ρεύματα συστήματος για $dp=12000\text{Pa}$

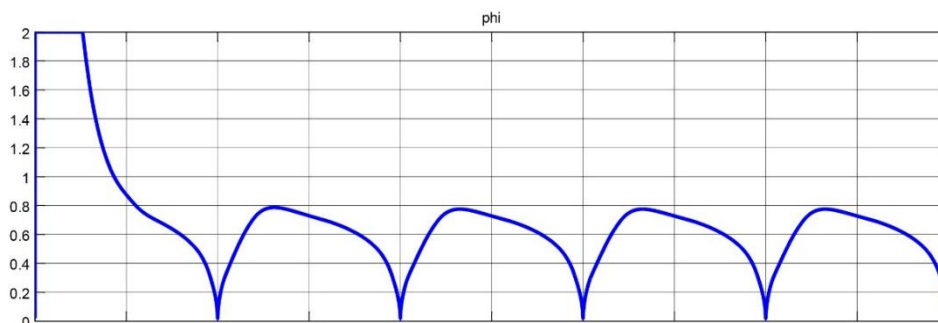
Όσον αφορά την τουρμπίνα Wells ως μέρος του συστήματος με την γεννήτρια μόνιμων μαγνητών παρουσιάζει διαφορετικές κυματομορφές σε σχέση με αυτές της παραγράφου 7.5.2 που είχε ως είσοδο σταθερή ταχύτητα. Διαμορφώνονται ως εξής:

Η πτώση πίεσης παραμένει ίδια με πλάτος $12000P_a$ και συχνότητα f ίση με $2\pi/20$ rad/sec δηλαδή $0,1\pi$.



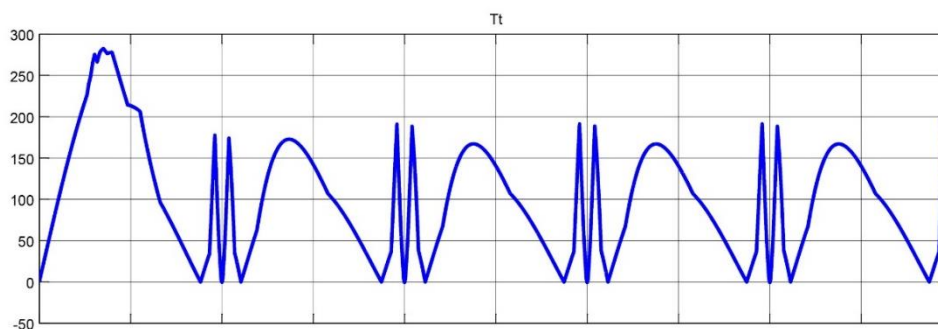
Σχήμα 7.27 Πτώση πίεσης τουρμπίνας ως σύνολο του συστήματος $dp(Pa)$ -Time(s) για $dp=12000Pa$

Ο συντελεστής ροής $\varphi_{2.2}$ στο Σχήμα 7.28 αλλάζει διότι εμπλέκεται η ταχύτητα της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών στην εξίσωση του, όπως φαίνεται στην εξίσωση 7.4 σε σχέση με την αντίστοιχη κυματομορφή της παραγράφου 7.5.2.



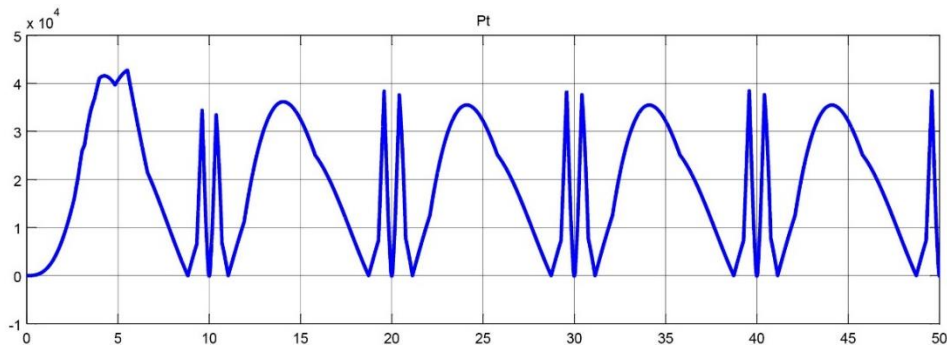
Σχήμα 7.28 Συντελεστής ροής τουρμπίνας $\varphi_{1.2}$ στο συνολικό σύστημα φ -Time(s) για $dp=12000Pa$

Η ροπή T_t της τουρμπίνας Wells όταν λειτουργεί σαν σύνολο με την γεννήτρια διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 7.29 Ροπή τουρμπίνας $T_{t1.2}$ στο συνολικό σύστημα $T(Nm)$ -Time(s)

Τέλος η παραγόμενη ισχύς της τουρμπίνας Wells όταν λειτουργεί σαν σύνολο με την γεννήτρια διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 7.30 Ισχύς τουρμπίνας $P_{11,2}$ στο συνολικό σύστημα για $dp=12000Pa$

Η απόδοση της τουρμπίνας Wells εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής της, καθώς μειώνεται κατά την καθυστέρηση των πτερυγίων του στροβίλου. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντική η ύπαρξη ελεγκτικού μηχανισμού.[44]

7.7 Επίλογος

Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της διάταξης ηλεκτροπαραγωγής, ταλαντευόμενη υδάτινη στήλη OWC χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές στον αριθμό στροφών της τουρμπίνας Wells και στην δύναμη του κύματος- πτώση πίεσης dp . Στην πρώτη περίπτωση έγινε προσομοίωση της τουρμπίνας Wells με σταθερή ταχύτητα 2800rpm και πτώση πίεσης 7000Pa βλέποντας τις κυματομορφές της η παραγόμενη ισχύς είναι ίση με 125kW και στην περίπτωση που η σταθερή ταχύτητα ήταν 3000rpm και η πτώση πίεσης 12000Pa η παραγόμενη ισχύς ήταν ίση με 150kW. Όταν υπολογίστηκαν οι κυματομορφές της τουρμπίνας ως μέρος του συνολικού συστήματος για πτώση τάσης 7000Pa η μέγιστη τιμή της ισχύος της τουρμπίνας Wells ήταν περίπου στα 35kW και η ισχύς της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών ίση με 7.8kW. Για πτώση τάσης 12000Pa η μέγιστη τιμή της ισχύος της τουρμπίνας Wells ήταν περίπου στα 43kW και η ισχύς της γεννήτριας μόνιμων μαγνητών ίση με 17.3kW. Όσον αφορά τα τριφασικά ρεύματα που καταναλώνονταν στην τριφασική αντίσταση 10Ω και 5Ω, είχαν ως ενεργό τιμή για πτώση τάσης 7000Pa και ωμικό φορτίο 10Ω ίση με 23Amp και για πτώση τάσης στα 12000Pa και ωμικό φορτίο 5Ω η ενεργός τιμή του τριφασικού ρεύματος ήταν ίση με 54Amp.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σκοπός της παρούσας Διπλωματικής εργασίας ήταν η περιγραφή των χαρακτηριστικών ενός κύματος με τις θεωρίες που το περιγράφουν ως εισαγωγή για την παρουσίαση και ανάλυση διαφόρων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Από τις διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής από την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων που περιεγράφηκαν έγινε ανάλυση του μετατροπέα ταλαντευόμενης στήλης νερού OWC καθώς και η προσομοίωση του στο πρόγραμμα Simulink. Η επιλογή της συγκεκριμένης διάταξης έγινε με βάση την προοπτική που έχει για μελλοντική χρήση και τη διαφορά κόστους σε σχέση με άλλες διατάξεις, όπου το κόστος έχει τον μεγαλύτερο ρόλο σε μία κατασκευή και μετά είναι η αποδοτικότητα της. Πρόκειται για μία διάταξη η οποία βρίσκεται στην ακτή περιορίζοντας έτσι τα πολλά έξοδα συντήρησης που έχει για παράδειγμα μία διάταξη στα ανοικτά της θάλασσας, καθώς δεν χρειάζεται προσωπικό που να είναι εκπαιδευμένος δύτης και μηχανικός ταυτόχρονα. Επίσης τα υλικά για την κατασκευή της συγκεκριμένης διάταξης αφορούν το τσιμεντένιο τοιχίο το οποίο δεν διαβρώνεται με τον ίδιο ρυθμό όπως τα εξαρτήματα μίας συσκευής υπερέψωσης και δεν υπάρχει η ανάγκη για κάλυψη των καλωδίων και γεννητριών με ειδικά υλικά ώστε να αντέχουν την υψηλή αλατότητα του νερού. Μία ακόμη σημαντική παράμετρος της επιλογής OWC διάταξης είναι ο τύπος τουρμπίνας, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία τουρμπινών αέρος που σημαίνει ότι δεν έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό οπότε δεν διαβρώνεται, έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται ανεξαρτήτως της ροής του πεπιεσμένου αέρα μέσα στην στήλη επίσης δεν αποτελείται από πολλά εξαρτήματα που οδηγούν σε μεγαλύτερη πιθανότητα βλάβης. Ως γεννήτρια επιλέχθηκε η ηλεκτρογεννήτρια μόνιμων μαγνητών όπου ανήκει στην κατηγορία των αυτοδιεγερόμενων μηχανών και τροφοδοτούνται από έναν ημιτονοειδές σήμα το οποίο προκύπτει από την ροπή της τουρμπίνας Wells.

Συνοψίζοντας, η διάταξη υδάτινης στήλης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε χώρες που η ακτογραμμή τους δεν προορίζεται για το κοινό και το κυματικό δυναμικό είναι υψηλό ακόμη και κοντά στην ακτή. Φυσικά στην Ελλάδα θα μπορούσε να καλύψει μόνο τις ανάγκες των νησιών που έχουν προαναφερθεί λόγω του χαμηλού σε σχέση με τους ωκεανούς κυματικό δυναμικό, αλλά δεν παύει να είναι μία ανάσα από την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής",-2.10 Μεταβολή των κλιματικών ζωνών-, Wikipedia <https://el.wikipedia.org/wiki>.
- [2] Άρθρο: "Η στρατηγική της Ισλανδίας μας δείχνει το δρόμο για τις ΑΠΕ", [Online]. Available: <http://www.ecotivity.gr>.
- [3] Νερόμυλος, Wikipedia, Available: el.wikipedia.org/wiki/Νερόμυλος.
- [4] Κιοσκερίδης Ν. Ιορδάνης, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος", Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
- [5] I. Argyrakis: Assistant Director Hydroelectric Generation Department, "Hydroelectric Power Plants of PPC S.A. and their contribution to the Energy Supply", 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, Λάρισα 2008
- [6] Βενετός Βασίλειος "ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ", Διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ
- [7] Mats Leijon, Rafael Waters, Magnus Rahm,Olle Svensson, Cecilia Boström, Erland Strömstedt, Jens Engström, Simon Tyrberg, Andrej Savin, Halvar Gravråkmo, Hans Bernhoff, Jan Sundberg, Jan Isberg, Olov Ågren, Oskar Danielsson, Mikael Eriksson, Erik Lejerskog, Björn Bolund, Stefan Gustafsson, and Karin Thorburn, "Catch the wave to Electricity", "The Conversion of Wave Motions to Electricity Using a Grid-Oriented Approach", -January/February 2009-
- [8] U.S. E.P.A. (Enviromental Protection Agency), Inventory of U.S., "Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2019.", 2021
- [9] Hannah Ritchie and Max Roser, "Share of primary energy from renewable sources.", Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>' [Online Resource], 2020
- [10] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_el
- [11] Madhumitha Jaganmohan, Statista, "Leading countries in installed renewable energy capacity worldwide in 2020 (in gigawatts)", April 2021 <https://www.statista.com/statistics/267233/renewable-energy-capacity-worldwide-by-country/>
- [12] Άρθρο από τον online Site Naftemporiki.gr, "Αυξήθηκε στο 19,7% η κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα", Ιανουάριος 2021
- [13] <https://www.in.gr/2021/02/23/b-science/perivallon-b-science/thesmiko-plaisio-gia-yperaktia-aiolika-parka-etoimazei-kyvernisi/>
- [14] hua.gr/modules/document/file.php/GEO143/My%20Book/%28029-047%29%20kef.02
- [14] Baharin Abu Bakar, Ismail Musirin, Muhammad Murtadha Othman, M.N.A Rahim "Mathematical Model of Sea Wave Energy in Electricity Generation", The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia : 6-7 June 2011

- [15] Dimitrios Kalpaktsoglou, "Power factor correction for stand-alone wave energy conversion buoys", Phd- Διδακτορικό, Νοέμβριος 2009
- [16] S. Muthukumar and V.Jayashankar, "Micro-controller based Emulation of a Wave Energy Converter"
- [17] <https://el.wikipedia.org/wiki/Κυματανάπαυση>
- [18] Khan Academy, Sal Khan, "What is kinetic energy? ", Article from: <https://www.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/work-and-energy-tutorial/a/what-is-kinetic-energy>
- [19] Ευθυμίου, Καραγιαννάκης, "Ενέργεια από Κύματα", Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Ι του τμ. ΗΜΜΥ ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2005,
- [20] Δρ. Αικ. Σιακαβάρα –ΕΔΙΠ –τμ. Βιολογίας, Σημειώσεις για το Εργαστηριακό Μάθημα Θαλάσσια Βιολογία, “Άσκηση 1 η . Επεξεργασία υδρολογικών δεδομένων”
- [21] Κωνσταντίνου Ευστάθιος, "Ανάλυση του ύψους κύματος σε σχέση με τα τοπικά ανεμολογικά δεδομένα στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου", Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, 10 Ιουλίου 2020
- [22] Ινγκαρντ Κ. Ουνο , "Fundamentals Of Waves And Oscillations", Ε.Μ.Π. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις, Δεκέμβριος 2008
- [23] Τσακαλής Βασίλειος, Αθανασούλας Αλέξανδρος, "Ηλεκτρική Ενέργεια με Θαλάσσια Κύματα" Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα: Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Πειραιάς 2015-2016
- [24] Ντάβαλης Γεώργιος, "Κυματική Ενέργεια: Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης και Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό", Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη 2016
- [25] Balazs Czech and Pavol Bauer, "Wave Energy Converter Concepts.", Ieee Industrial Electronics Magazine, June 2012
- [26] Lawrence L. Kazmeski, "Renewable and Sustainable Energy Reviews", Volume 14, April 2010, Lisbon, Portugal
- [27] Κωνσταντίνος Π. Χαιρετάκης, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Τον Ωκεανό", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούνιος 2018
- [28] Nikola Vukajlovic, Vladimir Katic, Dragan Milicevic, Boris Dumnic, Bane Popadic, "Active control of Induction Generator in Ocean Wave Energy Conversion System", University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences Trg Dositeja Obradovica, No. 6, 21000 Novi Sad, 2018 IEEE
- [29] BWEA, Renewable UK, "The voice of wind & marine energy"
- [30] The European Marine Energy Centre Ltd
- [31] Ocean Power Technologies Inc
- [32] https://en.wikipedia.org/wiki/Power_take-off
- [33] Têtu, A. (2017). "Power Take-Off Systems for WECs. " In: Pecher, A., Kofoed, J. (eds) Handbook of Ocean Wave Energy. Ocean Engineering & Oceanography, vol 7. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1_8
- [34] Cordovil, A. F. G. Dente, I. E. Chabu and P. J. C. Branco, "Linear Permanent Magnet Synchronous Generator for Wave Energy Conversion", P. T. C. University of São Paulo, São Paulo-Brazil/Technical University of Lisbon, Lisbon-Portugal

- [35] Drew, B., Plummer, A.R., Sahinkaya, M.N.: "A review of wave energy converter technology." Proc. Inst. Mech. Eng. Part A: J. Power Energy 223, 887–902 (2009)
- [36] https://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/AE_Kaplan_turbine.html
- [37] Shuangming Yang, Hongda Liu, Cheng Dai, Yanan Li "An Application Of Virtual Synchronous Generator Technology In Wave Energy", China, 2017
- [38] Jisha Thomas Chandy, Vishnu J, "POD Based Vector Control of SCIG in a PointAbsorber Wave Energy Conversion System", IJERT, September-2016
- [39] Δημήτριος Θέμελης, "Ηλεκτρικές Μηχανές", Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τε, Σέρρες, Σεπτέμβριος 2015
- [40] Ιωάννης Ροζάκης, "Σύγχρονες Γεννήτριες Μόνιμου Μαγνήτη- Permanent Magnet Synchronous Generators", Πτυχιακή Εργασία, Αιγάλεω, Νοέμβριος 2018
- [41] Blog, "Συνεχής μαγνήτης σύγχρονοι και χωρίς ψήκτρες κινητήρες συνεχούς ρεύματος", NER GROUP, Νοέμβριος 2019
- [42] Article, "Power Generation Optimization from Sea Waves by Using a PermanentMagnet Linear Generator Drive", Nikolaos M. Kimoulakis, Antonios G. Kladas, and John A. Tegopoulos, IEEE Transactions on Magnetics, July 2008
- [43] <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy-devices.html>
- [44] Fares M'zoughi, Soufiene Bouallègue, Mounir Ayadi, "Modeling and SIL Simulation of an Oscillating Water Column for Ocean Energy Conversion", IEE, March 2015
- [45] Hao Wang Jeffrey M. Falzarano, "Energy extraction from the motion of an oscillating water column", December 2013, Ocean Systems Engineering, Vol. 3, No. 4 (2013) 327-348
- [46] Γκιζάρη Νικόλ, "Εκτίμηση κυματικού δυναμικού στις Ελληνικές Θάλασσες", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2012

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΗΓΕΣ ΠΙΝΑΚΩΝ & ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Πίνακες

- Πίνακας 1.1 Πηγή: Global Carbon Project. (2021). Supplemental data of Global Carbon Project 2021 (1.0) [Data set]. Global Carbon Project. <https://doi.org/10.18160/gcp-2021>. Andrew, Robbie M., & Peters, Glen P. (2021). The Global Carbon Project's fossil CO2 emissions dataset [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5569235>.
- Πίνακας 3.2 Πηγή: http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge768e/E_OCEAN_ALBANAKIS/PDF_/KEF_7_KYMAT_A.pdf
- Πίνακας 6.3- Πίνακας 6.4 Πηγή: Dimitrios Kalpaktsoglou, "Power factor correction for stand-alone wave energy conversion buoys", Phd- Διδακτορικό, Νοέμβριος 2009

Σχήματα

- Σχήμα 1.1 Πηγή: Hannah Ritchie and Max Roser (2020) - "Share of primary energy from renewable sources". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> [Online Resource]
- Σχήμα 1.2 Πηγή: @2002Brooks/Cole a division of Thomson Learning, Inc.
- Σχήμα 2.1 Πηγή : Καρύμπαλης , Ε. (2010) , Παράκτια Γεωμορφολογία , σελ. 29
- Σχήμα 3.1 Πηγή: Κύματα Stokes, Πηγή: Εικονικά Εργαστήρια Ωκεανογραφίας, Κωνσταντίνος Αλμπανάκης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.
- Σχήμα 4.1 Πηγή: <https://waveenergyconversiontamul5.weebly.com/theory-of-wave-energy-availability.html>
- Σχήμα 4.2 Πηγή: “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, Lawrence L. Kazmeski, Volume 14, April 2010, Lisbon, Portugal
- Σχήμα 4.3 -i- <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy-devices.html>
- Σχήμα 4.4 -ii- Πηγή: “Estimation of Energy Potential of Point Absorber Buoy type Wave Energy Converter”, Abdullah Al Mahfazur Rahman1, Md. Moniruzzaman2, and M. Al Mamun, 2017 IEEE
- Σχήμα 4.5 Πηγή: Aleix Maria-Arenas, Aitor J. Garrido, Eugen Rusu and Izaskun Garrido , ‘Control Strategies Applied to Wave Energy Converters: State of the Art’, MDPI, August 2019
- Σχήμα 4.6 Πηγή: <https://ikee.lib.auth.gr/record/294389/files/Ntavalis-WaveEnergy.pdf> Διπλωματική Εργασία , Ντάβαλης Γεώργιος “Κυματική Ενέργεια: Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης και Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό”, Θεσσαλονίκη 2016.
- Σχήμα 4.7 Πηγή: Têtu, A. (2017). "Power Take-Off Systems for WECs. " In: Pecher, A., Kofoed, J. (eds) Handbook of Ocean Wave Energy. Ocean Engineering & Oceanography, vol 7. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1_8
- Σχήμα 4.8 Πηγή: Raju Ahamed, Kristoffe rMcKee, Ian Howard, ‘Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review’
- Σχήμα 4.9 Πηγή: Têtu, A. (2017). Power Take-Off Systems for WECs. In: Pecher, A., Kofoed, J. (eds) Handbook of Ocean Wave Energy. Ocean Engineering & Oceanography, vol 7. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1_8
- Σχήμα 4.10 Πηγή: Advancements of Wave Energy Converters Based on Power Take Off (PTO) Systems: A Review, Raju Ahamed, Kristoffer McKee, Ian Howard* Department of Mechanical Engineering, Curtin University, Perth, WA 6845, Australia *Corresponding author; E-mail address: i.howard@curtin.edu.au (Ian Howard)

- Σχήμα 4.11 Πηγή: Finnigan, T., Auld, D.: Model testing of a variable-pitch aerodynamic turbine. In: Proceedings of the 13th (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, May 25–30 2003
- Σχήμα 4.12 Πηγή: “Performance Enhancement of an Impulse Turbine Used for Ocean Energy Extraction”, Karthikeyan Thandayutham, Abdus Samad, Rameez Badhurshah, December 2014 ,Conference Paper
- Σχήμα 4.13 Πηγή:https://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/AE_Kaplan_turbine.html
- Σχήμα 5.1 Πηγή: Drew, B., Plummer, A.R., Sahinkaya, M.N.: A review of wave energy converter technology. Proc. Inst. Mech. Eng. Part A: J. Power Energy 223, 887–902 (2009)
- Σχήμα 5.2 Πηγή: Δημήτριος Θέμελης, “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας Τμήμα Μηχανολογών Μηχανικών Τε, Σέρρες, Σεπτέμβριος 2015
- Σχήμα 5.3 Πηγή: Blog “AC INDUCTION MOTORS VS. PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS”, EMPOWERING PUMPS & EQUIPMENT’S, Ιανουάριος 2017 Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PMSG)
- Σχήμα 5.4 Πηγή: Nikolaos M. Kimoulakis, A. Kladas, “Power Generation Optimization from Sea Waves by Using a Permanent Magnet Linear Generator Drive”, IEEE, July 2008
- Σχήμα 6.1 Πηγή: “Design and Control of Single Phase PWM Rectifier using Two IGBT”, Seshadri Gopalan, Vol. 4, Issue 6, June 2015
- Σχήμα 6.2 Πηγή: “PFC Single-Phase AC/DC Boost Converters: Bridge, Semi-Bridgeless, and Bridgeless Topologies”, José R. Ortiz-Castrillón ,Gabriel Eduardo Mejía-Ruíz, Nicolás Muñoz-Galeano, Jesús M. López-Lezama , and Sergio D. Saldarriaga-Zuluaga, August 2021
- Σχήμα 7.1 – 7.30 Πηγή: Προσομοίωση Simulink