

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΜΕ ΠΑΛΛΟΜΕΝΗ ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟ WELLS**

υπό

ΑΝΘΟΥΛΑΣ ΜΟΝΑ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού ΠΔΜ, 2009

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2012

© 2012 Ανθούλα Μόνα

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

**Πρώτος Εξεταστής** Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης

(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Δεύτερος Εξεταστής** Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Τρίτος Εξεταστής** Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## **Ευχαριστίες**

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Αναστάσιο Σταμάτη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Νικόλαο Ανδρίτσο, Νικόλαο Πελεκάση, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ τους φίλους(ες) μου για την ηθική υποστήριξή τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Δημήτριο και Δήμητρα Μόνα για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτήν τη μεταπτυχιακή εργασία στη μητέρα μου και στον πατέρα μου.

Ανθούλα Μόνα

# ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΠΑΛΛΟΜΕΝΗ ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟ WELLS

ΑΝΘΟΥΛΑ ΜΟΝΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2012

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης, Επίκουρος Καθηγητής Εφαρμοσμένης  
Θερμοδυναμικής και Θερμικών Σταθμών

## Περίληψη

Στην εργασία αυτή γίνεται μοντελοποίηση του Συστήματος μετατροπής ενέργειας με παλλόμενη υδάτινη στήλη, η οποία συνδέεται με ένα στρόβιλο τύπου Wells και μια γεννήτρια. Δίνονται πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά κλίματος της περιοχής εγκατάστασης του συστήματος, παρουσιάζεται η γραμμική θεωρία του κύματος στην υδάτινη στήλη και στο στρόβιλο Wells και αναπτύσσεται η μεθοδολογία στοχαστικής μοντελοποίησης.

Στη συνέχεια γίνεται μελέτη βελτιστοποίησης του συστήματος και αναλύονται δύο κριτήρια βελτιστοποίησης:

1. Σχεδιασμός για μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και
2. Σχεδιασμός για μεγιστοποίηση του κέρδους.

Μελετήθηκε η περίπτωση όπου η περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου (N) προσαρμόζεται σε κάθε θαλάσσια κατάσταση και η περίπτωση όπου διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη

διάρκεια του χρόνου. Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές για διάφορες διαμέτρους  $D$  του στροβίλου σε τρία διαφορετικά κλίματα κύματος. Και τέλος εξετάζεται η περίπτωση όπου η γεωμετρία της κατασκευής θεωρείται σταθερή και μεταβάλλονται η τιμή μονάδας της ενέργειας, η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, το προεξοφλητικό επιτόκιο καθώς και το κλίμα κύματος.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο	1
1.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνολογιών μετατροπής της κυματικής ενέργειας	2
1.2 Ιστορική αναδρομή	3
1.3 Ορισμός κυματικής ενέργειας	4
1.4 Προέλευση των Θαλάσσιων Κυμάτων	5
1.5 Αρχές Μετατροπής της Ενέργειας των Θαλάσσιων Κυμάτων	7
1.5.1 Υπάρχουσες εγκαταστάσεις μετατροπής κυματικής ενέργειας	16
1.6 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	26
1.7 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας	32
<b>Κεφάλαιο 2 Μοντελοποίηση OWC</b>	<b>34</b>
2.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου	35
2.1.1 Εξισώσεις ελέγχου	35
2.1.2 Υδροδυναμική	35
2.1.3 Θερμοδυναμική	37
2.1.4 Στρόβιλος	41
2.1.5 Βαλβίδες	42
2.1.6 Θεωρητική Προσομοίωση	43
Οι συνιστώσες του θαλάμου της παλλόμενης υδάτινης στήλης	48
2.2 Στοχαστικό μοντέλο	52
2.2.1 Τυχαία Κύματα	53
2.2.2 Μετατροπή της ενέργειας	54
2.2.3 Συμπεράσματα	60
<b>Κεφάλαιο 3 Βελτιστοποίηση</b>	<b>61</b>
3.1.1 Διαδικασία βελτιστοποίησης του στροβίλου	61
3.2 Παραγωγή ενέργειας	63
3.3 Κόστη, εισόδημα και κέρδος	64
<b>Κεφάλαιο 4 Μεθοδολογία-σχεδιασμός OWC με Wells-περιγραφή προγράμματος</b>	<b>66</b>
4.1 Αριθμητικό Παράδειγμα	66
4.1.1 Υδροδυναμική της στήλης OWC και τοπικό κλίμα κύματος	69
4.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης	78
4.2.1 Το κλίμα κύματος	81
4.2.2 Βελτιστοποίηση για μέγιστο κέρδος	85
4.3 Συμπεράσματα κεφαλαίου	90
<b>Κεφάλαιο 5 Σύνοψη Μεταπτυχιακής Εργασίας</b>	<b>91</b>

<b>5.1</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>91</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>93</b>



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Δεδομένα για το θάλαμο αέρα.....	66
Πίνακας 2 Δεδομένα για το στρόβιλο.....	66
Πίνακας 3 $D=1.6\text{m}$ .....	74
Πίνακας 4 $D=2.3\text{m}$ .....	75
Πίνακας 5 $D=3.17\text{m}$ .....	76
Πίνακας 6 $D=3.7\text{m}$ .....	77
Πίνακας 7 Μέση ετήσια ισχύς και ετήσιο κέρδος για τα 3 κλίματα κύματος.....	81

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

<b>Διάγραμμα 1</b>	Αδιάστατη ισχύς εξόδου $\Pi$ σε σχέση με την αδιάστατη πίεση $\Psi$ .....	67
<b>Διάγραμμα 2</b>	Αδιάστατη μέση ισχύς εξόδου του στροβίλου σε σχέση με την τυπική απόκλιση της αδιάστατης ισχύος .....	68
<b>Διάγραμμα 3</b>	Αδιάστατη πίεση σε σχέση με τον αδιάστατο βαθμό ροής.....	68
<b>Διάγραμμα 4</b>	Μέση απόδοση του στροβίλου σε σχέση με το $\Psi$ και $\sigma_{\Psi}$ .....	69
<b>Διάγραμμα 5</b>	Ετήσιο φάσμα πυκνότητας σε σχέση με τη γωνιακή ταχύτητα $\omega$ .....	70
<b>Διάγραμμα 6</b>	Τυπική απόκλιση της πίεσης του θαλάμου σε σχέση με το .....	72
<b>Διάγραμμα 7</b>	Μέση ετήσια υδροδυναμική απόδοση $e_h$ σε σχέση με το $KX$ .....	73
<b>Διάγραμμα 8</b>	Διάμετρος στροβίλου σε σχέση με την περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου .....	79
<b>Διάγραμμα 9</b>	Καμπύλες ελέγχου της περιστροφικής ταχύτητας $ND$ (m/s) σε σχέση με την αδιάστατη ισχύ εξόδου $\Pi$ .....	79
<b>Διάγραμμα 10</b>	Μέση ετήσια ισχύς για διάφορα μεγέθη στροβίλου .....	80
<b>Διάγραμμα 11</b>	Μέγιστη ισχύς του συστήματος σε σχέση με τη διάμετρο του στροβίλου (και στις δύο περιπτώσεις $T_e=14s$ ).....	80
<b>Διάγραμμα 12</b>	Σύγκριση των τιμών της μέσης ετήσιας ισχύος για ίδια και διαφορετική περιστροφική ταχύτητα .....	82
<b>Διάγραμμα 13</b>	Παράγοντας χρήσης $\alpha$ σε σχέση με τη διάμετρο $D$ του στροβίλου.....	83
<b>Διάγραμμα 14</b>	Μέση ετήσια καθαρή ισχύς εξόδου του στροβίλου σε σχέση με τη διάμετρό του για τα τρία κλίματα κύματος. ....	84

<b>Διάγραμμα 15</b>	Ετήσιο κέρδος $E$ σε σχέση με τη διάμετρο του στροβίλου $D$ για τα τρία κλίματα κύματος (το $u$ είναι σε €/kWh) ( $B_{\text{mech}}=30, B_{\text{elec}}=2, n=20$ χρόνια, $r=0.1$ ) .....	87
<b>Διάγραμμα 16</b>	Επίδραση του προεξοφλητικού επιτοκίου ( $B_{\text{mech}}=30, B_{\text{elec}}=2, n=20$ χρόνια, $u=0.1$ €/kWh).....	88
<b>Διάγραμμα 17</b>	Επίδραση του κόστους κεφαλαίου του μηχανολογικού εξοπλισμού ( $u=0.1$ €/kWh, $B_{\text{elec}}=2, n=20$ χρόνια, $r=0.1$ ).....	89
<b>Διάγραμμα 18</b>	Επίδραση του κόστους κεφαλαίου του μηχανολογικού εξοπλισμού ( $u=0.05$ €/kWh, $B_{\text{elec}}=2, n=20$ χρόνια, $r=0.1$ ).....	89

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 1</b>	Η δημιουργία των θαλάσσιων κυμάτων από την ηλιακή ακτινοβολία. ....	6
<b>Εικόνα 2</b>	Ο παγκόσμιος χάρτης της διακύμανσης της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων σε kW/m. ....	7
<b>Εικόνα 3</b>	Χαρακτηριστικό σύστημα για την παράκτια ζώνη. ....	10
<b>Εικόνα 4</b>	Χαρακτηριστικό σύστημα για λειτουργία στην υπεράκτια ζώνη. ....	13
<b>Εικόνα 5</b>	Το δοκιμαστικό μοντέλο Waveberg™ πριν από τη ρυμούλκηση του στην επιλεγμένη τοποθεσία εγκατάστασης έξω από τις ακτές της Florida το 1996. ....	17
<b>Εικόνα 6</b>	Μια σειρά από εγκατεστημένους μετατροπείς Oyster™ φυσικής κλίμακας στο βυθό της θάλασσας.....	18
<b>Εικόνα 7</b>	Δοκιμή του πειραματικού μοντέλου MAWEC κλίμακας 1:40 σε πραγματικές θαλάσσιες συνθήκες.....	18
<b>Εικόνα 8</b>	Το πρωτότυπο μοντέλο Wave Dragon κλίμακας 1:4,5 στο Nissum Brending της Δανίας. ....	19
<b>Εικόνα 9</b>	Η ολοκληρωμένη εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας LIMPET στο νησί του Islay. ....	22
<b>Εικόνα 10</b>	Διάφορα στάδια κατασκευής της εγκατάστασης LIMPET στο νησί του Islay. .	24
<b>Εικόνα 11</b>	Βασικότερα στοιχεία της μονάδας .....	26
<b>Εικόνα 12</b>	Σχηματική αναπαράσταση της παλλόμενης υδάτινης στήλης.....	36

<b>Εικόνα 13</b> Στρόβιλος και γεννήτρια.....	50
<b>Εικόνα 14</b> Σχηματική αναπαράσταση της παλλόμενης υδάτινης στήλης.....	71

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στην εργασία αυτή περιγράφεται μια ντετερμινιστική και μια στοχαστική μέθοδος για την αποτίμηση της απόδοσης ενός συστήματος κυματικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από μια παλλόμενη υδάτινη στήλη και έναν αεριοστρόβιλο τύπου Wells. Το κλίμα του κύματος αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο θαλάσσιων καταστάσεων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από το φάσμα ισχύος και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας, η οποία θεωρείται μια Gaussian στιγμιαία μεταβλητή σε κάθε θαλάσσια κατάσταση. Η διακύμανση και η κατανομή πιθανότητας της πίεσης του αέρα μέσα στο θάλαμο υπολογίζονται για κάθε θαλάσσια κατάσταση όπως και οι υδροδυναμικοί συντελεστές του θαλάμου. Οι χαρακτηριστές καμπύλες του στροβίλου θεωρούνται γνωστές, επιτρέποντας τη μέση λειτουργία του συστήματος και του στροβίλου σε κάθε θαλάσσια κατάσταση για το ετήσιο κλίμα κύματος.

Μελετήθηκαν λεπτομερώς κάποια αριθμητικά παραδείγματα για συγκεκριμένες γεωμετρίες θαλάμου αέρα και μεγέθη στροβίλου και έγιναν προσπάθειες βελτιστοποίησης του μεγέθους του στροβίλου και της περιστροφικής ταχύτητας για τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας και κέρδους.

## 1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Η Ελλάδα διαθέτει το υψηλότερο κυματικό δυναμικό της Μεσογείου με μέση ισχύ, η οποία σε ορισμένες περιοχές του Αιγαίου ξεπερνάει τα 15 KW/m. Η τεχνικά εκμεταλλεύσιμη ενέργεια από τα κύματα για τα κράτη της Ε.Ε. υπολογίζεται συνολικά σε 150-230 TWh/έτος, από τα οποία περίπου 5 TWh/έτος αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες. Το ποσό αυτό αντιστοιχεί περίπου στο 10% της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στη χώρα μας.

Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και επιπλέον σε αντίθεση με άλλες ανανεώσιμες πηγές, οι εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας δε δεσμεύουν γη, ενώ η οπτική και ακουστική όχληση είναι μηδαμινή. Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών μετατροπής της κυματικής ενέργειας.

### **1.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνολογιών μετατροπής της κυματικής ενέργειας**

Ο κυματισμός της θάλασσας συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας:

- **χαμηλοί δείκτες ρύπανσης σε επίπεδο κύκλου ζωής**

Η κυματική ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, και δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα σωματίδια. [1]

- **απεξάρτηση από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων**

Η αλληλεξάρτηση μεταξύ των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης σε ό,τι αφορά την ενέργεια διαρκώς αυξάνεται. Απαιτούνται δραστικές αλλαγές στον τρόπο παραγωγής, διανομής, και κατανάλωσης της ενέργειας, γεγονός το οποίο μεταφράζεται σε ανάγκη μετασχηματισμού της Ευρώπης σε μια αποδοτική, βιώσιμη ενεργειακή οικονομία.

- **τόνωση της βιομηχανικής παραγωγής και προοπτικές οικονομικής ανάπτυξης σε απομακρυσμένες ή/και υποβαθμισμένες περιοχές, αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας,**

Η θαλάσσια ενέργεια είναι σε θέση να συνεισφέρει στην περιφερειακή ανάπτυξη στην Ευρώπη, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες και παράκτιες περιοχές.

### ✓ δημιουργία θέσεων εργασίας

Η κατασκευή, μεταφορά, εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση των εγκαταστάσεων θαλάσσιας ενέργειας δημιουργεί εισόδημα και θέσεις εργασίας [1].

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εγκατάστασης τεχνολογιών κυματικής ενέργειας, όπως οι επιπτώσεις σε χλωρίδα και πανίδα, η ακουστική ή οπτική όχληση, η παρενόχληση της ναυσιπλοΐας κ.ά θεωρούνται ήπιες. Η οπτική όχληση, αλλά και οι παρεμβάσεις στο περιβάλλον, ενδεχομένως να αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα στις παράκτιες εγκαταστάσεις, αν και εν γένει περιοχές με έντονη κυματική δραστηριότητα δεν ενδείκνυνται για άλλου είδους αξιοποίηση, όπως π.χ. ιχθυοκαλλιέργεια ή τουριστική εκμετάλλευση. Αντίθετα, παράκτιες εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας θα μπορούσαν με κατάλληλο σχεδιασμό να λειτουργήσουν παράλληλα ως κυματοθραύστες για προστασία της ακτής ή λιμενοβραχίονες.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα τεχνολογιών κυματικής ενέργειας αφορούν το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος αλλά και την αξιοπιστία.

## 1.2 Ιστορική αναδρομή

Το 1799 ο Γάλλος μηχανικός Pierre Girard πραγματοποίησε την πρώτη καταγεγραμμένη προσπάθεια κατασκευής συσκευών που θα εκμεταλλεύονταν την κυματική ενέργεια, προσπάθεια που ωστόσο δεν καρποφόρησε. Τη στασιμότητα των επόμενων 200 ετών, ακολούθησε το 1970 η χρηματοδότηση προγραμμάτων για την παραγωγή κυματικής ενέργειας, εν μέσω ενεργειακής κρίσης εξαιτίας της ραγδαίας αύξησης της τιμής του πετρελαίου, από αρκετές κυβερνήσεις χωρών μεταξύ των οποίων η Ιαπωνία, η Νορβηγία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Παρά τα αξιόλογα αποτελέσματα που προαναφέρθηκαν, το μεγάλο



μέγεθος των εγκαταστάσεων και οι υψηλές προσδοκίες στον τομέα της παραγωγής ενέργειας είχαν ως αντίκτυπο τη δαπάνη ιδιαίτερα μεγάλων χρηματικών κεφαλαίων.

Πρόοδος συντελέστηκε στον τομέα της κυματικής ενέργειας, στα μέσα της δεκαετίας του 1990, κυρίως από μικρές εταιρίες του κλάδου. Το γεγονός αυτό είχε ως αντίκτυπο τη δημιουργία αρκετών πρωτοτύπων μικρών διαστάσεων και εγκατεστημένης ισχύος ακολουθώντας τον κανόνα του χαμηλού κόστους παραγωγής ενέργειας [2] [3].

### **1.3 Ορισμός κυματικής ενέργειας**

Η ενέργεια που μεταφέρει ένα θαλάσσιο κύμα αποκαλείται κυματική ενέργεια [4]. Η ενέργεια αυτή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες α) την πιθανή ενέργεια των ανυψωμένων μορίων νερού και β) την κινητική ενέργεια των μορίων νερού, που συνήθως ακολουθούν κυκλικές διαδρομές. Συγκρίνοντας τις διαφορετικές κατηγορίες ωκεάνιων κυμάτων, τα προερχόμενα από τον άνεμο κύματα διαθέτουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή συγκέντρωση. Η ενέργεια που προέρχεται από τα θαλάσσια κύματα, είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που σχεδόν δε χρησιμοποιείται.

Μεταξύ των γεωγραφικών πλατών  $\sim 30^\circ$  και  $\sim 60^\circ$  των δύο ημισφαιρίων παρατηρείται υψηλή δραστηριότητα κυμάτων, που προκαλούνται από τους δυτικούς ανέμους που επικρατούν σε αυτές τις περιοχές. Συγκεκριμένα, στις ακτές του Καναδά, των Η.Π.Α, στις νότιες ακτές της Αυστραλίας και της Νότιας Αμερικής, αλλά και κατά μήκος της δυτικής ακτής της Ευρώπης παρατηρούνται ιδιαίτερος μεγάλα ποσοστά κυματικής ενέργειας. Στις προαναφερθείσες περιοχές το κυματικό δυναμικό έχει εύρος 20-70KW/m μετώπου κυματισμού. Αντιθέτως, στις Ευρωπαϊκές ακτές των χωρών της Μεσογείου το δυναμικό εμφανίζεται χαμηλότερο, με εύρος 4-11KW/m (νοτιοδυτικό Αιγαίο). Η Ελλάδα, καθώς διαθέτει τη μεγαλύτερη ακτογραμμή της Ευρώπης, μεγάλο ενεργειακό δυναμικό και

πολυάριθμα νησιά, είναι άμεσα ενδιαφερόμενη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του θαλάσσιου συστήματος.

Όσον αφορά τη Μεσόγειο θάλασσα, το συνολικό δυναμικό της κυματικής ενέργειας ανέρχεται σε 30 GW, ενώ στην περιοχή του βορειοανατολικού Ατλαντικού είναι σχεδόν 290 GW [2] [5] [6].

Αν συνυπολογιστεί το μέγεθος των θαλασσών (75% της επιφάνειας της Γης), η απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ηλιακής και αιολικής ενέργειας από την επιφάνειά της καθώς και το γεγονός ότι επηρεάζεται από τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις των πλανητών (φαινόμενο παλίρροιας) προκύπτει ότι η πόσοτητα ενέργειας που δύναται να αξιοποιηθεί είναι σημαντική. Επιπλέον, το θερμικό δυναμικό μεταξύ των ανώτερων και κατώτερων, ψυχρότερων θαλάσσιων στρωμάτων ή οι διακυμάνσεις της πυκνότητας στα θαλάσσια στρώματα διαφορετικής αλατότητας, αποτελούν και αυτές πηγές ενέργειας.

Εξαιτίας της σημαντικής ποσότητας ενέργειας που δύναται να παραχθεί, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται άνθιση στις τεχνολογίες κυματικής και παλιρροιακής ενέργειας, με σκοπό την αξιοποίηση του φυσικού ενεργειακού πλούτου του θαλάσσιου συστήματος, καθιστώντας εφικτή την παραγωγή «πράσινης» και φθηνής ενέργειας [7].

#### **1.4 Προέλευση των Θαλάσσιων Κυμάτων**

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ανεξάντλητες και η ενέργεια του θαλάσσιου κυματισμού δε θα μπορούσε να αποτελεί την εξαίρεση. Ενδεικτικά, το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας από την αξιοποίηση του 1% του κυματικού δυναμικού του πλανήτη θα κάλυπτε 4 φορές την ενεργειακή ζήτηση παγκοσμίως. Από την ενέργεια που παράγεται, μπορεί να μετραπεί σε ηλεκτρισμό ένα ποσοστό τουλάχιστον της τάξης του 5% έως 10%.

Η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων προέρχεται από τις δύο κινήσεις των υδάτων της θαλάσσιας επιφάνειας, την κατακόρυφη και την οριζόντια κίνηση. Η κατακόρυφη κίνηση προσδιορίζει το ύψος του κύματος, ενώ η οριζόντια προσδιορίζει την ταχύτητα με την οποία κινείται το κύμα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1, η συνολική ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων αποτελείται από το άθροισμα δύο μορφών ενέργειας, τη δυναμική και την κινητική. Η δυναμική ενέργεια των μορίων του νερού προέρχεται από την κατακόρυφη ταλάντωση τους, ενώ η κινητική ενέργεια τους από τη κυκλική κίνησή τους [7].



**Εικόνα 1** Η δημιουργία των θαλάσσιων κυμάτων από την ηλιακή ακτινοβολία.

Έτσι η συνολική ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων υπολογίζεται με βάση την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$E_{\text{Συνολική}} = E_{\text{Δυναμική}} + E_{\text{Κινητική}} = \frac{\rho g h^2 L B}{16} + \frac{\rho g h^2 L B}{16} = \frac{\rho g h^2 L B}{8}$$

όπου το  $\rho$  είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού

το  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

το  $h$  είναι το ύψος του κύματος

το L είναι το βήμα των κυμάτων

το B είναι το μετωπικό μήκος του κύματος

Στην παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι η δυναμική και κινητική ενέργεια των κυμάτων είναι ισοδύναμες και εξαρτώνται ουσιαστικά από το ύψος του κύματος.

Μεταξύ του 30<sup>ου</sup> και 60<sup>ου</sup> παράλληλου και των δύο ημισφαιρίων (Εικόνα 2) παρατηρούνται τα υψηλότερα επίπεδα κυματικής ενέργειας στη Γη. Αυτό οφείλεται στους ισχυρά πνέοντες δυτικούς ανέμους σε αυτές τις περιοχές.



**Εικόνα 2** Ο παγκόσμιος χάρτης της διακύμανσης της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων σε kW/m.

## 1.5 Αρχές Μετατροπής της Ενέργειας των Θαλάσσιων Κυμάτων

Παρατηρείται μεγάλο εύρος ιδεών και εφευρέσεων στον τομέα της μετατροπής ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων. Αυτό το εύρος που αγγίζει τις 100 τεχνικές, παγκοσμίως, κατηγοριοποιείται στους εξής τύπους:

### **1. Τεχνολογίες Παλλόμενης/Ταλαντούμενης Στήλης Ύδατος**

Είναι συσκευές με θάλαμο αέρα, βυθισμένο κάθετα στο μισό μήκος του, ανοικτό προς την πλευρά του πυθμένα της θάλασσας. Η παλινδρομική κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας, προκαλεί ρυθμική συμπίεση-αποσυμπίεση της αέριας μάζας στο θάλαμο, η οποία ουσιαστικά κινεί τον αεριοστρόβιλο.

### **2. Τεχνολογίες Υπέρβασης/Υπερύψωσης**

Είναι πλωτές ή σταθερές δεξαμενές, που συλλέγουν το νερό των κυμάτων σε στάθμη υψηλότερη από τη μέση στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας. Η διαφορά στάθμης χρησιμοποιείται για να κινήσει έναν ή περισσότερους υδροστροβίλους.

### **3. Τεχνολογίες Κατακόρυφης Ταλάντωσης**

Είναι πλωτήρες τοποθετημένοι στην επιφάνεια της θάλασσας ή αγκυρωμένοι στον πυθμένα της θάλασσας, που ακολουθούν την κάθετη κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας. Με τη χρήση μηχανικών ή υδραυλικών συστημάτων μετατρέπεται η παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα σε περιστροφική ή άλλου είδους κίνηση, για τη λειτουργία της ηλεκτρογεννήτριας.

### **4. Τεχνολογίες Αρθρώσεων**

Είναι πλωτά, αρθρωτά συστήματα που διαθέτουν αντλίες στις αρθρώσεις τους. Οι αντλίες με τις κινήσεις του κυματισμού, συμπιέζουν υδραυλικό υγρό και δίνουν κίνηση σε υδραυλικούς κινητήρες.

### **5. Τεχνολογίες Οριζόντιας Κίνησης**

Είναι συσκευές που εκμεταλλεύονται την οριζόντια ταχύτητα των μορίων του νερού των κυμάτων, για την εκτροπή κατάλληλων σωμάτων ή τη συμπίεση-αποσυμπίεση ενός εύκαμπτου αεροθαλάμου που αντικρίζει το μέτωπο των θαλάσσιων κυμάτων.

Οι κυριότερες δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι αναπτυσσόμενες τεχνολογίες μετατροπής κυματικής ενέργειας είναι:

- Η απουσία σταθερότητας στο πλάτος, στην κατεύθυνση και στη φάση των κυμάτων της θάλασσας. Η επίτευξη μέγιστης απόδοσης σε όλο το εύρος των συχνοτήτων διέγερσης είναι δύσκολη.
- Σε συνθήκες ακραίων καιρικών φαινομένων, η φόρτιση της κατασκευής είναι πιθανό να είναι 100 φορές μεγαλύτερη από το μέσο φορτίο.
- Ο συγχρονισμός της αργής και μεταβαλλόμενης κίνησης (0,1 Hz) των κυμάτων της θάλασσας με τις ηλεκτρικές γεννήτριες απαιτεί 500 φορές μεγαλύτερη συχνότητα.

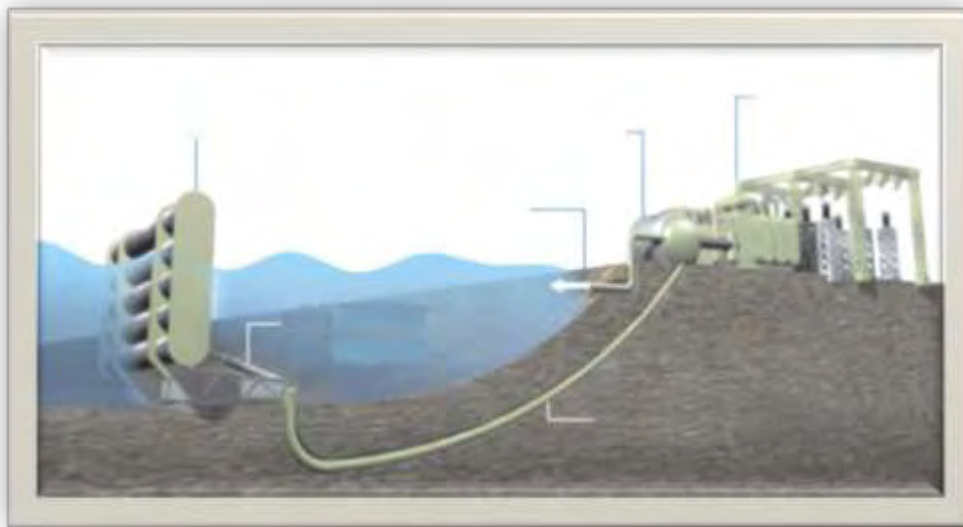
Όσον αφορά τη σχεδίαση του μετατροπέα κυματικής ενέργειας, είναι πολύπλοκος ώστε να επιτευχθεί η αποτελεσματικότητά του, η ασφάλειά του και εν τέλει να είναι οικονομικά εφικτός.

Οι μετατροπείς της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων διαίρονται σε τρεις κατηγορίες ως προς την απόσταση της εγκατάστασης από την ακτή.

#### **(i) Παράκτιες Τεχνολογίες:**

Τα συστήματα που προορίζονται για εγκατάσταση στην παράκτια ζώνη είναι ειδικά σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν αυτόνομα σε σχετικά μικρά βάθη νερού. Ως αποτέλεσμα, οι αγκυρώσεις δεν είναι χρήσιμες από πρακτική άποψη, γι' αυτό και τα συστήματα συνήθως εδράζονται στον πυθμένα, είτε με τη μορφή κατασκευών που στηρίζονται σε πασσάλους είτε με τη μορφή δομών βαρύτητας. Ένα σύστημα που σχεδιάστηκε πρόσφατα για λειτουργία στην παράκτια ζώνη απεικονίζεται στην Εικόνα 4. Η πραγματική απόσταση μέχρι την ακτή θα εξαρτηθεί από τη φύση πυθμένα. Γενικά πάντως, προτιμώνται σημεία όπου ο πυθμένας

είναι εύλογα επίπεδος ή παρουσιάζει μικρή κλίση επειδή δημιουργούν την ελάχιστη δυνατή όχληση στο κυματικό πεδίο [1].



**Εικόνα 3** Χαρακτηριστικό σύστημα για την παράκτια ζώνη.

Οι τεχνολογίες αυτές τοποθετούνται σε αποστάσεις από τις ακτές μέχρι 500 m και σε μέτριο βάθος υδάτων (20-30 m). Υπόκεινται σε κύματα μεγαλύτερου επιπέδου ισχύος και διαθέτουν τα ίδια πλεονεκτήματα ως επί το πλείστον με τις τεχνολογίες ακτογραμμής.

Κύριος εκπρόσωπος της κατηγορίας είναι η παλλόμενη υδάτινη στήλη (Oscillating Water Column, OWC). Αυτή είναι μια κεκλιμένη κοίλη στήλη, της οποίας το κάτω τμήμα είναι κάτω από την ίσαλο γραμμή. Η στάθμη του νερού μέσα στη στήλη ανεβαίνει από κάθε επερχόμενο κυματισμό που συναντά την ακτή. Η ξαφνική διαφοροποίηση του ισάλου συμπιέζει τον αέρα που είναι εγκλωβισμένος στο πάνω μέρος της στήλης. Κατόπιν, ο αέρας που πλέον έχει συμπιεστεί, διοχετεύεται σε ένα στρόβιλο (Wells Turbine), ο οποίος συνδέεται με μία γεννήτρια μετατροπής κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αντίστροφη διαδικασία,

που ονομάζεται πτώση ισάλου, πληρώνει το κενό του ήδη εκτονωμένου. Η διαρκής συμπίεση και εκτόνωση του αέρα προκαλεί ταλάντωσή του μέσω του στροβίλου.

### **Πλεονεκτήματα**

Η σχετική απομάκρυνση από τη φυσική ακτογραμμή προσφέρει το πλεονέκτημα των λιγότερο ασαφών κυματικών συνθηκών σε ό,τι αφορά την παραγωγικότητα του συστήματος. Ωστόσο, η θέση εγκατάστασης βρίσκεται και πάλι εντός του πεδίου θραύσης των κυμάτων, κάτι που συνεπάγεται μεγαλύτερα φορτία για τα συστήματα και τις θεμελιώσεις. Στις περισσότερες θέσεις τα επίπεδα κυματικής ενέργειας είναι παρεμφερή, ή ελαφρώς υψηλότερα, απ' ό,τι κατά μήκος της φυσικής ακτογραμμής.

Το γεγονός ότι η απόσταση ανάμεσα στην ξηρά και το πάρκο κυματικής ενέργειας είναι μικρή συμβάλλει στον έλεγχο του κόστους των υποθαλάσσιων καλωδίων, και μπορεί ακόμη και να επιτρέψει την εγκατάσταση του πολυδάπανου και ευάλωτου συστήματος ανάκτησης της ενέργειας [power take-off system] επί της ακτής. Βέβαια, μόνο οι τεχνολογίες τύπου αντλίας είναι σε θέση να επωφεληθούν αυτής της προσέγγισης. Σε αυτή την απόσταση είναι δυνατή η διάτρηση υπό γωνία/κατευθυνόμενη διάτρηση για την εγκατάσταση προστατευμένης γραμμής τροφοδοσίας, είτε πρόκειται για σωλήνα είτε για καλώδιο [1].

Αν και απαιτούνται πλοία για τις εργασίες εγκατάστασης, συντήρησης και αποκατάστασης των βλαβών, ο χρόνος μετακίνησης θα είναι εύλογα μικρός αν υπάρχει κάποια λιμενική υπηρεσία κοντά στο κυματικό πάρκο. Στην περίπτωση μεγαλύτερων στατικών δομών, οι τρέχουσες εργασίες συντήρησης θα εκτελούνται συχνά επί του πλοίου, γι' αυτό και η συγκεκριμένη τοποθεσία θα διευκολύνει τη χρήση πλοίων μικρότερου μεγέθους για τη μεταφορά του προσωπικού και των υλικών.

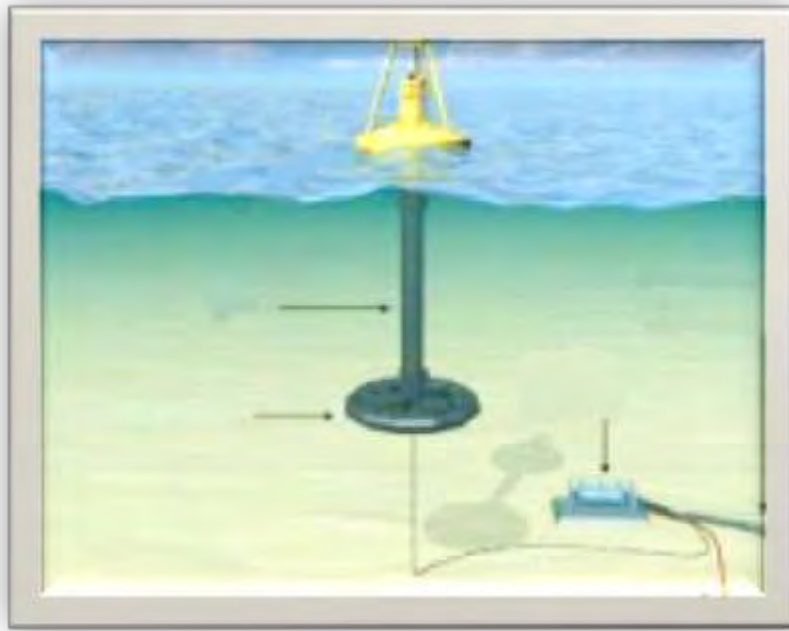


Η συγκεκριμένη περιοχή της θάλασσας αποτελεί επίσης τη βασική ζώνη που αξιοποιείται σήμερα από τη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας για την εγκατάσταση σταθερών ανεμογεννητριών που εδράζονται σε πασσάλους. Η κοινή αυτή χρήση των ρηχών υδάτων σημαίνει ότι θα μπορούσε να εξεταστεί το ενδεχόμενο της ανάπτυξης συνδυαστικών πάρκων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, αυτό θα μπορούσε να αφορά απλώς τον διαμοιρασμό της υποδομής και των εγκαταστάσεων και, ειδικότερα, των υποθαλάσσιων καλωδίων τα οποία στοιχίζουν ακριβά. Αυτή τη στιγμή εκπονούνται μελέτες για τη διερεύνηση των πλεονεκτημάτων της ύπαρξης κοινών καλωδίων γι' αυτές τις δύο διαλείπουσες ενεργειακές πηγές, των οποίων η παρουσία είναι συχνά μη συμπτωματική και μπορούν να είναι συμπληρωματικές [1].

(ii) **Υπεράκτιες Τεχνολογίες (Ανοιχτής Θαλάσσης):**

Η ζώνη αυτή ξεκινά στο σημείο όπου το βάθος νερού είναι πολύ μεγάλο για την εγκατάσταση μονάδων που εδράζονται στον πυθμένα, αλλά κατάλληλο για την αγκύρωση μεγαλύτερων συστημάτων. Η αρχή λειτουργίας των περισσότερων συστημάτων παραμένει ίδια: ένα σύστημα λήψης ισχύος τοποθετείται ανάμεσα σε δύο αδρανειακά σώματα με διαφορετική κίνηση για να δεσμεύσει την ενέργεια που παράγεται από αυτή τη διαφορά. Ένα τυπικό σύστημα για την υπεράκτια ζώνη απεικονίζεται στην Εικόνα 4. [1].

Αυτές οι τεχνολογίες εκμεταλλεύονται τα ισχυρότερα κύματα που συναντώνται σε βάθος μεγαλύτερο των 40 m. Σε γενικές γραμμές, τα επίπεδα πυκνότητας της κυματικής ενέργειας στην υπεράκτια ζώνη είναι υψηλότερα από ό,τι στις δύο άλλες ζώνες –τη χερσαία και την παράκτια– άρα και η ποιότητα των κυμάτων θα είναι λογικά καλύτερη από άποψη απαιτήσεων δέσμευσης της ενέργειας [1].



**Εικόνα 4** Χαρακτηριστικό σύστημα για λειτουργία στην υπεράκτια ζώνη.

Επειδή τα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για τη συγκεκριμένη ζώνη αγκυροβολούνται στον πυθμένα μπορούν, έως έναν βαθμό, να είναι συμβατά με τις επικρατούσες συνθήκες.

Η λειτουργία ενός συστήματος σε μια περιοχή της θάλασσας με εύλογα υψηλή ετήσια ενεργειακή ροή – με ισχύ ανά μέτρο μετώπου κύματος μεταξύ 40 και 60 kW/m– σημαίνει ότι το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να αντέξει ακραίες καταιγίδες. Γενικά, θα πρέπει να αναμένονται καταστάσεις θάλασσας με ισχύ μεγαλύτερη των 500kW/m, ενώ σε συνθήκες καταιγίδας τα συστήματα θα πρέπει να σχεδιαστούν για μεμονωμένα κύματα ισχύος μεγαλύτερης των 1000kW/m.

**(iii) Τεχνολογίες Ακτογραμμής :**

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας που τοποθετούνται στη χερσαία ζώνη αξιοποιούν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής συμβάλλοντας στη διαδικασία δέσμευσης της

ενέργειας των κυμάτων. Η επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης είναι πρωταρχικής σημασίας, καθώς τα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής μπορεί επίσης να έχουν επιζήμια αποτελέσματα για την ικανότητα του συστήματος να δεσμεύει την ενέργεια.

### **Πλεονεκτήματα**

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χερσαίας ζώνης προκύπτουν από την προσβασιμότητα του συστήματος παραγωγής. Το πλεονέκτημα αυτό ισχύει τόσο κατά τη φάση της κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης και τις επικρατούσες κυματικές συνθήκες, θα μπορούσε να διατυπωθεί η υπόθεση ότι σε κάθε περίπτωση, εκτός από τις περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων, οι εγκαταστάσεις επί της ακτής παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της εύκολης και πρακτικά απρόσκοπτης πρόσβασης. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση του μηχανολογικού και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού μπορεί να προχωρήσει σχεδόν ανεμπόδιστα υπό μέσες περιβαλλοντικές συνθήκες και, το σημαντικότερο, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης διατηρούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα αφού δεν απαιτείται η εννοκίαση πλοίων για τη μεταφορά της μονάδας στην ξηρά.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα της χερσαίας ζώνης, με δεδομένο ότι δεν υπάρχει απαίτηση για τη μετακίνηση των συσκευών, είναι η δυνατότητα βελτίωσης της βιωσιμότητάς τους με την κατασκευή πιο εύρωστων δομών για μέγιστη αντοχή. Ο παράγοντας αυτός μπορεί να ενισχυθεί από το συνδυασμό του συστήματος με άλλες τεχνητές θαλάσσιες κατασκευές.

Τέλος, η καλωδίωση και η σύνδεση με το Δίκτυο είναι επίσης πολύ πιο απλές στις εγκαταστάσεις επί της ακτής, και δεν υπάρχει απαίτηση για εύκαμπτες γραμμές τροφοδοσίας ή υποθαλάσσιους συνδέσμους. Το κόστος των υποθαλάσσιων καλωδίων μεγάλου μήκους

μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους εγκατάστασης στα υπεράκτια πάρκα.

Έχουν το πλεονέκτημα της εύκολης συντήρησης και εγκατάστασης, καθώς είναι σταθερές ή στην ακτογραμμή. Δεν χρειάζονται υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια ούτε αγκυροβολήσεις σε μεγάλο βάθος. Όμως, υπόκεινται σε ένα κυματικό καθεστώς σημαντικά μικρότερης ισχύος, το οποίο ωστόσο μπορεί να αντισταθμιστεί με τη φυσική συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας (“Hot Spots”). Οι περισσότερο εξελιγμένες συσκευές ονομάζονται παλλόμενη στήλης ύδατος.

### **Μειονεκτήματα**

Τα συστήματα αυτού του τύπου είναι σταθερά και δεν εναρμονίζονται με τις επικρατούσες συνθήκες. Συνεπώς, πρέπει να είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν τις δυνάμεις των επερχόμενων κυμάτων. Για το λόγο αυτό η κατασκευή πρέπει να είναι αρκετά ογκώδης (χρησιμοποιείται σκυρόδεμα).

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της χερσαίας ζώνης σχετίζεται με τις κυματικές συνθήκες. Κατά την είσοδο των κυμάτων σε περιοχές με μικρότερο βάθος νερού, το μέτωπο του κύματος σταδιακά κάμπτεται, με αποτέλεσμα η ενεργειακή ροή να κατανέμεται σε μεγαλύτερο μήκος. Έτσι όμως μειώνεται η συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη για το σύστημα. Η επιμελής επιλογή της θέσης εγκατάστασης μπορεί να ελαχιστοποιήσει αυτή την επίδραση.

Επίσης ένα άλλο μειονεκτήματα είναι η ηχορύπανση, η οποία μπορεί επίσης να μειώσει τη διαθεσιμότητα των χερσαίων περιοχών. Βέβαια, το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση συστημάτων απόσβεσης του θορύβου, με κάποιες μικρές απώλειες στην απόδοση του μετατροπέα.

## **1.5.1 Υπάρχουσες εγκαταστάσεις μετατροπής κυματικής ενέργειας**

### **1.5.1.1 Παράκτιες εγκαταστάσεις**

- **Τεχνολογίες Παλλόμενης/Ταλαντούμενης Στήλης Ύδατος**

#### **Mighty Whale**

Το έτος 1987 ξεκίνησε στην Ιαπωνία η έρευνα και ενασχόληση από την ομάδα κυματικής ενέργειας του JAMSTEC, (Japan Marine Science and Technology Center) για την ανάπτυξη μιας πλωτής συσκευής μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων της θάλασσας σε μηχανική που ονομάζεται Mighty Whale [8].

- **Τεχνολογίες Κατακόρυφης Ταλάντωσης**

#### **WET EnGen™**

Το 2004 δημιουργήθηκε η εταιρία Wave Energy Technologies Inc για την ανάπτυξη, κατοχύρωση, δοκιμή και τέλος την εμπορευματοποίηση του μετατροπέα WET EnGen™. Ο εφευρέτης του μετατροπέα είναι ο Alan Volwes μαζί με τους Brian Kurcza και Heather Acres.

- **Τεχνολογίες Αρθρώσεων**

#### **The Waveberg™**

Ο εφευρέτης John Berg παρουσίασε το μετατροπέα κυματικής ενέργειας Waveberg™ (Εικόνα 5), που αποδείχθηκε αποδοτική λύση με μεγάλη διάρκεια ζωής. Για να ελεγχθεί το μοντέλο Waveberg™ μικρής σχετικά κλίμακας πέρασε από μια σκληρή δοκιμή σε συνθήκες καταιγίδας έξω από τις ακτές της Nova Scotia, ενώ παράλληλα υποβλήθηκε στα τεράστια

κύματα που αύξησαν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και δεν προκάλεσαν καμιά ζημιά στη συσκευή.



**Εικόνα 5** Το δοκιμαστικό μοντέλο Waveberg™ πριν από τη ρυμούλκησή του στην επιλεγμένη τοποθεσία εγκατάστασης έξω από τις ακτές της Florida το 1996.

- **Τεχνολογίες Οριζόντιας Κίνησης**

- **Oyster™**

Στην εταιρία Aquamarine Power ανήκει το Oyster™ (Εικόνα 6). Έχει σχεδιαστεί ειδικά για εγκατάσταση σε νερά κοντά στην ακτή, καθώς τα ρηχά νερά έχουν ευκολότερη πρόσβαση και εκεί δεν εμφανίζονται τα επικίνδυνα μεγάλα κύματα που συναντάμε στην ανοιχτή θάλασσα.



**Εικόνα 6** Μια σειρά από εγκατεστημένους μετατροπείς Oyster™ φυσικής κλίμακας στο βυθό της θάλασσας.

#### 1.5.1.2 Υπεράκτιες τεχνολογίες

- **Τεχνολογίες Παλλόμενης/Ταλαντούμενης Στήλης Ύδατος**

**MAWEC.** Το MAWEC (Εικόνα 7) είναι μετατροπέας ανοιχτής θαλάσσης που χρησιμοποιεί έναν ειδικά σχεδιασμένο στρόβιλο μετατόπισης PTO (Power Take-Off), αλλά δύναται να χρησιμοποιηθεί και ένας παραδοσιακός αεριοστρόβιλος.



**Εικόνα 7** Δοκιμή του πειραματικού μοντέλου MAWEC κλίμακας 1:40 σε πραγματικές θαλάσσιες συνθήκες

- **Τεχνολογίες Υπέρβασης/Υπερύψωσης**

### **Wave Dragon**

Το Wave Dragon (Εικόνα 8) είναι μετατροπέας της κυματικής ενέργειας τύπου υπέρβασης της εταιρίας Wave Dragon Ltd που επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας ενώ είναι δεμένος στο βυθό [8] .



**Εικόνα 8** Το πρωτότυπο μοντέλο Wave Dragon κλίμακας 1:4,5 στο Nissum Brending της Δανίας.

- **Τεχνολογίες Κατακόρυφης Ταλάντωσης**

### **Wave Star©**

Είναι μετατροπέας που εγκαθίσταται μέσα στη θάλασσα σε απόσταση 10 με 20 km από τη στεριά.



- **Τεχνολογίες Αρθρώσεων**

### **Pelamis P-750 WEC**

Το Pelamis της εταιρίας Ocean Power Delivery Ltd, είναι μετατροπέας της ενέργειας των κυμάτων της θάλασσας, ο οποίος διαθέτει τεχνολογία ειδικά για τη βιομηχανία ανοιχτής θαλάσσης. Σημειώνεται πως το Pelamis δίνει περίπου ισοδύναμη έξοδο με μια μοντέρνα ανεμογεννήτρια.

- **Τεχνολογίες Οριζόντιας Κίνησης**

### **Poseidon's Organ**

Το Poseidon's Organ είναι μια πλωτή κατασκευή που μετατρέπει την ενέργεια των κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια. Δύναται επίσης από κατασκευής, να εγκατασταθούν πάνω του ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πάνελ δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια υβριδική μονάδα ανανεώσιμης ενέργειας.

#### **1.5.1.3 Τεχνολογίες ακτογραμμής**

Έχουν σχεδιαστεί πολλά συστήματα για λειτουργία στη χερσαία ζώνη. Αυτά ποικίλουν από πλωτές κατασκευές και μηχανικές συνδέσεις που προσδένονται σε προβλήτες και κυματοθραύστες μέχρι συστήματα διωρύγων με βαθμίδες (tapered channel systems). Στα τελευταία, το στένωμα της διώρυγας αυξάνει το ύψος των κυμάτων, κι έτσι το νερό υπερχειλίζει από τον τοίχο αντιστήριξης σε μια δεξαμενή. Η τελευταία διεργασία παράγει ένα ύψος πτώσης, με αποτέλεσμα το εγκλωβισμένο νερό να μπορεί να επιστρέψει στη θάλασσα μέσω ενός συμβατικού υδροστροβίλου. Δυστυχώς, το συγκεκριμένο σύστημα απαιτεί δεξαμενές μεγάλης χωρητικότητας, γεγονός που μεταφράζεται σε ανάγκη για περιβαλλοντική εξέταση.

Αν και οι προσπάθειες για την ανάπτυξη συστημάτων όπως τα παραπάνω συνεχίζονται, το δημοφιλέστερο –και μέχρι στιγμής επιτυχημένο– σύστημα για λειτουργία στη χερσαία ζώνη είναι η ταλαντευόμενη στήλη ύδατος (Oscillating Water Column – OWC).

Η αρχή της ταλαντευόμενης στήλης ύδατος είναι ιδανική για τη χερσαία ζώνη, καθώς το βασικό τμήμα της κατασκευής μπορεί να είναι ένας σταθερός στεγανοθάλαμος. Οι μονάδες LIMPET και PICO, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της τεχνολογίας OWC σε εφαρμογή επί της ακτογραμμής [1].

### **LIMPET**

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του συστήματος είναι η στροβιλογεννήτρια τύπου Wells η οποία περιστρέφεται με την ίδια φορά ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης ροής του αέρα. Τα χαρακτηριστικά των πτερυγίων της περωτής είναι η γωνία προσβολής 90 μοιρών ως προς τον άξονα περιστροφής της στροβιλογεννήτριας και η συμμετρική αεροτομή. Καθώς ο αέρας κινείται αξονικά μέσα στη στροβιλογεννήτρια η σχετική του ταχύτητα ως προς τα πτερύγια επάγει αεροδυναμικά φορτία που συντηρούν ή αυξάνουν την ταχύτητα περιστροφής της περωτής ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης κίνησης του αέρα. Η περιστρεφόμενη περωτή οδηγεί την ηλεκτρογεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Στα μεταβατικά σημεία αλλαγής της κατεύθυνσης ροής του αέρα (μηδενική αξονική ταχύτητα), τη στιγμή που η στάθμη του νερού μέσα στο θάλαμο συσσώρευσης γίνεται μέγιστη ή ελάχιστη, τα αεροδυναμικά φορτία μηδενίζονται αλλά η περωτή περιστρέφεται για λίγο λόγω αδράνειας. Μόλις μεταβληθεί πάλι το ύψος της στάθμης του νερού στο θάλαμο και ο αέρας αρχίσει να κινείται, επάγονται και πάλι αεροδυναμικά φορτία στα πτερύγια επιταχύνοντας την περωτή. Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται με τη συχνότητα του κυματισμού. Εάν η περωτή σταματήσει είναι δύσκολο η παλινδρομούσα στήλη αέρα να την επανεκκινήσει. Για το λόγο

αυτό υπάρχει ένας μικρός ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος εξασφαλίζει διαρκώς στην πτερωτή μια ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής.

Το σύστημα LIMPET αναπτύχθηκε ως αποτέλεσμα συνεργασίας μεταξύ της εταιρείας WAVEGEN, μιας από τις πρωτοπόρες εταιρείες εκμετάλλευσης θαλάσσιας ενέργειας, και του Πανεπιστημίου Queen's του Belfast (QUB) με συγχρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Η πρώτη εμπορική εφαρμογή του πραγματοποιήθηκε με μια εγκατάσταση 500 kW στο νησί Islay της Σκωτίας και μπορεί να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ενέργεια περίπου 400 νοικοκυριά του Βρετανικού εθνικού ηλεκτρικού δικτύου. Για την υλοποίηση του συστήματος υπογράφηκε 15-ετής σύμβαση παραγωγής και τροφοδοσίας στους μεγαλύτερους ηλεκτροπαραγωγούς της Σκωτίας [9] .

Από τη στιγμή της δημιουργίας του και έπειτα, τροφοδοτεί το δίκτυο ηλεκτροδότησης του Ηνωμένου Βασιλείου, ενώ αξίζει να σημειωθεί πως λειτουργεί και ελέγχεται από απόσταση.

Αυτή η χωρίς επίβλεψη εγκατάσταση με την επιτυχημένη λειτουργία της απέδειξε τις δυνατότητες συνεισφοράς της παράκτιας κυματικής ενέργειας στα αποθέματα ενέργειας.



**Εικόνα 9** Η ολοκληρωμένη εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας LIMPET στο νησί του Islay.

Η συσκευή χρησιμοποιεί τρεις στήλες ύδατος που ταλαντώνονται μέσα σε θαλάμους από μπετόν με εσωτερικές διαστάσεις 6 m επί 6 m και σε κλίση 40° ως προς την οριζόντιο. Η μετατροπή της ενέργειας γίνεται από μια στρόβιλο-γεννήτρια που έχει συνδεθεί με το μεσαίο αγωγό, ενώ παράλληλα είναι εσωτερικά συνδεδεμένο το πάνω τμήμα των θαλάμων. Οι στήλες ύδατος βρίσκονται 17 m εσωτερικά της ακτογραμμής σε ένα προκατασκευασμένο βαθούλωμα βάθους 6 m και έχουν εξωτερικό πλάτος 21 m. Οι πλευρές του βαθουλώματος είναι κατακόρυφες ως προς την επιφάνεια της θάλασσας και παράλληλες. Στην εγκατάσταση που περιγράφεται, η κάθετη παλινδρομική κίνηση των κυμάτων της θάλασσας χρησιμοποιείται ως έμβολο που πιέζει τον αέρα του θαλάμου, η ροή του οποίου στρέφει ένα στρόβιλο. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει ένα στρόβιλο Wells αντίστροφης περιστροφής, κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα με διάμετρο περωτής 2.6 m [10].

Όλες οι επίπεδες επιφάνειες με πτερύγια του στρόβιλου Wells είναι ενσωματωμένες απευθείας στον άξονα μιας τροποποιημένης επαγωγικής γεννήτριας των 250kW, παρέχοντας συνολική ισχύ 500kW.

Η έξοδος των γεννητριών εξομαλύνεται και αντιστρέφεται πριν τη σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ειδικό λογισμικό ελέγχει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης τα οποία είναι δυνατόν να τροποποιηθούν. Η στρόβιλο-γεννήτρια διαθέτει μια βαλβίδα με περιστρεφόμενο δίσκο και μία βάνα, ενώ αξίζει να αναφερθεί το γεγονός πως ο παραγόμενος θόρυβος από τη ροή του αέρα μέσω των στρόβιλων μειώνεται, με τη χρήση ειδικού ακουστικού θαλάμου. Όλες οι βασικές λειτουργικές παράμετροι, κατά τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας, παρατηρούνται και ελέγχονται από το σύστημα συλλογής πληροφοριών.

Αρχικά, παρακολουθούνται τα φορτία κυμάτων στους εμπρός και πίσω τοίχους της εγκατάστασης και μετρούνται οι κινήσεις των στηλών ύδατος χρησιμοποιώντας διατάξεις μετατροπής πίεσης και ηχητικές διατάξεις μετατροπής, ενώ για μία περίοδο παρακολουθείται η ενέργεια των προσπιπτόντων θαλάσσιων κυμάτων, χρησιμοποιώντας διατάξεις μετατροπής πίεσης του πυθμένα.



**Εικόνα 10** Διάφορα στάδια κατασκευής της εγκατάστασης LIMPET στο νησί του Islay.

Στην πρώτη φωτογραφία (Εικόνα 10) παρουσιάζεται η αρχική εκσκαφή στην τοποθεσία της εγκατάστασης, στη δεύτερη η κατασκευή των 3 τσιμεντένιων αεροθαλάμων, στην τρίτη η συναρμολόγηση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με το στρόβιλο Wells και τις επαγωγικές γεννήτριες και τέλος στην τέταρτη η τελική μορφή της πρόσοψης της εγκατάστασης.

## PICO PLANT

Η εγκατάσταση αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα (θάλαμος πεπιεσμένου αέρα) πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού που επικοινωνεί με τη θάλασσα και τα κύματα, μέσω ενός ανοίγματος στο μπροστινό μέρος του τοίχου και με την ατμόσφαιρα μέσω ενός αγωγού που συνδέεται με τον αεριοστρόβιλο [11].

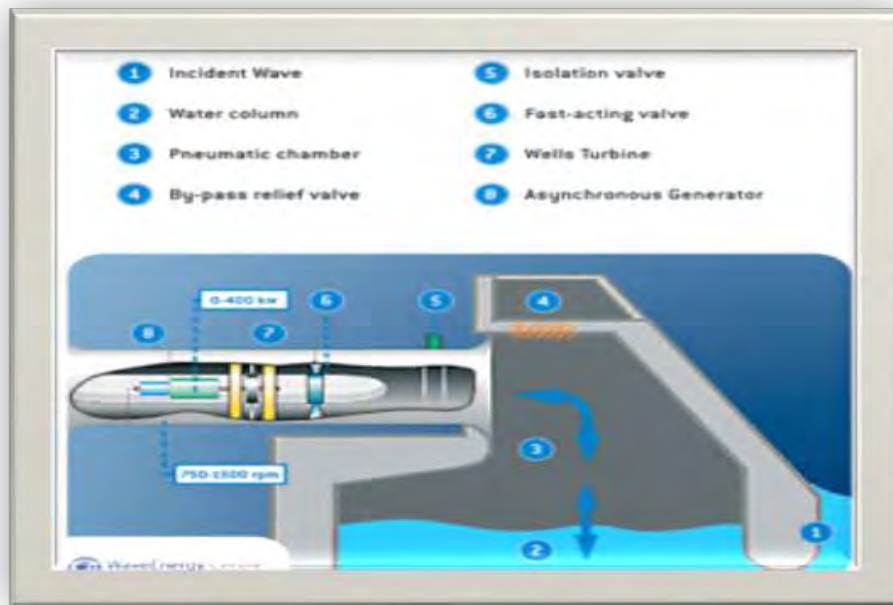
Τα κύματα της θάλασσας προκαλούν κάθετη ταλάντωση της στήλης νερού στο εσωτερικό του θαλάμου, η οποία με τη σειρά της προκαλεί ροή του αέρα από και προς την ατμόσφαιρα, οδηγώντας τη στο στρόβιλο και κατόπιν στη γεννήτρια [10].

Ένας σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό των μονάδων αυτού του είδους είναι οι διαστάσεις του θαλάμου πεπιεσμένου αέρα.

### Στοιχεία της μονάδας

Όπως φαίνεται στην εικόνα 14 η μονάδα αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Παλλόμενη υδάτινη στήλη (2)
- Εσωτερικό του θαλάμου αέρα εναλλάξ προς και από την ατμόσφαιρα (3),
- Στρόβιλος Wells με συμμετρικά πτερύγια (7).
- Βαλβίδα (4) η οποία μπορεί να ανοίξει από 0% έως 100% σύμφωνα με τα επίπεδα του κύματος, για να αποφευχθεί η υπερβολική πίεση.
- Γεννήτρια (8), η οποία συνδέεται με το στρόβιλο και μετατρέπει την περιστροφική δύναμη σε ηλεκτρική ενέργεια.



**Εικόνα 11** Βασικότερα στοιχεία της μονάδας

## 1.6 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Μετά από χρόνια έρευνας και ανάπτυξης στην τεχνολογία κυματικής ενέργειας υπάρχουν πολλές μελέτες στην ανάπτυξη των συσκευών [12-16], του χαρακτηρισμού του κλίματος κύματος και της οικονομικής ανάλυσης [17]. Αυτές οι μελέτες επικεντρώθηκαν ξεχωριστά σε κάθε ένα από τα θέματα και έχει γίνει προσπάθεια κατανόησης του τρόπου επίδρασης του κλίματος κύματος στο σχεδιασμό και στα οικονομικά των συσκευών κυματικής ενέργειας.

Οι Evans και Porter [18] χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο διανομής της πίεσης για τη λήψη των υδροδυναμικών συντελεστών μιας συσκευής OWC. Οι Delaure και Lewis [19] εκτέλεσαν μια παραμετρική μελέτη ενός συστήματος OWC με τη βοήθεια μεθόδου τρισδιάστατης χαμηλής τάξης πλαισίου. Οι Jasset και Clement [20] ανέπτυξαν υβριδική

μέθοδο προσομοίωσης των σταθμών κυματικής ενέργειας OWC στη μονάδα του χρόνου. Η προσομοίωση των κινήσεων της εσωτερικής ελεύθερης επιφάνειας μέσω της διέγερσης των εξωτερικών κυμάτων διαχωρίστηκε σε δύο υποπροβλήματα: ένα εξωτερικό που σχετίζεται με τα τυχαία κύματα και ένα εσωτερικό που αφορά τη συμπεριφορά του εσωτερικού όγκου του νερού. Οι Conde και Gato [21] μελέτησαν αριθμητικά τη ροή αέρα σε έναν τυπικό θάλαμο αέρα ενός μετατροπέα κυματικής ενέργειας τύπου OWC. Οι Falcao και Justino [22] ανέλυσαν θεωρητικά τη λειτουργία μιας συσκευής OWC κυματικής ενέργειας όταν δύο τύποι βαλβίδων -μια βαλβίδα παράκαμψης παράλληλη με το στρόβιλο ή μια βαλβίδα στον αγωγό του στροβίλου- για να ρυθμίζουν την παροχή ροής στο στρόβιλο. Ο Sarmiento [23] έκανε πειράματα σε στήλη OWC σε ομαλά κύματα με μικρό λόγο πλάτους προς μήκος κύματος. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι τα ποσά ενέργειας που εκπέμπονται από κύματα υψηλής τάξεως ήταν πολύ μικρά και δεν παρεμπόδισαν τη λήψη της μέγιστης απόδοσης, κοντά στις επιθυμητές τιμές της γραμμικής περίπτωσης.

Έχουν γίνει επίσης αριθμητικές μελέτες για το σχεδιασμό ενός κατάλληλου στροβίλου για την εξαγωγή ενέργειας από τη διακύμανση της ροής αέρα, μέσα στο θάλαμο αέρα της OWC από τους Setoguchi et al. [24]. Η ροή αέρα στη στήλη αέρα της OWC είναι μια πολύπλοκη περιοδική μεταβολή. Η απόδοση των συσκευών παλλόμενης υδάτινης στήλης για την παραγωγή κυματικής ενέργειας που είναι εξοπλισμένοι με στροβίλους τύπου Wells, επηρεάζεται ιδιαιτέρως από τις ταλαντώσεις της ροής για δύο βασικούς λόγους:

- 1) Μέσω της πραγματικής αστάθειας της ροής αέρα που προκαλείται από την περιοδική μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και
- 2) Αυξάνουν την παροχή αέρα πάνω από ένα όριο, το οποίο είναι περίπου ανάλογο της περιστροφικής ταχύτητας του στροβίλου και έτσι μειώνεται η αεροδυναμική απόδοση και η ισχύς εξόδου του στροβίλου.



Η βιβλιογραφία που είναι σχετική με την εκτίμηση της απόδοσης συστημάτων τύπου OWC με στρόβιλο Wells χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι Στοχαστικές μελέτες [22, 25-29] ενώ στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται οι ντετερμινιστικές μελέτες, οι οποίες είναι καθορισμένες στο πεδίο του χρόνου και στις οποίες δεν υπάρχουν τυχαία γεγονότα [20, 21, 30-38]

Έχει γίνει ένας αριθμός πειραματικών και αριθμητικών μελετών πάνω στις συσκευές OWC. Οι Sarmento, Brito e Melo και Pontes[36], μελέτησαν την επίδραση του κλίματος κύματος στις ιδιαιτερότητες του σχεδιασμού του εξοπλισμού ισχύος και της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συστήματα μετατροπής κυματικής ενέργειας OWC. Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο wave to wire του συστήματος Pico. Επιλέχθηκαν είκοσι τύποι στροβιλογεννήτριας με εκτιμήσεις ισχύος αέρα μεταξύ των 500kW και των 900kW (Η ισχύς της γεννήτριας θεωρήθηκε ότι είναι το 70% της αντίστοιχης του αεριοστρόβιλου) και συντελεστές πίεσης της ροής από 65Pa/(m<sup>3</sup>/s) έως 185.1Pa/(m<sup>3</sup>/s). Μαζί με το σταθμό Pico επιλέχθηκαν άλλα έξι κλίματα κύματος τα οποία αντιστοιχούν σε έξι τοποθεσίες στο Βόρειο Ατλαντικό καλύπτοντας μια ποικιλία συνθηκών σε ό,τι αφορά τη μέση ετήσια ροή και τη διακύμανσή της. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ετήσια παραγωγή ενέργειας ήταν όπως αναμενόταν, εξαρτημένη από τη μέση ετήσια διακύμανση και οι καλύτερες προδιαγραφές σχεδιασμού της στροβιλογεννήτριας είναι στα 700kW, 95Pa/(m<sup>3</sup>/s), ανεξάρτητα από το κλίμα κύματος.

Οι Marjani, Castro, Bahaji και Filali [25] έκαναν μια αριθμητική προσομοίωση για τη μελέτη της συμπεριφοράς της ροής του αέρα μέσα στο θάλαμο του μετατροπέα του κύματος ενός συστήματος OWC με χρήση του κώδικα FLUENT. Η ροή θεωρήθηκε συμπιεστή, ιξώδης και ασταθής. Οι υπολογισμοί διεξήχθησαν θεωρώντας μια τυπική γεωμετρία (σταθμός Pico) σε μια παλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια νερού. Στις αναλύσεις θεωρήθηκε η περίπτωση

της μονοχρωματικής ημιτονοειδούς διέγερσης με διαφορετικές συχνότητες και σταθερό πλάτος. Οι αναλύσεις επικεντρώνονται στη συμπεριφορά των χαρακτηριστικών της ροής στο θάλαμο και στον αγωγό για να εξασφαλιστεί η χρονική μεταβολή των πεδίων της ταχύτητας, της πίεσης, του ρυθμού ροής και της ισχύος από αέρα. Επίσης μεγάλη προσοχή δίνεται στη διαδικασία της παραγωγής ενέργειας μέσα στο θάλαμο η οποία μπορεί να γίνει με έναν στρόβιλο. Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο βασίστηκε σε μία γραμμική θεωρία όσον αφορά τη συσχέτιση της πτώση πίεσης με την παροχή ροής μάζας.

Οι Conde και Gato [21] ασχολήθηκαν με μια αριθμητική μελέτη της ροής αέρα σε μια τυπική γεωμετρία θαλάμου αέρα ενός ενεργειακού μετατροπέα τύπου παλλόμενης υδάτινης στήλης OWC, εξοπλισμένου με δύο αεριοστροβίλους κάθετου άξονα, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ασύμμετρα στην κορυφή του θαλάμου. Εξωτερικά και εσωτερικά, σταθερά και περιοδικά, οι υπολογισμοί της ροής του αέρα έγιναν για να διερευνηθούν τη διανομή της ροής στα τμήματα του στροβίλου, όπως επίσης και τις ιδιότητες της δέσμης αέρα που προσκρούει στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Ο αρχικός σχεδιασμός της OWC προκάλεσε προβλήματα στη λειτουργία του στροβίλου καθώς η δέσμη αέρα δημιούργησε αφρό στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού που απορροφήθηκε σταδιακά απο το στρόβιλο. Προτάθηκε μια τροποποίηση της γεωμετρίας του θαλάμου αέρα, χρησιμοποιώντας μια οριζόντια διαχωριστική πλάκα, η οποία αποδείχθηκε πολύ αποτελεσματική ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο της παραγωγής αφρού από την εσωτερική ροή.

Ο Suroso [37] μελέτησε πειραματικά ένα σύστημα μετατροπής κυματικής ενέργειας με ανακλαστήρα για να βελτιώσει τη χαμηλή απόδοση στις δοκιμές των προηγούμενων μοντέλων. Το πείραμα διεξήχθη τοποθετώντας το μοντέλο σε μια δεξαμενή νερού δημιουργώντας τεχνητά κύματα. Η θέση του ανακλαστήρα μπορεί να αλλάζει κλίση για να

αποκτήσει την καλύτερη θέση για μέγιστη απόδοση. Η απόδοση του μοντέλου με ανακλαστήρα είναι σχεδόν διπλάσια από αυτήν που έχει το μοντέλο χωρίς ανακλαστήρα.

Οι Arlitt, Starzmann και Lees [34] περιέγραψαν τη μοντελοποίηση ενός δυναμικού συστήματος με υπολογιστική ρευστοδυναμική και μηχανική των κατασκευών καθώς και τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους.

Οι Joset και Clement [20] παρουσίασαν αριθμητική προσομοίωση της παλλόμενης υδάτινης στήλης OWC ενός συστήματος κυματικής ενέργειας στο πεδίο του χρόνου. Το πρόβλημα διαχωρίστηκε σε δύο υποπροβλήματα: ένα εξωτερικό, το οποίο ασχολείται με την πρόσπτωση, τη διάθλαση και την ακτινοβολία των κυμάτων και ένα εσωτερικό το οποίο αφορά τη συμπεριφορά του όγκου του νερού εσωτερικά.

Οι Alberdi και M. Garrido [30] μοντελοποίησαν και έλεγξαν μια παλλόμενη υδάτινη στήλη OWC, εξοπλισμένη με μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας για αποφυγή σφαλμάτων δικτύου. Η βελτιστοποίηση βασίστηκε σε ένα σχέδιο ελέγχου το οποίο συντόνιζε κατάλληλα τον έλεγχο της ροής αέρα, το μοχλό, το στροφέα και τους μετατροπείς του ηλεκτρικού δικτύου για να επιτρέψουν στο σταθμό να παραμείνει σε λειτουργία παρουσία σφάλματος του ηλεκτρικού δικτύου .

Οι Olvera, E. Prado και S. Czitrom [29] χρησιμοποίησαν ασυμπτωτικές μεθόδους για τη μη γραμμική μελέτη της OWC με παραμετρικό συντονισμό. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα του αριθμητικού μοντέλου μιας πραγματικής πειραματικής εγκατάστασης.

Οι Falcão και Rodrigues [28] παρουσίασαν μια μελέτη βελτιστοποίησης για το μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό ενός συστήματος κυματικής ισχύος παλλόμενης υδάτινης στήλης OWC τύπου ακτογραμμής ή παράκτιο, εξοπλισμένο με έναν αεριοστρόβιλο.

Η βελτιστοποίηση αφορά το μέγεθος του στροβίλου το οποίο αντιπροσωπεύεται από τη διάμετρο του στροφέα  $D$ . Χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικά κριτήρια:

- i. Μειστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας,
- ii. Μειστοποίηση του ετήσιου κέρδους.

Οι Le Crom, F. Neumann, A. Sarmiento [33] στόχευσαν στην αποτίμηση των παραμέτρων του προσπίπτοντος κύματος σε μια συσκευή παλλόμενης υδάτινης στήλης OWC, η οποία βασίζεται στις μετρήσεις της πίεσης του αέρα μέσα στο θάλαμο και στους αριθμητικούς υδροδυναμικούς συντελεστές της συσκευής. Η μεθοδολογία βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας του αέρα στο πεδίο του χρόνου και της γραμμικής διάσπασης της ροής αέρα κατά την εκπομπή και τη διάθλαση της ροής. Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Fourier, η εξίσωση στο πεδίο του χρόνου μετασχηματίζεται στην αντίστοιχη εξίσωση στο πεδίο συχνότητας. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε σε σταθμό OWC ισχύος 400 KW στο νησί Pico, Azores το οποίο παρακολουθείται και ελέγχεται από το 2005 από το Κέντρο Κυματικής Ενέργειας. Τελικός στόχος ήταν η βελτίωση του ελέγχου του συστήματος Pico αποτιμώντας τη λειτουργία του σ' ένα εύρος θαλάσσιων καταστάσεων.

Οι Falcão και Justino [22] ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο για την προσομοίωση της μετατροπής ενέργειας των κυμάτων μέσω μιας παλλόμενης υδάτινης στήλης (OWC), ενός αεριοστροβίλου Wells και μιας βαλβίδας για τον έλεγχο της ροής του αέρα. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις απέδειξαν ότι η χρήση βαλβίδων ελέγχου βοηθά στην αύξηση του παραγόμενου ποσού ενέργειας καθώς εμποδίζουν την ακινητοποίηση των πτερυγίων του στροφέα του στροβίλου.

Οι Ram, Faizal, Rafiuddin και Lee [35] σχεδίασαν και δοκίμασαν έναν πλήρη τύπο συσκευής παλλόμενης υδάτινης στήλης σε διδιάστατο κανάλι κύματος. Μελέτησαν

λεπτομερώς τις μεταβολές του ύψους της στήλης νερού και της στατικής πίεσης του αέρα που προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των κυμάτων. Τα πειράματα έγιναν για διαφορετικά βάθη νερού και συχνότητα του κύματος. Βρέθηκε ότι οι ταχύτητες του αέρα μέσα στο θάλαμο του στροβίλου κατά τη διάρκεια της ανόδου του νερού μέσα στη στήλη είναι πάντα μεγαλύτερες από αυτές της καθόδου. Καθώς η ροή αέρα ήταν πολύ μεγάλη κατά τη διάρκεια των περισσότερων μετρήσεων καταγράφηκαν πολύ μικρές ταχύτητες αέρα κατά τη μεταφορά μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, καθιστώντας έτσι την ανάγκη για τοποθέτηση ενός ρυθμιστή πριν το στρόβιλο για σταθεροποίηση της παροχής του αέρα.

## **1.7 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας**

Το υπόλοιπο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας χωρίζεται σε τρεις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαιο 2 - 4, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μοντελοποίηση του Συστήματος Μετατροπής Κυματικής Ενέργειας με παλλόμενη Υδάτινη Στήλη, η οποία συνδέεται με ένα στρόβιλο τύπου Wells και μια γεννήτρια. Δίνονται πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά κλίματος της περιοχής εγκατάστασης του συστήματος, παρουσιάζεται η γραμμική θεωρία του κύματος στην Υδάτινη στήλη και στο στρόβιλο Wells και αναπτύσσεται η μεθοδολογία στοχαστικής μοντελοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται μια μελέτη βελτιστοποίησης του Συστήματος και αναλύονται δύο κριτήρια βελτιστοποίησης:

- Σχεδιασμός για μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και
- Σχεδιασμός για μεγιστοποίηση του κέρδους.

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται προσομοίωση του Συστήματος και γίνονται οι μελέτες βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα υπό τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα της Microsoft Office Excel κάνοντας χρήση υπορουτινών της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic.

Τα τελικά συμπεράσματα της μεταπτυχιακής εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

## Κεφάλαιο 2 Μοντελοποίηση OWC

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας OWC (παλλόμενης υδάτινης στήλης) ακτογραμμής έχουν τραβήξει την προσοχή εξαιτίας της απλής τους λειτουργίας. Τα κύματα δρουν ως ένα τεράστιο παλινδρομικό έμβολο συμπίεσης και αποσυμπίεσης του παγιδευμένου αέρα. Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας OWC, είναι συσκευές μερικώς βυθισμένες στο νερό. Το βυθισμένο κομμάτι εσωκλείει μια στήλη νερού ανοικτή στο χαμηλότερο τμήμα της για την είσοδο των κυμάτων. Καθώς τα κύματα προσκρούουν στη συσκευή, η εσωτερική ελεύθερη επιφάνεια της στήλης του νερού υποβάλλεται σε παλινδρομική κίνηση. Η εναλλαγή της ροής συμπιέζει και διαστέλλει την εσωτερική μάζα του αέρα διπλής κατεύθυνσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία ενός αεριοστροβίλου. Ένας καλός σχεδιασμός μετατροπέα κυματικής ενέργειας απαιτεί εκτενή κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής αέρα του θαλάμου αέρα, καθώς οι ταλαντώσεις του αέρα επηρεάζουν τη λειτουργία του μετατροπέα OWC. [35]

Ο Ευρωπαϊκός σταθμός Κυματικής ισχύος 400KW στο νησί Pico στις Αζόρες είναι αυτού του τύπου. [33]. Ο σταθμός βρίσκεται σε μια βραχώδη ακτή, στη βόρεια παραλία του Νησιού Pico. Ο πυθμένας της θάλασσας κάτω από το επικείμενο κύμα είναι βάθους περίπου 8 m. Ο σταθμός εκτίθεται σε κύματα με ενισχυμένα χαρακτηριστικά (+30° βόρεια έως -60° βόρεια). Η πίεση του αέρα μέσα στο θάλαμο μετράται από μια διάταξη μετατροπής της πίεσης, η οποία βρίσκεται στο θάλαμο του στροβίλου στο επίπεδο των 8 m. [33]

Ακολουθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης ενός σταθμού τύπου OWC.

## 2.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

### 2.1.1 Εξισώσεις ελέγχου

Θεωρείται μια συσκευή κυματικής ενέργειας OWC. Η γεωμετρία της συσκευής και τα όρια του περιβάλλοντος που είναι μέσα στο νερό είναι αυθαίρετα και τα τυχαία κύματα που προσπίπτουν στη συσκευή θεωρούνται μη ομαλά.

Θέτουμε ως  $p_a+p(t)$  την πίεση του αέρα μέσα στο θάλαμο,  $q(t)$  το βαθμό ροής του όγκου που εκτοπίζεται από την κίνηση της εσωτερικής ελεύθερης επιφάνειας του νερού και  $m(t)$  η μάζα του αέρα που συγκρατείται μέσα στο θάλαμο. Αν δηλωθεί ως  $w$  ο ρυθμός ροής της μάζας μέσω του στροβίλου και  $w_v$  ο ρυθμός ροής της μάζας μέσω της παρακαμπτήριας βαλβίδας, ισχύει  $w + w_v = -dm/dt$ . Δεδομένου ότι  $m = \rho V$ , όπου  $\rho(t)$  και  $V(t)$  είναι αντίστοιχα η πυκνότητα και ο όγκος του αέρα μέσα στο θάλαμο και λαμβάνοντας υπόψη ότι  $dV/dt = -q$  δημιουργείται η σχέση:

$$w + w_v = -V \frac{d\rho}{dt} + \rho q = Kp \quad (1)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η υπόθεση ισχύει μόνο στην περίπτωση των συνδυασμένων λειτουργιών της βαλβίδας, δηλαδή σε σειρά και παράλληλα.

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις και τις υποθέσεις, το ισοζύγιο μάζας του αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{V_0}{\gamma \cdot p_a} \frac{dp}{dt} + \frac{Kp}{\rho_a} - \int_{-\infty}^t g_r(t-\tau) p(\tau) d\tau - 2 \frac{Ab\omega}{k} \cos(\omega t) \sin(ka) = 0$$

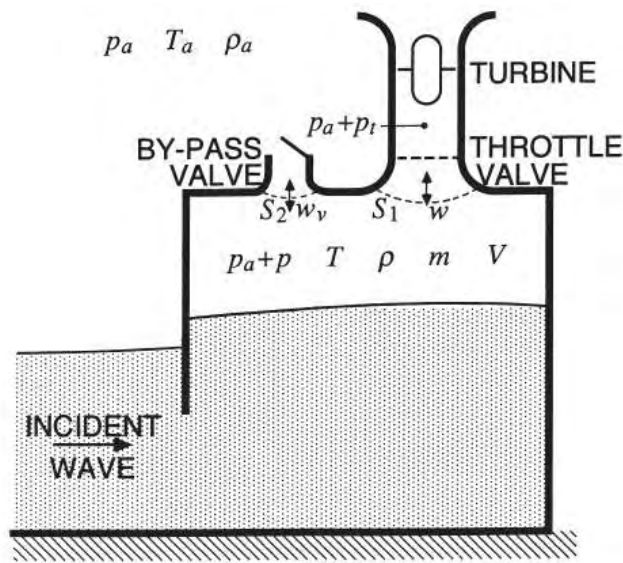
### 2.1.2 Υδροδυναμική

Σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία ισχύει ότι:



$$q(t) = q_r(t) + q_i(t) \quad (2)$$

όπου  $q_r(t)$  είναι η εκπομπή του βαθμού ροής λόγω της περιοδικής μεταβολής της πίεσης του αέρα  $p(t)$  μέσα στο θάλαμο, απουσία τυχαίων κυμάτων και  $q_i(t)$  είναι η “διάθλαση”(diffraction) του βαθμού ροής λόγω των τυχαίων κυμάτων αν ο αέρας μέσα στο θάλαμο διατηρείται στην ατμοσφαιρική πίεση ( $p=0$ ).



**Εικόνα 12** Σχηματική αναπαράσταση της παλλόμενης υδάτινης στήλης

Στην ανάλυση που ακολουθεί το  $q_i(t)$  θεωρείται μια γνωστή συνάρτηση του χρόνου.

[22]

Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας του κύματος ισχύει η σχέση:

$$q_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_r(t - \tau)p(\tau)d\tau \quad (3)$$

όπου το  $q_r(t)$  είναι μια συνάρτηση εξαρτώμενη από τη γεωμετρία του συστήματος και συσχετίζεται με το συντελεστή εκπομπής του κύματος θέτοντας  $p(t) = Pe^{i\omega t}$ ,  $q_r(t) = Q_r e^{i\omega t}$ , όπου  $P(\omega)$  και  $Q_r(\omega)$  είναι μιγαδικοί.

Ο μιγαδικός συντελεστής εκπομπής είναι εξ'ορισμού  $B(\omega) + iC(\omega) = Q_r(\omega)/P(\omega)$

με τους B, C πραγματικούς και έτσι θεωρώντας το  $q_r(t)$  ως μια άρτια συνάρτηση, προκύπτει το B μέσω ενός μετασχηματισμού Fourier.

$$B(\omega) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} g_r(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau$$

από το οποίο προκύπτει με αντιστροφή :

$$g_r(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\omega) \cos\omega t d\omega \quad (4)$$

Η συνάρτηση  $B(\omega)$  εξαρτάται από τη γεωμετρία του θαλάμου και των γύρω τοιχωμάτων και θεωρείται γνωστή είτε από μετρήσεις είτε θεωρητικά [22].

### 2.1.3 Θερμοδυναμική

Η επίδραση της συμπίεστικότητας του αέρα αυξάνει το μέσο ύψος του θαλάμου πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού και δε θα πρέπει να αγνοείται στις συσκευές πλήρους μεγέθους πρωτοτύπου στις οποίες το ύψος του θαλάμου είναι της τάξης των μερικών μέτρων [39]. Η θερμοδυναμική διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα στο θάλαμο, στο στρόβιλο, στις βαθμίδες και στους συνδετικούς αγωγούς είναι αδιαβατική, εφόσον το ποσό της ανταλλασσόμενης θερμότητας σε μια σχετικά μικρή περίοδο χρόνου ενός κύκλου κύματος (της τάξης των 10s) είναι μόνο ένα μικρό κλάσμα από αυτό που απαιτείται για να διατηρηθεί ο αέρας σε μια σταθερή θερμοκρασία.

Επιπλέον υποτίθεται ότι η διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης είναι αρκετά αργή ώστε η θερμοδυναμική κατάσταση του αέρα να θεωρηθεί σταθερή. Συμβολίζουμε την πίεσή του, την πυκνότητα, την απόλυτη θερμοκρασία, την ειδική εσωτερική ενέργεια, την ειδική εντροπία και την ειδική ενθαλπία αντίστοιχα ως  $p_a + p$ ,  $\rho = m/v$ , T, u, s και h,.

Έχουμε ένα ανοιχτό σύστημα αποτελούμενο από αέρα, το οποίο περικλείεται από τα

τοιχώματα του θαλάμου, από την εσωτερική ελεύθερη επιφάνεια του νερού και από τις επιφάνειες 1 και 2 (οι οποίες χωρίζουν το θάλαμο από τον αγωγό του στροβίλου και τις παρακαμπτήριες βαλβίδες αντίστοιχα) όπου η κινητική ενέργεια του αέρα θεωρείται μικρή. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του αέρα στην ατμόσφαιρα συμβολίζονται με  $a$ . Ο αέρας θεωρείται τέλειο αέριο με  $\frac{(p_a+p)}{\rho} = R$ ,  $du = C_v dt$ ,  $dh = C_p dt$ ,  $\gamma = C_p/C_v$ ,  $R = C_p - C_v$  ( $C_p, C_v$  σταθερά). [22]

Κατά την αποφόρτιση, ο αέρας εξέρχεται από το θάλαμο στην ατμόσφαιρα ( $p > 0$ ,  $w > 0$ ,  $w_v \geq 0$ ). Όπως στην περίπτωση της αργής αποφόρτισης του αέρα από ένα στερεό δοχείο μέσω μιας βαλβίδας ρύθμισης της ροής στην ατμόσφαιρα σε χαμηλότερη πίεση (η διαφορά είναι στο ότι εδώ η ελεύθερη επιφάνεια του νερού είναι ένα μετακινούμενο όριο) μπορεί να αποδειχθεί ότι η αποφόρτιση είναι αντιστρεπτή όσο η φόρτιση στο θερμοδυναμικό επίπεδο των μορίων του αέρα παραμένει μέσα στο θάλαμο και επομένως είναι μια ισεντροπική διαδικασία. Συνεπώς  $\rho(p_a + p)^{\frac{1}{\gamma}} = \text{σταθερό}$  κατά τη διάρκεια της κάθε περιόδου αδειάσματος/αποφόρτισης και

$$\left(\frac{d\rho}{dt}\right) = \left(1/\gamma RT\right)\left(\frac{d\rho}{dt}\right) \quad (5)$$

Η διαδικασία φόρτισης (γεμίσματος) ( $p < 0$ ,  $w < 0$ ,  $w_v \leq 0$ ), κατά τη διάρκεια της οποίας ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο από την ατμόσφαιρα, είναι πιο δύσκολο να μοντελοποιηθεί, εφόσον η ειδική εντροπία του αέρα αλλάζει (από την ατμοσφαιρική της τιμή) λόγω των απωλειών ιξώδους στο στρόβιλο και στους αγωγούς σύνδεσης, και η ειδική ενθαλπία επίσης αλλάζει λόγω της διεργασίας που εκτελείται στο στρόβιλο. [22]

Ο εισερχόμενος αέρας αναμιγνύεται αμέσως στο θάλαμο και η θερμοδυναμική

κατάσταση του αέρα θεωρείται σταθερή στο χρόνο. Θεωρώντας όπως πριν μια αδιαβατική διαδικασία, ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής γράφεται:

$$(h_1 - u)w + (h_2 - u)m_v + m\left(\frac{du}{dt}\right) - (p_a + p)q = 0,$$

όπου οι 2 πρώτοι όροι δηλώνουν τις συνθήκες στα ανοιχτά όρια  $S_1$  (έξοδος αγωγού) και  $S_2$  (έξοδος βαλβίδας παράκαμψης). Εφόσον δεν έχει γίνει καμία διεργασία στις βαλβίδες θα είναι  $h_1 = h_t$  (όπου το  $t$  δηλώνει συνθήκες στην έξοδο του στροβίλου) και  $h_2 = h_a$ . Εφόσον το αέριο θεωρείται τέλει, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ως:

$$(C_p T_t - C_v T)w + (C_p T_a - C_v T)w_v + mC_v\left(\frac{dT}{dt}\right) - (p_a + p)q = 0 \quad (6)$$

$$\text{όπου } T = (p_a + p)V/(mR).$$

Από τη θεωρία των στροβιλομηχανών είναι γνωστό ότι οι απώλειες ιξώδους στο στρόβιλο ανά μονάδα μάζας του αέρα είναι:

$$h_t - h_{1s} = h_1 - h_{1s} = C_p(T_1 - T_{1s}),$$

όπου  $T_{1s} = T_a[(p_a + p_t/p_a)]^{(\gamma-1)/\gamma}$  είναι η θερμοκρασία της θερμοδυναμικής κατάστασης της οποίας η πίεση είναι ίση με την πίεση  $p_a+p_t$  στην έξοδο του στροβίλου και η ειδική εντροπία είναι η ίδια με αυτή της εξωτερικής ατμόσφαιρας. Δηλώνοντας ως  $L = -(h_1 - h_{1s})w$  την ισχύ που χάνεται λόγω των φαινομένων ιξώδους στο στρόβιλο και τους συνδεδετικούς αγωγούς προκύπτει ότι : [22]

$$-C_p T_t w = -C_p T_a w [(p_a + p_t/p_a)]^{(\gamma-1)/\gamma} + L \quad (7)$$

Έτσι αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) και απαλοίφοντας το  $q$  μεταξύ της

προκύπτουσας εξίσωσης και της εξίσωσης (1) προκύπτει:

$$\frac{c_p}{\rho} \left[ \frac{1}{\gamma RT} \frac{dp}{dt} - \frac{d\rho}{dt} \right] = \frac{1}{T} \frac{L}{m} - C_p \frac{w}{m} \left[ \frac{T_{1s}}{T} - 1 \right] - C_p \frac{w_v}{m} \left[ \frac{T_a}{T} - 1 \right] \quad (8)$$

Η εξίσωση (8) συσχετίζει τη μεταβολή πυκνότητας με τη μεταβολή της πίεσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης (γεμίσματος). Οι απώλειες ισχύος  $L$  θεωρούνται ως μία γνωστή συνάρτηση της διαφοράς πίεσης  $p_i$  για μια συγκεκριμένη περιστροφική ταχύτητα του στρόβιλου. Η στιγμιαία τιμή της μάζας  $m$  σχετίζεται με τα  $w$  και  $w_v$  από τη σχέση :

$$m(t) = - \int_{t_i}^t (w + w_v) dt + m(t_i)$$

όπου  $t_i$  είναι ένας αρχικός χρόνος. [22]

Από τις γνωστές θερμοδυναμικές σχέσεις για τέλειο αέριο, προκύπτει ότι το αριστερό μέλος της εξίσωσης (8) είναι ίσο με την παράγωγο της ειδικής εντροπίας του αέρα μέσα στο θάλαμο κατά τη διάρκεια του γεμίσματος ( $ds/dt$ ). Τελικά, η μεταβολή του  $s$  οφείλεται στην είσοδο του αέρα (μέσω των επιφανειών  $S_1$  και  $S_2$ ) του οποίου η πίεση θεωρείται ίση με την πίεση του θαλάμου  $p_a+p$  αλλά η θερμοκρασία εισόδου ( $T_1=T_t$ ,  $T_2=T_a$  αντίστοιχα στα  $S_1$  και  $S_2$ ) και η εντροπία ( $s_1>s_a$ ,  $s_2>s_a$ ) είναι εντελώς διαφορετικές από τις αντίστοιχες τιμές του θαλάμου ( $T$ ,  $s$ ). Θεωρώντας σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες, είναι  $s>s_a$  (2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός Νόμος) αλλά το  $s$  θα πρέπει να οριοθετηθεί και έτσι η χρονικά μέση ποσότητα του δεξιού όρου της εξίσωσης (8) πάνω από μια μεγάλη χρονική περίοδο πρέπει να είναι μηδέν.

Στη συνέχεια εξετάζονται οι 3 όροι του δεξιού μέλους της εξίσωσης (8). Ο πρώτος είναι θετικός και σχετίζεται άμεσα με την αύξηση της εντροπίας λόγω των απωλειών ιξώδους στο στρόβιλο. Οι δύο άλλοι όροι εξαρτώνται από την εξωτερική και την εσωτερική θερμοκρασία. Ο δεύτερος όρος αναπαριστά τη συνεισφορά του αέρα καθώς μπαίνει στο

θάλαμο από τους αγωγούς εαν η μεταβολή στο στρόβιλο ήταν ισεντροπική (ιδανικός στρόβιλος). Και τέλος ο τρίτος όρος αναπαριστά τη συμβολή του αέρα μέσω των βαλβίδων παράκαμψης. Εφόσον οι τρεις όροι του δεξιού μέλους της εξίσωσης (8) εξαρτώνται διαφορετικά από το χρόνο, το άθροισμα τους θα κυμαίνεται γύρω από μια μηδενική χρονικά μέση τιμή. Προκύπτει ότι η ισεντροπική σχέση (5) αναμένεται να αναπαριστά μια λιγότερο αξιόπιστη διαδικασία προσέγγισης κατά τη διαδικασία γεμίματος από ότι κατά τη διάρκεια αδειάματος. [22].

#### 2.1.4 Στρόβιλος

Ο στρόβιλος είναι ευάλωτος στη διαφορά πίεσης  $p_t = p - p_v$ , όπου  $|p_v|$  είναι οι απώλειες της πίεσης στη βαλβίδα ρύθμισης της ροής ( $p_v=0$  αν η βαλβίδα είναι ανοιχτή ή αν δεν υπάρχει βαλβίδα). Αγνοώντας τις επιδράσεις των μεταβολών των αριθμών Reynolds και Mach, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του στρόβιλου μπορούν να γραφούν σε αδιάστατη μορφή ως :

$$\Phi = f_w(\Psi), \Pi = f_p(\Psi) \quad (9a,b)$$

όπου

$$\Phi = \frac{w}{\rho^* N D^3}, \Psi = \frac{p_t}{\rho^* N^2 D^2} \text{ και } \Pi = \frac{P}{\rho^* N^3 D^5}$$

είναι οι αδιάστατοι συντελεστές της ροής ,της πίεσης και της ισχύος αντίστοιχα,  $D$  είναι η εξωτερική διάμετρος του στροφέα του στρόβιλου,  $N$  η περιστροφική ταχύτητα (σε ακτίνια ανά μονάδα χρόνου) και  $P$  είναι η ισχύς εξόδου. Η μεταβλητή  $\rho^*$  είναι μια πυκνότητα αναφοράς, συνήθως θεωρείται η πυκνότητα στην είσοδο του στρόβιλου. Οι συναρτήσεις  $f_w$  και  $f_p$  εξαρτώνται από τη γεωμετρία του στρόβιλου, αλλά όχι από το μέγεθος και την περιστροφική του ταχύτητα. Εφόσον ο στρόβιλος είναι αυτορυθμιζόμενος,  $w$  και  $p_t$  παίρνουν θετικές καθώς και αρνητικές τιμές, το ίδιο ισχύει και για τους αντίστοιχους αδιάστατους συντελεστές  $\Phi$  και  $\Psi$ . Επιπλέον, υποτίθεται ότι ο

στρόβιλος και οι αγωγοί σύνδεσης είναι συμμετρικοί ως προς ένα περύγιο του άξονα περιστροφής και συνεπώς το  $f_w$  είναι μια περιττή συνάρτηση και  $f_p$  μια άρτια συνάρτηση [22].

Για μερικούς τύπους στροβίλων, ειδικά για τους στροβίλους Wells, η καμπύλη του  $\Pi=f_p(|\Psi|)$  παρουσιάζει ένα μέγιστο για μια κρίσιμη τιμή  $|\Psi|=\Psi_{cr}$ . Η συσκευή αποτελείται από μια βαλβίδα παράκαμψης ή από μια βαλβίδα ρύθμισης της ροής στον αγωγό του στροβίλου. Και στις δύο περιπτώσεις ο σκοπός της βαλβίδας είναι να εμποδίσει την υπέρβαση της διαφοράς πίεσης στο στρόβιλο από μια κρίσιμη τιμή (για να διατηρεί  $|\Psi|\leq\Psi_{cr}$ ). Αυτό γίνεται εναλλακτικά ανοίγοντας τη βαλβίδα by-pass ή ρυθμίζοντας τη βαλβίδα στον αγωγό του στροβίλου. Σημειώνεται ότι η κρίσιμη τιμή  $p_{cr}$  της  $p_i$  εξαρτάται από την περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου (είναι ανάλογη με το  $N^2$ )

### 2.1.5 Βαλβίδες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι αδιάστατες μεταβλητές οι οποίες περιγράφουν τη θέση ανοίγματος των βαλβίδων. Θεωρώντας πλήρη τυρβώδη ροή μέσω των βαλβίδων by-pass μπορεί να γραφτεί ότι:  $aA = \frac{|w_v|}{\sqrt{2\rho|p|}}$  όπου  $aA$  είναι η ενεργή επιφάνεια της διόδου της βαλβίδας,  $A$  είναι η επιφάνεια αναφοράς ( $A = (\pi D^2)/4$ ) και  $w_v = -dm/dt - w$  είναι ο βαθμός ροής μέσω των βαλβίδων. Η αδιάστατη μεταβλητή  $a$  παίρνει τις παρακάτω τιμές :

$$a=0 \text{ για } |P|<P_{cr}$$

$$a = \frac{\left|\frac{dm}{dt}\right| - w_{cr}}{A\sqrt{2\rho p_{cr}}} \text{ για } |p| = p_{cr} \quad (10)$$

Εδώ,  $w_{cr}$  είναι η (θετική) κρίσιμη τιμή του  $w$  η οποία αντιστοιχεί στην κρίσιμη πίεση  $p_{cr}$ . Ομοίως για τη βαλβίδα ρύθμισης της ροής η αδιάστατη μεταβλητή  $\beta$  δίνεται από τον τύπο:

$$\beta = \frac{A}{|w|} \sqrt{2\rho|p - p_t|}$$

Όπου  $A$  είναι η επιφάνεια αναφοράς ( $A = (\pi D^2)/4$ ) ( $\beta=0$  αν η βαλβίδα είναι ανοικτή ή αν δεν υπάρχει βαλβίδα ρύθμισης της ροής). Η μεταβλητή  $\beta$  παίρνει τις τιμές:

$$\beta=0 \text{ για } |\Phi| \leq \Phi_{cr}$$

$$\beta = \frac{A}{w_{cr}} \sqrt{2\rho|p| - p_{cr}}, \text{ για } |P| > P_{cr} \quad (11)$$

Στην πράξη, οι βαλβίδες δεν είναι συμμετρικές ως προς την κατεύθυνση της ροής και έτσι το  $\alpha$  δεν αναπαριστά απαραίτητα την ίδια θέση του ανοίγματος της βαλβίδας παράκαμψης για την εξωτερική (προς τα έξω) και εσωτερική (προς τα μέσα) ροή. Το ίδιο ισχύει για το  $\beta$  και για τη βαλβίδα ρύθμισης της ροής [22].

### 2.1.6 Θεωρητική Προσομοίωση

Τα προνόμια της χρήσης βαλβίδων by-pass ή throttle για τον περιορισμό της ροής του αέρα μέσω του στροβίλου σε μια συσκευή κυματικής ισχύος OWC επεξηγούνται κάνοντας αριθμητική προσομοίωση της λειτουργίας ενός συστήματος ισχύος [22].

Υιοθετείται μια απλή, διδιάστατη γεωμετρία για τα βυθισμένα στο νερό σταθερά όρια του συστήματος, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιήσει γνωστά, αναλυτικά αποτελέσματα για τον υδροδυναμικό συντελεστή εκπομπής  $B(\omega)$ .

Υποτίθεται ότι τα κύματα είναι μιας κατεύθυνσης και διαδίδονται στο νερό βάθους  $h$



προς την της OWC και εισέρχονται σε ένα κανάλι το οποίο αποτελείται από δύο παράλληλα οριζόντια τοιχώματα τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $b$  ίση με το εσωτερικό πλάτος του θαλάμου. Το πίσω τοίχωμα του θαλάμου εκτείνεται κάθετα στον πυθμένα όπου το βυθισμένο τμήμα του μπροστινού τοιχώματος θεωρείται αμελητέας ποσότητας και μικρού πάχους έτσι ώστε να μπορεί να αγνοηθεί η παραγόμενη διάθλαση (diffraction). Συμβολίζεται με  $a$  η απόσταση μεταξύ του πίσω και του μπροστινού τοιχώματος σε ένα επίπεδο ελεύθερης επιφάνειας νερού (μήκος θαλάμου).

Για τη γεωμετρία αυτή, ο υδροδυναμικός συντελεστής εκπομπής  $B(\omega)$  δίνεται από τον τύπο [39]:

$$B = -\frac{2\omega\mu b}{\rho_w g \kappa} \sin^2 \kappa a \quad (12)$$

Όπου το  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho_w$  είναι η πυκνότητα του νερού,  $\kappa$  είναι ο κυματάριθμος ο οποίος σχετίζεται με το  $\omega$  από τη σχέση διασποράς  $k \tanh kh = \sigma$ ,  $\sigma = \frac{\omega^2}{g}$  και  $\mu = (1 + \sigma h \operatorname{csch}^2 kh)^{-1}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις και τις υποθέσεις, το ισοζύγιο μάζας του αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{V_0}{\gamma \cdot \rho_a} \frac{dp}{dt} + \frac{Kp}{\rho_a} - \int_{-\infty}^t g_r(t-\tau) p(\tau) d\tau - 2 \frac{Ab\omega}{k} \cos(\omega t) \sin(\kappa a) = 0 \quad [40]$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αδιάστατες μεταβλητές:

$$\hat{g}_r = \frac{\pi \rho_w}{2b} g_r, \hat{k} = kh, \hat{\omega} = \omega \sqrt{\frac{h}{g}}, \hat{t} = t \sqrt{\frac{g}{h}}$$

Η εξίσωση (4) μπορεί να γραφεί ως:

$$\hat{g}_r(\hat{t}) = C_i(\Omega\hat{t}) - 2I_1 + I_2 - 2I_3 \quad (13)$$

όπου το  $\Omega$  είναι ένας θετικός αριθμός, το  $C_i(z)$  είναι η συνάρτηση ολοκληρώματος του συνημιτόνου και

$$C_i(\Omega\hat{t}) = \int_{\Omega}^{\infty} \frac{\cos(\hat{\omega} \cdot \hat{t})}{\hat{\omega}} d\hat{\omega}$$

$$I_1 = \int_0^{\Omega} \frac{\mu\hat{\omega}}{\hat{\kappa}} \sin^2 \frac{\hat{\kappa}a}{h} \cos\hat{\omega}\hat{t} d\hat{\omega}, I_2 = \int_{\Omega}^{\infty} \frac{1}{\hat{\omega}} \cos \frac{2\hat{\omega}^2 a}{h} \cos\hat{\omega}\hat{t} d\hat{\omega}, I_3 = \int_{\Omega}^{\infty} X(\hat{\omega}) \cos\hat{\omega}\hat{t} d\hat{\omega} \quad (14)$$

$$\text{Όπου } \chi(\hat{\omega}) = \frac{\mu\hat{\omega}}{\hat{\kappa}} \sin^2 \frac{\hat{\kappa}a}{h} - \frac{1}{\hat{\omega}} \sin^2 \frac{\hat{\omega}^2 a}{h} - 2e^{-2\hat{\omega}^2} \left[ \frac{\hat{\omega}a}{h} \sin^2 \frac{2\hat{\omega}^2 a}{h} + \left( \hat{\omega} - \frac{1}{\hat{\omega}} \right) \sin^2 \frac{\hat{\omega}^2 a}{h} \right]$$

όταν  $\hat{\omega} \rightarrow \infty$

Το  $C_i(z)$  έχει μια λογαριθμική ιδιομορφία στο  $z=0$  και  $C_i(z) \sim (1/2)\sin z$  όσο  $z \rightarrow \infty$ . Από το θεώρημα των Riemann – Lebesgue προκύπτει ότι τα ολοκληρώματα  $I_1$  και  $I_3$  τείνουν στο μηδέν εφόσον  $t \rightarrow \infty$ . Στην πραγματικότητα μπορεί να βρεθεί με ολοκλήρωση κατά μέλη ότι είναι  $O(1/t)$ , ακολουθώντας μια διαδικασία για την απόδειξη ότι το ολοκλήρωμα  $I_2$  συγκλίνει ομοιόμορφα ως προς  $t$  και είναι  $O(1/t)$  όταν  $t \rightarrow \infty$ . Καταλήγοντας σε αυτά τα αποτελέσματα μπορεί να θεωρηθεί ότι το  $g_r(t)$  έχει μια λογαριθμική ιδιομορφία στο  $t=0$  και είναι  $O(1/t)$  όταν  $t \rightarrow \infty$ . Το ολοκλήρωμα  $I_3$  είναι  $O\left([\alpha h^{-1} + 1]e^{-2\Omega^2}\right)$  και μπορεί να αγνοηθεί αν το  $\Omega$  είναι αρκετά μεγάλο.

Θεωρείται τώρα ένα τυχαίο κύμα και υποτίθεται αρχικά ότι είναι ομαλό με γωνιακή συχνότητα  $\omega$  και πλάτος  $A$ . Η περιοδική μεταβολή (ταλάντωση) της επιφάνειας μπορεί να γραφτεί ως :

$$\zeta(x, t) = A \sin(\omega t - kx + \theta) \quad (15)$$

όπου  $x$  είναι η οριζόντια συντεταγμένη, της οποίας η θετική κατεύθυνση είναι η κατεύθυνση

της προαγωγής του προσπίπτοντος κύματος, με  $x=0$  στο πίσω τοίχωμα. Εφόσον η διάθλαση μέσω του μπροστινού τοιχώματος αγνοείται, ο βαθμός διάθλασης της ροής  $q_i$  είναι απλός και εκτοπίζεται μεταξύ  $x=-a$  και  $x=0$ , από την ελεύθερη επιφάνεια του συστήματος σταθερού κύματος αποτελούμενου από την πρόσθεση (superposition) του τυχαίου κύματος και του αντανακλώντος κύματος στον πίσω τοίχο. Εύκολα βρίσκεται ότι:

$$q_i(t) = \frac{2Ab\omega}{\kappa} \sin(2ka) \cos(\omega t + \theta) \quad (16)$$

Η κίνηση του κύματος και η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας είναι χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα ταλάντωσης και είναι δύσκολο να οριστεί η στιγμιαία διαθέσιμη ισχύς της συσκευής. Η ικανότητα μετατροπής είναι σημαντική μόνο με όρους χρονικά μέσω ποσοτήτων. Η ροή της ενέργειας του προσπίπτοντος κύματος μπορεί να οριστεί ως το έργο που παράγουν οι δυνάμεις πίεσης στο κάθετο περύγιο  $x$ =σταθερό. Η μέση τιμή του σε ένα διάστημα  $t_1 \leq t \leq t_1 + \Delta t$  είναι μια συνάρτηση του  $x$  και του  $t_1$ , εκτός αν  $\Delta t$  είναι ένας ακέραιος πολλαπλάσιος αριθμός της κυματικής περιόδου  $2\pi/\omega$ , στην οποία περίπτωση δίνεται από τον τύπο:

$$E_i = \frac{A^2 b \rho_w g \omega}{4 \mu \kappa} \quad (17)$$

Θεωρείται ότι πραγματικά, μη ομαλά κύματα μπορούν να προσομοιωθούν από έναν πεπερασμένο αριθμό κυμάτων  $N$  και προκύπτει ότι:

$$\zeta(x, t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(\omega_n t - \kappa_n x + \theta_n) = \frac{H_s}{2\sqrt{2}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_m} \cdot t + \kappa_n x\right) \quad (18)$$

Όπου  $H_s$  είναι το μήκος κύματος,

$T_m$  είναι η περίοδος του κύματος και

κ ο κυματαριθμός

Ο βαθμός διάθλασης της ροής γίνεται τώρα:

$$q_i(t) = 2b \sum_{n=1}^N \frac{A_n \omega_n}{k_n} \sin(2k_n a) \cos(\omega_n t + \theta_n) \quad (19)$$

Για κάθε επιθυμητό βαθμό προσέγγισης μπορούμε να γράψουμε ότι  $\omega_n = \omega_o/N_n$  όπου  $N_n$  είναι ένας ακέραιος αριθμός και προκύπτει ότι το κύμα που αναπαρίσταται από την εξίσωση (18) είναι περιοδικό, με χρονική περίοδο  $T = 2\pi M/\omega_o$ , όπου το  $M$  είναι το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο του  $N_n$  ( $n=1,2,\dots,N$ ). Συνεπώς η διακύμανση της ενέργειας του τυχαίου κύματος κυμαίνεται από μια χρονική περίοδο  $t_1 \leq t \leq t_1 + T$  και είναι ανεξάρτητη του  $x$  και του  $t_1$  και ισούται με το άθροισμα της κάθε συνιστώσας ξεχωριστά:

$$E_i = \frac{b\rho_w g}{4} \sum_{n=1}^N \frac{A_n^2 \omega_n}{\mu_n k_n} \quad (20)$$

Η συχνότητα του κύματος ορίζεται από την ενεργό περίοδο  $T_e$  η οποία εξαρτάται άμεσα από την  $T_m$  από τη σχέση:  $T_e = 0.8997 T_m$ .

Στην συνέχεια παρουσιάζεται μια απλουστευμένη μέθοδος μοντελοποίησης του Σταθμού τύπου OWC.

### **Απλουστευμένη Μοντελοποίηση Υδάτινης στήλης**

Οι Corsini και Rispoli [40] πρότειναν ότι η πίεση του αέρα μέσα στο θάλαμο της υδάτινης στήλης μπορεί να υπολογιστεί μέσω μιας απλουστευμένης σχέσης η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του θαλάμου ( $a, b, h, V_0$ ), τη θερμοδυναμική του αέρα ( $p_a, \rho_a, \gamma$ ) καθώς και τα χαρακτηριστικά του κύματος ( $A, T, \omega, k$ ). Σε αυτή την περίπτωση η πίεση του αέρα στην υδάτινη στήλη OWC δίνεται από τον τύπο:

$$p(t) \cong P_{FT} f_{wave} f_{chamber} \quad (21)$$

Όπου το μοντέλο της πίεσης  $p_{FT}$  το οποίο βασίζεται στο μετασχηματισμό Fourier ορίζεται ως:

$$P_{FT} = \frac{2b\omega A \sin(ak + \theta) / k}{\sqrt{\left(\frac{2\mu b\omega \sin^2(ak + \theta)}{g\rho_w k} + \frac{K}{\rho_a}\right)^2 + \left(\frac{\omega V_0}{\gamma P_a}\right)^2}} \quad (22)$$

$$f_{wave} = (0.079T_m + 0.4223)^{-1} \quad (23)$$

και

$$f_{chamber} = (0.05a + 0.45) \quad (24)$$

Από ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει ότι το θαλάσσιο κύμα δέχεται μεγάλη επίδραση από την περίοδο του κύματος  $T_m$ , ενώ η εξάρτηση από τη γεωμετρία του θαλάμου φαίνεται από το μήκος του θαλάμου  $a$ .

Η τελική έκφραση της εξίσωσης (21) δίνεται από τη σχέση:

$$p(t) = \frac{2b\omega A \sin(ak) / k}{\sqrt{\left(\frac{2\mu b\omega \sin^2(ak)}{g\rho_w k} + \frac{K}{\rho_a}\right)^2 + \left(\frac{\omega V_0}{\gamma P_a}\right)^2}} \cdot \frac{0.05a + 0.45}{0.079T + 0.4223} \quad (25)$$

### **Οι συνιστώσες του θαλάμου της παλλόμενης υδάτινης στήλης**

Η εξίσωση της πίεσης (25) χρησιμοποιείται για να αναπτυχθεί το μοντέλο του θαλάμου της υδάτινης στήλης κατά τη διάρκεια εισόδου και εξόδου του κύματος. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται στους πίνακα 2

**Πίνακας 1:** Μοντέλο του θαλάμου της υδάτινης στήλης OWC, περιγραφή των μεταβλητών

Παράμετρος	Συμβολισμός	Περιγραφή	Τιμές
1	$a$	Μήκος θαλάμου (m)	12
2	$b$	Πλάτος θαλάμου (m)	12
3	$V_0$	Όγκος θαλάμου σε ιδανικές συνθήκες (m <sup>3</sup> )	1050
4	$H$	Βάθος νερού (m)	8
5	$p_a$	Ατμοσφαιρική πίεση (Pa)	101325
6	$\rho_a$	Πυκνότητα αέρα (Kg/m <sup>3</sup> )	1.25
7	$\rho_w$	Πυκνότητα νερού (Kg/m <sup>3</sup> )	1025
8	$nturb$	Αριθμός στροβίλων	1
9	$K$	Σταθερά αναλογίας μεταξύ ροής αέρα και πτώσης πίεσης για το στρόβιλο Wells	0.00549
<b>Είσοδος</b>	<b>Συμβολισμός</b>	<b>Περιγραφή</b>	
1	$H_S$	Ειδικό ύψος κύματος	0,6
2	$T_m$	Μέση τιμή της περιόδου του κύματος	5
<b>Έξοδος</b>	<b>Συμβολισμός</b>	<b>Περιγραφή</b>	
1	$p$	Πίεση ταλάντωσης (Pa)	
2	$E_{wave}$	Ειδική ενέργεια κύματος (kW/m)	

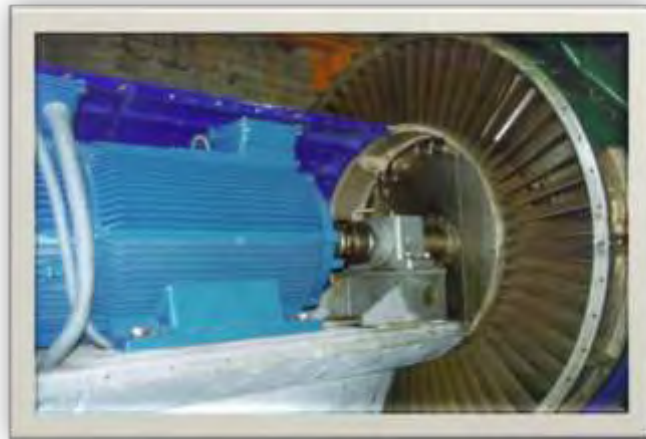
Η ειδική ενέργεια του κύματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{wave} = \frac{\rho_w g A^2 \omega}{4\mu k} \quad (26)$$

Η εξίσωση (26) παρέχει ένα μέτρο του ποσού της ενέργειας που απελευθερώνεται στην ακτογραμμή από τα κύματα. Επιπλέον η ειδική ενέργεια κύματος  $E_{wave}$  χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την απόδοση της συσκευής η οποία είναι η σχέση μεταξύ της ισχύος εξόδου και του συνολικού ποσού ενέργειας που εκλύεται από τα κύματα στην επιφάνεια της συσκευής.

### **Οι συνιστώσες του αεροστροβίλου τύπου Wells**

Το μοντέλο του αεροστροβίλου (Εικόνα 13) έχοντας ως βάση την ισχύ εισόδου του αέρα, υπολογίζει τη στιγμιαία μηχανική ισχύ η οποία μετατρέπεται από την υδάτινη στήλη OWC.



**Εικόνα 13** Στρόβιλος και γεννήτρια

Οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το μοντέλο είναι της μορφής  $\Pi = f_p(\Psi)$

όπου:  $\Psi = p/(\rho_0 N^2 D^2)$  και  $\Pi = P/(\rho_0 N^3 D^5)$  είναι οι αδιάστατοι συντελεστές της πίεσης και της ισχύος αντίστοιχα,  $D$  είναι η εξωτερική διάμετρος του στροβίλου,  $N$  η ταχύτητα περιστροφής και  $P$  η ισχύς εξόδου. Η μεταβλητή  $\rho_0$  είναι η πυκνότητα αναφοράς και υπολογίζεται ως η στάσιμη πυκνότητα στην είσοδο του στροβίλου. Η συνάρτηση  $f_p$  εξαρτάται από τη γεωμετρία του στροβίλου, αλλά όχι από το μέγεθος και την ταχύτητα περιστροφής. Η pre-stall περιοχή υπολογίζεται με ένα πολυώνυμο δεύτερης τάξης της μορφής:

$$\Pi = a_1 \Psi^2 + b_1 \Psi + c_1$$

**Πίνακας 2:** Μοντέλο του αεροστροβίλου, περιγραφή των μεταβλητών

Παραμετρος	Όνομα	Περιγραφή	Τιμη
1	$a$	Μήκος θαλάμου (m)	12
2	$N$	Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου (rpm)	1500
3	$D$	Διάμετρος στροβίλου (m)	2.3
4	$\rho_a$	Πυκνότητα αέρα (Kg/m <sup>3</sup> )	1.25
5	$p_{cr}$	Κρίσιμη πίεση πριν από την ακινητοποίηση	5000
6	$a_1$	Πρώτος αδιάστατος συντελεστής της καμπύλης ισχύος έναντι του αδιάστατου συντελεστή της πίεσης	0.225
7	$b_1$	Δεύτερος αδιάστατος συντελεστής της καμπύλης ισχύος έναντι του αδιάστατου συντελεστή της πίεσης	0.0037
8	$c_1$	Τρίτος αδιάστατος συντελεστής της καμπύλης ισχύος έναντι του αδιάστατου συντελεστή της πίεσης	-0.000075



Είσοδος	Όνομα	Περιγραφή	Τιμή
1	$p$	Πίεση ταλάντωσης (Pa)	618,674
2	$E_{wave}$	Ισχύς κύματος (KW/m)	1045,13
3	$T_m$	Μέση τιμή της περιόδου του κύματος	5
Output	Name	Description	Set value
1	$P_t$	Ισχύς στρόβιλου	
2	$n$	Βαθμός απόδοσης υδάτινης στήλης	

Οι έξοδοι του αεροστροβίλου είναι η παραγόμενη ισχύς και ο βαθμός απόδοσης της υδάτινης στήλης OWC, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{\bar{P}_{TOT}}{E_{WAVE} \cdot a}$$

## 2.2 Στοχαστικό μοντέλο

Οι στοχαστικές μέθοδοι σε σχέση με τις ντετερμινιστικές αναλύσεις απαιτούν λιγότερους υπολογισμούς για την πρόβλεψη της μέσης ισχύος εξόδου σε κάθε θαλάσσια κατάσταση και είναι επαρκείς για το σχεδιασμό της εγκατάστασης του σταθμού κυματικής ενέργειας και του εξοπλισμού ισχύος (στρόβιλος και γεννήτρια), εφόσον το σύστημα θεωρείται γραμμικό.

Στο στοχαστικό μοντέλο το κλίμα του κύματος αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο θαλάσσιων καταστάσεων, το οποίο χαρακτηρίζεται από ένα φάσμα ισχύος. Η διακύμανση και η κατανομή πιθανότητας της πίεσης του αέρα μέσα στο θάλαμο υπολογίζονται για κάθε θαλάσσια κατάσταση και οι υδροδυναμικοί συντελεστές του θαλάμου και οι χαρακτηριστές

καμπύλες του στροβίλου θεωρούνται γνωστές, επιτρέποντας τη μέση λειτουργία του συστήματος και του στροβίλου σε κάθε θαλάσσια κατάσταση για το ετήσιο κλίμα κύματος.

### 2.2.1 Τυχαία Κύματα

Το τοπικό κλίμα κύματος εκπροσωπείται από ένα σύνολο θαλάσσιων καταστάσεων. Για μια θαλάσσια κατάσταση η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $f(\zeta)$  της ανύψωσης της επιφάνειας  $\zeta$  από ένα σημείο αναφοράς θεωρείται Gaussian:

$$f(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\zeta} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2\sigma_\zeta^2}\right)$$

όπου  $\sigma_\zeta^2$  είναι η διακύμανση και  $\sigma_\zeta$  είναι η τυπική απόκλιση του  $\zeta$ . Υποτίθεται ότι το κλίμα κύματος δεν επηρεάζεται από την παρουσία του συστήματος ή τουλάχιστον δεν επηρεάζεται από την «ακτινοβολία» του κυματικού πεδίου εξαιτίας της ταλάντωσης της πίεσης αέρα μέσα στο θάλαμο του συστήματος. Υποτίθεται μια χρονική παύση διάρκειας  $T$  και λαμβάνεται η τυχαία ανύψωση της επιφάνειας σύμφωνα με τον τύπο:

$$\zeta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(in\omega_1 t) \quad (27)$$

όπου  $\omega_1 = 2\pi/T$ . Οι συντελεστές  $A_n$  είναι στιγμιαίες μιγαδικές μεταβλητές μηδενικής μέσης τιμής. Θεωρείται ότι το κυματικό πεδίο αποτελείται από κύματα διαφορετικών κατευθύνσεων και έτσι:

$$A_n = \sum_{m=1}^M U_{mn} \quad (28)$$

Ο δείκτης  $m$  σχετίζεται με τη γωνία κατεύθυνσης του κύματος  $\theta_m = 2\pi m/M$ . Αν το βάθος του νερού είναι σταθερό και ίσο με  $h$  τότε σε ένα οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων  $(x,y)$  με τις γωνίες  $\theta_m$  υπολογισμένες από τη  $x$  κατεύθυνση προκύπτει:

$$\zeta(x, y; t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_{mn} \exp[i(n\omega_1 t - k_n x \cos\theta_m - k_n y \sin\theta_m)] \quad (29)$$

όπου ο κυματορυθμός  $k_n$  είναι η θετική ρίζα της εξίσωσης  $n^2\omega_1^2 = gk_n \tanh(k_n h)$

Η διακύμανση της ανύψωσης,  $\sigma_\zeta^2$  σχετίζεται με το διακριτό φάσμα ισχύος από τη σχέση:

$$\sigma_\zeta^2 = E\{\zeta\zeta^*\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{n'=-\infty}^{\infty} \exp[i(n - n')\omega_1 t] E[A_n A_{n'}^*] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma_n^2 \quad (30)$$

Στην περίπτωση όπου  $T \rightarrow \infty$ ,  $\omega_1 \rightarrow \infty$ .

Αντί του διακριτού φάσματος ισχύος λαμβάνεται τώρα ένα συνεχές φάσμα ισχύος. Το άθροισμα της εξίσωσης (30) αντικαθίσταται από ένα ολοκλήρωμα:

$$\sigma_\zeta^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_\zeta(\omega) d\omega \quad (31)$$

Σημειώνεται ότι το  $S_\zeta(\omega)$  είναι ένα αμφίπλευρο φάσμα πυκνότητας το οποίο ορίζεται στο διάστημα  $(-\infty, \infty)$  και είναι μια ομαλή συνάρτηση που σχετίζεται με το μονόπλευρο φάσμα πυκνότητας ισχύος:  $S_\zeta^{(1)}(\omega)$  από  $S_\zeta^{(1)}(\omega) = 2S_\zeta(\omega)$  αν  $\omega > 0$ ,  $S_\zeta^{(1)}(\omega) = 0$  αν  $\omega \leq 0$ .

## 2.2.2 Μετατροπή της ενέργειας

Η κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μέσα στο θάλαμο εκτοπίζει ορισμένο όγκο ροής του αέρα  $q(t)$  και παράγει περιοδική μεταβολή της πίεσης του αέρα  $p(t) + p_a$  ( $p_a$  = ατμοσφαιρική πίεση). Ισχύει ότι  $q(t) = q_d(t) + q_r(t)$ , όπου  $q_d$  είναι ο ρυθμός διάθλασης της ροής μέσω των τυχαίων κυμάτων αν η εσωτερική πίεση διατηρούνταν σταθερή και ίση με  $p_a$  και  $q_r$  είναι η «ακτινοβολία» του ρυθμού ροής μέσω της ταλάντωσης της πίεσης του αέρα, απουσία κυμάτων.

Η παροχή της μάζας του αέρα καθώς φεύγει από το θάλαμο μέσω του στροβίλου είναι:  $\dot{m} = -d(\rho V)/dt$ , όπου  $\rho$  και  $V$  είναι η πυκνότητα του αέρα και ο όγκος αέρα μέσα στο θάλαμο, αντίστοιχα. Υποτίθεται ότι οι σχετικές μεταβολές των  $\rho$  και  $V$  είναι μικρές και ότι το

$\rho$  σχετίζεται με την πίεση  $p+p_a$  μέσω μιας γραμμικής σχέσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι

$$dV/dt = -q$$

$$\dot{m} = \rho_a q - \frac{V_o}{c_a^2} \frac{dp}{dt} \quad (32)$$

Εδώ  $\rho_a$  και  $c_a$  είναι αντίστοιχα η πυκνότητα του αέρα και η ταχύτητα του ήχου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και  $V_o$  είναι η αρχική τιμή του  $V$ .

Για τη συσχέτιση του  $m$  με το  $p$  εισάγονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του στροβίλου. Εφαρμόζοντας διαστατική ανάλυση στην ασυμπίεστη ροή του στροβίλου λαμβάνονται οι σχέσεις:

$$\Pi = f_p(\Psi) \quad (33a)$$

$$\Phi = f_\phi(\Psi) \quad (33b)$$

Όπου

$$\Psi = \frac{p}{\rho_a N^2 D^2} \quad (34a)$$

$$\Phi = \frac{\dot{m}}{\rho_a N D^3} \quad (34b)$$

$$\Pi = \frac{P_t}{\rho_a N^3 D^5} \quad (34c)$$

Η εξίσωση (33b) για το στρόβιλο Wells (με ή χωρίς οδηγητικές βάνες) είναι περίπου γραμμική και παίρνει τη μορφή  $\Phi = K\Psi$ , όπου το  $K$  είναι μια σταθερά αναλογίας εξαρτημένη από τη γεωμετρία του στροβίλου αλλά όχι από το  $N$ , το  $p_a$  ή το  $D$ . Συνεπώς αν δίνεται η γεωμετρία του στροβίλου δημιουργείται η σχέση:

$$\dot{m} = \frac{K D p}{N} \quad (35)$$

Αυτό σημαίνει ότι για ένα συγκεκριμένο στρόβιλο με σταθερή περιστροφική ταχύτητα, δημιουργείται μια γραμμική σχέση μεταξύ του βαθμού ροής μάζας και της διακύμανσης της πίεσης.

Θεωρείται τώρα ένα τυχαίο ομαλό κύμα, του οποίου η ανύψωση σε ένα συγκεκριμένο σημείο είναι  $e^{i\omega t}$  (σε μονάδες πλάτους) και του οποίου η κατεύθυνση υποδηλώνεται από τη γωνία  $\theta$ . Στο πλαίσιο εργασίας της γραμμικής θεωρίας του κύματος, ο ρυθμός διάθλασης του όγκου ροής που εκτοπίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού μέσα στο θάλαμο είναι:

$$q_d = \Gamma(\omega, \theta)e^{i\omega t}$$

Η μιγαδική συνάρτηση  $\Gamma(\omega, \theta)$  είναι η συχνότητα απόκρισης του γραμμικού συστήματος (ή συντελεστής διέγερσης του όγκου ροής) και θεωρείται γνωστή. Αν οι εξισώσεις (32) και (35) θεωρηθούν αποδεκτές προσεγγιστικές διαδικασίες, τότε όλο το σύστημα είναι γραμμικό και ισχύει το εξής:

$$\{p, \dot{m}, q, q_r\} = \{P, \dot{M}, Q, Q_r\}e^{i\omega t} \quad (36)$$

όπου  $P, \dot{M}, Q$  και  $Q_r$  είναι μιγαδικά πλάτη. Ισχύει  $Q_r = -(B + iC)P$ , όπου  $B$  και  $C$  είναι πραγματικοί αριθμοί και το  $B$  είναι μη-αρνητικός. Ως είσοδο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του κύματος μπορεί να θεωρηθεί ο όρος  $B+iC$ , όπου  $B$  η αγωγιμότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κύματος και  $C$  η ανακλώμενη (susceptance) ακτινοβολία. Αυτοί οι υδροδυναμικοί συντελεστές θεωρούνται γνωστοί ως συναρτήσεις της συχνότητας  $\omega$  για τη γεωμετρία του θαλάμου από θεωρητικές ή αριθμητικές προσομοιώσεις ή από πειράματα. Από τις εξισώσεις (32) και (34b) προκύπτει ότι

$$P = \Gamma \Lambda \quad (37)$$

όπου

$$\Lambda = \left[ \left( \frac{KD}{\rho_a N} + B \right) + i \left( \frac{\omega V_o}{\gamma p_a} + c \right) \right]^{-1} \quad (38)$$

Η μιγαδική ποσότητα  $\Lambda$  είναι η συχνότητα απόκρισης σε ότι αφορά την πίεση (ως έξοδο) και το βαθμό διάθλασης της ροής (ως είσοδο) και το γινόμενο  $\Gamma\Lambda$  είναι η συχνότητα απόκρισης του γραμμικού συστήματος του οποίου η είσοδος είναι η στιγμιαία διακύμανση του κύματος και η έξοδος είναι η πίεση του αέρα. Αν η επιφάνεια ανύψωσης δίνεται από τις εξισώσεις (27) και (28) τότε όλο το σύστημα είναι γραμμικό και γράφεται :

$$\{q_d, p\} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_{mn} \times \{\Gamma(n\omega_1, \theta_m), \Gamma(n\omega_1, \theta_m)\Lambda(n\omega_1)\} e^{i\omega t} \quad (39)$$

Η πίεση του αέρα  $p(t)$  είναι μια στιγμιαία μεταβλητή μέση τιμή της οποίας η διακύμανση είναι:

$$\sigma_p^2 = E\{|p|^2\} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma_{mn}^2 |\Gamma(n\omega_1, \theta_m)\Lambda(n\omega_1)|^2 \quad (40)$$

$$\text{όπου } \sigma_{mn}^2 = E\{|U_{mn}|^2\} \quad (41)$$

Αν η θαλάσσια κατάσταση αναπαρίσταται από ένα διδιάστατο τυχαίο φάσμα ισχύος του κύματος  $S_z(\omega, \theta)$  τότε αντί της εξίσωσης (40) λαμβάνεται η εξής:

$$\sigma_p^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{q_d}(\omega) |\Lambda(\omega)|^2 d\omega \quad (42)$$

$$\text{όπου } S_{q_d}(\omega) = \int_0^{2\pi} S_z(\omega, \theta) |\Gamma(\omega, \theta)|^2 d\theta \quad (43)$$

και  $S_{q_d}$  είναι το φάσμα πυκνότητας για το ρυθμό διάθλασης της ροής  $q_d$  που εξαρτάται από τη θαλάσσια κατάσταση και τη γεωμετρία του θαλάμου (αλλά όχι από το στρόβιλο).

Από την άλλη πλευρά το  $\Lambda(\omega)$  εξαρτάται από τη γεωμετρία του θαλάμου και από το στρόβιλο αλλά όχι από τη θαλάσσια κατάσταση.

Σημειώνεται επίσης ότι εφόσον το σύστημα είναι γραμμικό και η ανύψωση της επιφάνειας  $\zeta$  θεωρείται μια τυχαία Gaussian συνάρτηση, τότε τα  $q_d$  και  $p$  είναι επίσης Gaussian συναρτήσεις.

Η στιγμιαία ισχύς εξόδου του στροβίλου είναι (εξίσωση 33α)

$$P_t(t) = \rho_\alpha N^3 D^5 f_p \left( \frac{p(t)}{\rho_\alpha N^2 D^2} \right) \quad (44)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πίεση  $p(t)$  έχει μια Gaussian κατανομή συχνότητας και διακύμανση  $\sigma_p^2$  λαμβάνεται η μέση τιμή για την ισχύ εξόδου του στροβίλου ως:

$$\bar{P}_t = \frac{\rho_\alpha N^3 D^5}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{p^2}{2\sigma_p^2}\right) f_p\left(\frac{p}{\rho_\alpha N^2 D^2}\right) dp \quad (45)$$

Σε αδιάστατη μορφή

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{\psi^2}{2\sigma_\psi^2}\right) f_p(\Psi) d\Psi \quad (46)$$

Όπου το  $\bar{\Pi}$  είναι η μέση τιμή του  $\Pi$  (ή ισοδύναμα η αδιάστατη τιμή του  $\bar{P}_t$ ) και

$$\sigma_\psi = \frac{\sigma_p}{\rho_\alpha N^2 D^2} \quad (47)$$

Αν η γεωμετρία του θαλάμου, ο σρόβιλος και η περιστροφική ταχύτητα είναι σταθερά, τότε οι εξισώσεις (45) ή (46) μαζί με την εξίσωση (42) δίνουν τη μέση ισχύ εξόδου ως συνάρτηση του εκπεμπόμενου βαθμού ροής του φάσματος πυκνότητας  $S_{q_d}(\omega)$  το οποίο χαρακτηρίζει τη θαλάσσια κατάσταση.

Η στιγμιαία διαθέσιμη ισχύς του στροβίλου είναι:

$$P_{avai} = \frac{\dot{m}}{\rho_\alpha} p \quad (48)$$

και η στιγμιαία απόδοση του στροβίλου είναι:

$$n = \frac{P_t}{P_{avai}} = \frac{\Pi}{\Phi\Psi} \quad (49)$$

Αν  $\Phi = K\Psi$  ( $K$ =σταθερό), τότε είναι  $n = \Pi K^{-1}\Psi^{-2}$

Η μέση διαθέσιμη ισχύς δίνεται από:

$$\bar{P}_{avai} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{avai} f(p) dp = \frac{1}{\rho_{\alpha}\sqrt{2\pi}\sigma_p} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{m} p \exp\left(-\frac{p^2}{2\sigma_p^2}\right) dp \quad (50)$$

ή σε αδιάστατη μορφή

$$\bar{\Pi}_{avai} = \frac{\bar{P}_{avai}}{\rho_{\alpha}N^3D^5} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} f_Q(\Psi) p \exp\left(-\frac{\Psi^2}{2\sigma_{\Psi}^2}\right) \Psi d\Psi \quad (51)$$

Αν  $\Phi = K\Psi$  και κάνοντας χρήση του αποτελέσματος

$$\int_0^{\infty} x^{1/2} e^{-x} dx = \Gamma(3/2) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{ καταλήγουμε [19] στο εξής}$$

$$\bar{\Pi}_{avai} = K\sigma_{\Psi}^2 \quad (52)$$

Η μέση απόδοση του στροβίλου είναι  $\bar{n} = \frac{\bar{P}_t}{\bar{P}_{avai}} = \frac{\bar{\Pi}}{\bar{\Pi}_{avai}}$

Και θεωρώντας  $\Phi=K\Psi$  απλοποιείται σε

$$\bar{n} = \frac{\bar{\Pi}}{K\sigma_{\Psi}^2} \quad (53)$$

Για μια συγκεκριμένη γεωμετρία στροβίλου και αν η συνάρτηση  $f_p$  είναι γνωστή, τότε η εξίσωση (46) αναπαριστά, σε αδιάστατη μορφή, τη μέση ισχύ εξόδου του στροβίλου ως συνάρτηση της ρίζας αθροίσματος διαφορών μέσω της πίεσης ταλάντωσης. Η καμπύλη που αναπαριστά αυτή την εξίσωση είναι πιο χρήσιμη σε εφαρμογές με πραγματικά τυχαία κύματα από ότι η συμβατική/τυπική καμπύλη που δίνεται από την εξίσωση (34c) για μια στιγμιαία ισχύ εξόδου. Το ίδιο μπορεί να ειπωθεί και για τις εξισώσεις της απόδοσης. Υπενθυμίζεται ότι τα αποτελέσματα που εξάγονται πιο πάνω ισχύουν μόνο για γραμμικούς στροβίλους.



### 2.2.3 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης ενός σταθμού κυματικής ισχύος τύπου παλλόμενης υδάτινης στήλης. Η πρώτη προσέγγιση αφορά την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. Η δεύτερη αφορά μια στοχαστική ανάλυση για κλίματα κύματος τα οποία χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο θαλάσσιων καταστάσεων με δεδομένο φάσμα ισχύος.

Η ανάλυση βασίστηκε στις ακόλουθες υποθέσεις:

- Ισχύει η γραμμική θεωρία του κύματος, η οποία αποκλείει τα μεγάλα ύψη κύματος και αγνοεί την επίδραση του ιξώδους κατά την απορρόφηση της κυματικής ενέργειας
- Η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας είναι Gaussian
- Το σύστημα μετατροπής της παλλόμενης θαλάσσιας επιφάνειας σε περιοδική μεταβολή της πίεσης αέρα θεωρείται γραμμικό και αγνοεί τη μη-γραμμική συμπεριφορά του ελατηρίου μέσω της συμπιεστότητας του αέρα στο θάλαμο και της μη γραμμικότητας των στροβίλων Wells.
- Αγνοούνται οι επιδράσεις των αριθμών Reynolds και Mach κατά τη διαστατική ανάλυση της απόδοσης του αεριοστροβίλου.
- Τα φαινόμενα υστέρησης κατά τη ροή διαμέσω του στροβίλου θεωρούνται μηδενικά.

Εκτός από αυτούς τους περιορισμούς, αυτές οι μέθοδοι είναι σημαντικά εργαλεία για την ανάλυση και το σχεδιασμό του στροβίλου Wells και της παλλόμενης υδάτινης στήλης ενός συστήματος OWC.

## Κεφάλαιο 3 Βελτιστοποίηση

### 3.1.1 Διαδικασία βελτιστοποίησης του στροβίλου

Η μέθοδος μοντελοποίησης που παρουσιάζεται ανωτέρω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα συγκεκριμένο σταθμό OWC με γνωστό κλίμα κύματος. Το τοπικό κλίμα κύματος χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο  $\zeta$  αντιπροσωπευτικών θαλάσσιων καταστάσεων, έχοντας η καθεμία το δικό της φάσμα πυκνότητας  $S_{\zeta,j}(\omega, \theta)$  και τη συχνότητα εμφάνισης  $\Phi_j$  ( $j=1$  έως  $\zeta$ ,  $\sum \Phi_j = 1$ )

Θεωρείται ότι οι υδροδυναμικοί συντελεστές  $\Gamma(\omega, \theta)$ ,  $B(\omega)$  και  $C(\omega)$  είναι γνωστοί, όπως επίσης και το  $V$  (όγκος θαλάμου πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια νερού σε αδιατάρακτες συνθήκες και σε ατμοσφαιρικές συνθήκες  $p_a$  και  $p_o$  (πίεση)). Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται για ένα συγκεκριμένο τύπο στροβίλου Wells, του οποίου η συνάρτηση  $f_p(\Psi)$  και ο παράγοντας  $K$  είναι γνωστά (από δοκιμές αεροδυναμικών μοντέλων). Για αεροδυναμικούς λόγους (για την αποφυγή κρουστικού κύματος), η ταχύτητα των πτερυγίων κορυφής του στροβίλου  $ND/2$  θα πρέπει να έχει κάποιον περιορισμό και έτσι  $ND \leq 2M_{\max}ca$ , όπου  $M_{\max}$  είναι ο αριθμός Mach (μεταξύ 0.5-0.6). Η διακύμανση της πίεσης  $\sigma_{p_j}$  για κάθε θαλάσσια κατάσταση μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις (17) και (18) από τις οποίες προκύπτει το  $\bar{P}_{t,j}$ , για συγκεκριμένο  $D$  και  $N_j$ , από την εξίσωση (20) (ή  $\bar{P}_j$  από την εξίσωση (46)). Η μέση ετήσια ισχύς εξόδου δίνεται από:  $\bar{P}_{t,ann} = \sum \bar{P}_{t,j} \Phi_j$ .

Η μέθοδος βελτιστοποίησης εξαρτάται από το αν η περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου  $N$  μπορεί να ελεγχθεί για να ταιριάζει σε κάθε θαλάσσια κατάσταση ή διατηρείται σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου. Το κύριο πλεονέκτημα της σταθερής περιστροφικής ταχύτητας είναι η χρήση φθηνότερου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Ένα πλεονέκτημα της μεταβλητής περιστροφικής ταχύτητας είναι ότι επιτρέπει την αποθήκευση

της ενέργειας ως κινητική εξομαλύνοντας την ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται στο ηλεκτρικό δίκτυο ισχύος (αυτό είναι ιδιαίτερος σημαντικό για μικρά δίκτυα).

Ακόμα και όταν προσομοιώνεται μεταβλητή περιστροφική ταχύτητα, το  $N$  θεωρείται ότι παραμένει αμετάβλητο σε κάθε ξεχωριστή θαλάσσια κατάσταση. Αν ληφθεί αυτή η περίπτωση και αν η αδράνεια των περιστροφικών τμημάτων είναι αρκετά μεγάλη, τότε είναι λογικό να θεωρηθεί ότι οι ταλαντώσεις του  $N$  είναι αρκετά μικρές κατά τη διάρκεια της κάθε θαλάσσιας κατάστασης. Για πρακτικούς λόγους στους υπολογισμούς που γίνονται θεωρούνται μόνο 9 θαλάσσιες καταστάσεις ( $J=9$ ). Ο στρόβιλος θεωρείται όμοιος προς εαυτόν και το μέγεθος του στροβίλου (η εξωτερική διάμετρος του στροβίλου,  $D$ ) καθορίζεται από το κλίμα κύματος.

Στην πραγματικότητα όμως ενδιαφερόμαστε περισσότερο για μεγιστοποίηση του κέρδους από ότι για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Το κέρδος δεν αφορά μόνο την ετήσια παραγωγή ενέργειας (η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του στροβίλου και το βαθμό απόδοσης ισχύος της γεννήτριας) αλλά και την επένδυση που απαιτείται για την αγορά και εγκατάσταση του εξοπλισμού (το κόστος αυξάνεται με το μέγεθος του στροβίλου και της γεννήτριας), το κόστος εργασιών και συντήρησης και από την τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον παραγωγό. Η τιμή αυτή εξαρτάται από την πολιτική του κάθε κράτους απέναντι στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η εφαρμογή που εξετάζουμε αφορά έναν υπάρχον σταθμό OWC όπου η γεωμετρία της κατασκευής είναι σταθερή (συγκεκριμένη) και μεταβάλλονται η τιμή μονάδας της ενέργειας, η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, το προεξοφλητικό επιτόκιο καθώς και το κλίμα κύματος.

Το τοπικό κλίμα κύματος θεωρείται γνωστό και μπορεί να απεικονιστεί από ένα σύνολο θαλάσσιων καταστάσεων με δεδομένο φάσμα ισχύος. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της επιφάνειας ανύψωσης από ένα σταθερό σημείο παρακολούθησης, για κάθε θαλάσσια κατάσταση, θεωρείται Gaussian.

Για την υπό μελέτη θαλάσσια κατάσταση, η χρονικά μέση τιμή της ισχύος εξόδου του στροβίλου  $\bar{P}_t$  δίνεται από την εξίσωση (45).

### 3.2 Παραγωγή ενέργειας

Κάθε θαλάσσια κατάσταση χαρακτηρίζεται από το ύψος του κύματος  $H_s$ , την ενεργό περίοδο  $T_e$  και τη συχνότητα εμφάνισης  $\Phi$ .

Η εξίσωση (45) δείχνει ότι για κάθε θαλάσσια κατάσταση ο μέσος όρος της ισχύος εξόδου  $\bar{P}_t$  εξαρτάται από το μέγεθος του στροβίλου (διάμετρος  $D$ ) και από την ταχύτητα περιστροφής  $N$ . Θεωρείται ότι οι ταλαντώσεις στο  $N$  και στο  $P_t$  διατηρούνται σχετικά μικρές κατά τη διάρκεια αποθήκευσης και απελευθέρωσης της ενέργειας από το στροφέα και ότι η ταχύτητα περιστροφής ελέγχεται κατάλληλα έτσι ώστε να αυξάνει την ισχύ εξόδου  $\bar{P}_t$  (υπό τον όρο μερικών περιορισμών όπως η μέγιστη επιστρεπτή περιστροφή του πτερυγίου  $ND/2$ ).

Το καθαρό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{P}_e = \bar{P}_t - \bar{L}_m - \bar{L}_e \quad (54)$$

Όπου  $\bar{L}_m$  είναι οι μηχανικές απώλειες και  $\bar{L}_e$  οι ηλεκτρικές απώλειες.

Αν το κλίμα κύματος αποτελείται από  $N$  θαλάσσιες καταστάσεις  $j=1,2,3,\dots,N$ , τότε η μέση ετήσια τιμή του καθαρού ποσού της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου δίνεται από:

$$\bar{P}_{e,annual} = \sum_{j=1}^N \Phi_j \bar{P}_{e,j} \quad (55)$$

Για ένα συγκεκριμένο κλίμα κύματος, το  $\bar{P}_{e,annual}$ , εξαρτάται από το μέγεθος του στροβίλου. Κριτήριο για τις προδιαγραφές και το σχεδιασμό του εξοπλισμού της εγκατάστασης ισχύος θα είναι να βρούμε την τιμή της  $D$  που μεγιστοποιεί το  $\bar{P}_{e,annual}$  (που αποδίδει τη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας) [27].

### 3.3 Κόστη, εισόδημα και κέρδος

Μια εναλλακτική προσέγγιση της βελτιστοποίησης βασίζεται στα κέρδη που ορίζονται από τη διαφορά μεταξύ των εσόδων από την ηλεκτρική ενέργεια και του κόστους παραγωγής. Το κύριο κόστος κεφαλαίου ενός συστήματος κυματικής ενέργειας είναι η διάταξη της κατασκευής και ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός.

Στη μελέτη αυτή το σχέδιο της κατασκευής καθώς και το απαιτούμενο κόστος της θεωρούνται σταθερά και συμβολίζονται με  $C_{struct}$ . Ο μηχανολογικός εξοπλισμός αποτελείται από τον αεριοστρόβιλο, τη βαλβίδα ή τις βαλβίδες και το σύστημα των αγωγών και το κόστος  $C_{mech}$  εξαρτάται από το μέγεθος του στροβίλου (διάμετρος  $D$ ), σύμφωνα με την εμπειρική σχέση  $C_{mech} = f_{mech}(D)$ . Ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός περιλαμβάνει τη γεννήτρια, τα ηλεκτρονικά ισχύος και το συμβατικό εξοπλισμό, των οποίων το συνολικό κόστος δίνεται ως συνάρτηση του βαθμού ισχύος της εγκατάστασης  $C_{elec} = f_{elec}(\bar{P}_n)$ .

Συμβολίζονται με  $C_{oth}$  λοιπά κόστη κεφαλαίου (π.χ. έλεγχος εξοπλισμού και οργάνων) τα οποία είναι ανεξάρτητα από το μέγεθος του αεροστροβίλου και της ονομαστικής ισχύος.

Υποθέτοντας ότι η εγκατάσταση μπορεί να υλοποιηθεί σε 1 έτος, το ετήσιο άθροισμα  $A_{cap}$  που σχετίζεται με την απόσβεση του κόστους κεφαλαίου μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο [27]:

$$A_{cap} = \frac{Cr}{1-(1+r)^{-n}} \quad (56)$$

Όπου

$C = C_{\text{sruc}} + C_{\text{oth}} + C_{\text{mech}} + C_{\text{elec}}$  είναι το συνολικό κόστος κεφαλαίου της εγκατάστασης

$r$  είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο και  $n$  είναι η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης (σε χρόνια)

Άλλες δαπάνες που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη συντήρηση της εγκατάστασης, είναι τα ανταλλακτικά, οι επισκευές και η ασφάλεια. Το συνολικό ετήσιο κόστος τους συμβολίζεται με  $A_{\text{O\&M}}$ . Το ετήσιο εισόδημα από την ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στο δίκτυο (σε νομισματικές μονάδες) δίνεται από τον τύπο:

$$I = 8760 \bar{P}_{e,\text{annual}} A u \quad (57)$$

Εδώ,  $\bar{P}_{e,\text{annual}}$  είναι η μέση ετήσια ηλεκτρική ισχύς εξόδου σε kW,  $A$  είναι η διαθεσιμότητα (πιθανότητα ολόκληρου του συστήματος να λειτουργεί οποιαδήποτε στιγμή, η οποία περιλαμβάνει την προγραμματισμένη συντήρηση και τις βλάβες) και  $u$  είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο ισχύος σε €/kWh.

Το ετήσιο κέρδος του έργου είναι στη συνέχεια:

$$E = I - A_{\text{cap}} - A_{\text{O\&M}} \quad (58)$$

Το κριτήριο της βελτιστοποίησης του εξοπλισμού στηρίζεται στην εύρεση της κατάλληλης διαμέτρου  $D$  αεριοστροβίλου (και των αντίστοιχων εγκαταστάσεων ονομαστικής ισχύος) που μεγιστοποιούν το  $E$  (ετήσιο κέρδος).

## Κεφάλαιο 4 Μεθοδολογία-σχεδιασμός OWC με Wells-περιγραφή προγράμματος

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του συστήματος μετατροπής κυματικής ενέργειας και παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων και της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Οι υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα Excel της Microsoft Office με τη βοήθεια υπορουτινών της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic.

### 4.1 Αριθμητικό Παράδειγμα

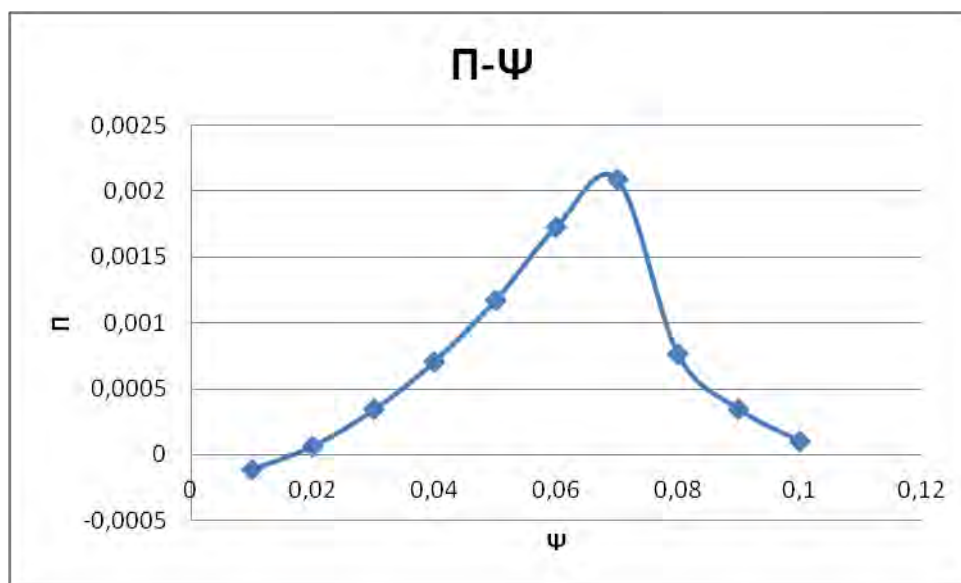
Πίνακας 1 Δεδομένα για το θάλαμο αέρα

	Όνομα	Τιμή
Μήκος θαλάμου (m)	$a$	12
Πλάτος θαλάμου (m)	$b$	12
Όγκος θαλάμου σε ιδανικές συνθήκες ( $m^3$ )	$V_0$	1050
Βάθος νερού (m)	$H$	8
Σταθερά αναλογίας Μεταξύ ροής αέρα και πτώσης πίεσης για το στρόβιλο Wells	$K^*$	0,0099662

Πίνακας 2 Δεδομένα για το στρόβιλο

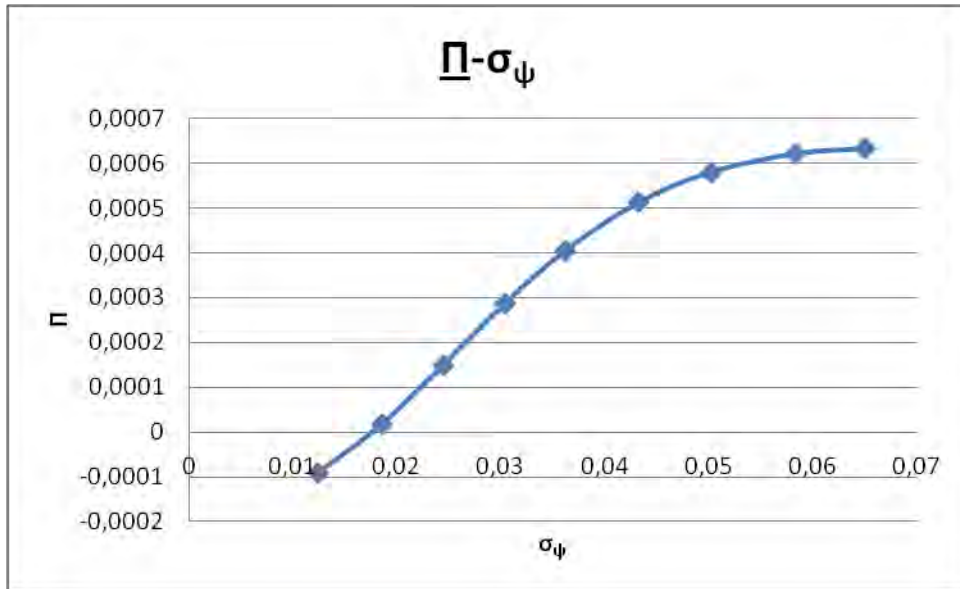
Περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου (rad/sec)	$N$	157
Διάμετρος στροβίλου (m)	$D$	2,3
Αδιάστατη σταθερά αναλογίας του στροβίλου	$K$	0,6803

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις που παρουσιάζονται εδώ βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα των αεροδυναμικών δοκιμών σε μοντέλα στροβίλων Wells [4]. Η εξωτερική διάμετρος του στροφέα του στροβίλου ήταν  $D = 0.590\text{m}$ , με λόγο εσωτερικής/εξωτερικής διαμέτρου  $0,678$  και είχε  $8$  πτερύγια σταθερής χορδής  $c = 0.212D$  και προφίλ NACA 0015. Ο στρόβιλος είχε μια σειρά από οδηγητικές βάννες σε κάθε πλευρά του στροφέα. Έγιναν δοκιμές για τις τιμές  $1000, 1500$  και  $2000$  rpm για την περιστροφική ταχύτητα κάλυψαν το εύρος  $0 < \Psi \leq 0.1$ . Το διάγραμμα 1 αναπαριστά μια τμηματική πολυωνυμική προσέγγιση της αδιάστατης ισχύος εξόδου  $\Pi$  σε σχέση με την αδιάστατη πίεση  $\Psi$ . Φαίνεται ότι το  $\Pi$  αυξάνεται με το  $\Psi$  και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή  $\Pi_{\max}=0.0022$  σε μια κρίσιμη τιμή  $\Psi_{cr}=0.07$ , πάνω από την οποία το  $\Pi$  πέφτει δραματικά και ακινητοποιείται ο στρόβιλος.



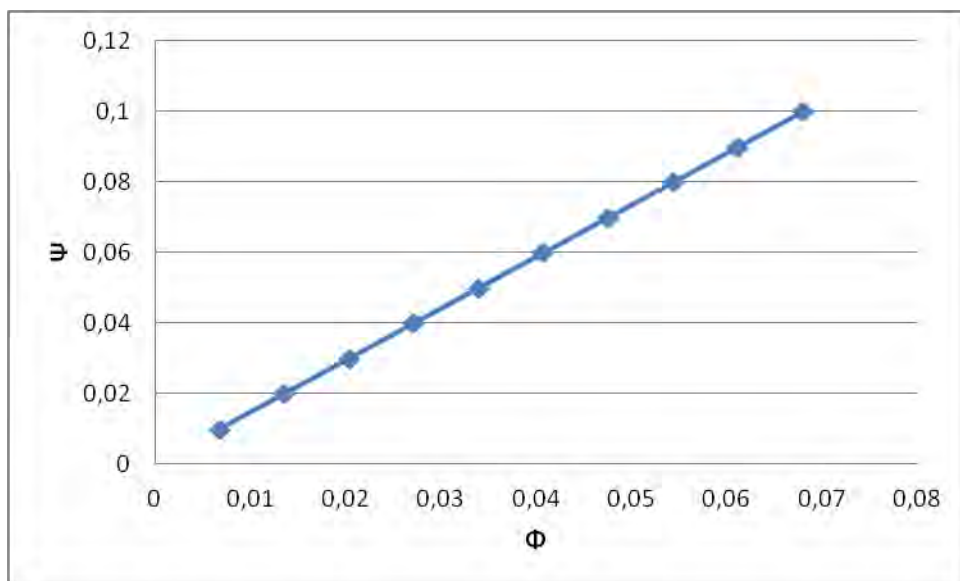
**Διάγραμμα 1** Αδιάστατη ισχύς εξόδου  $\Pi$  σε σχέση με την αδιάστατη πίεση  $\Psi$





**Διάγραμμα 2** Αδιάστατη μέση ισχύς εξόδου του στροβίλου σε σχέση με την τυπική απόκλιση της αδιάστατης ισχύος

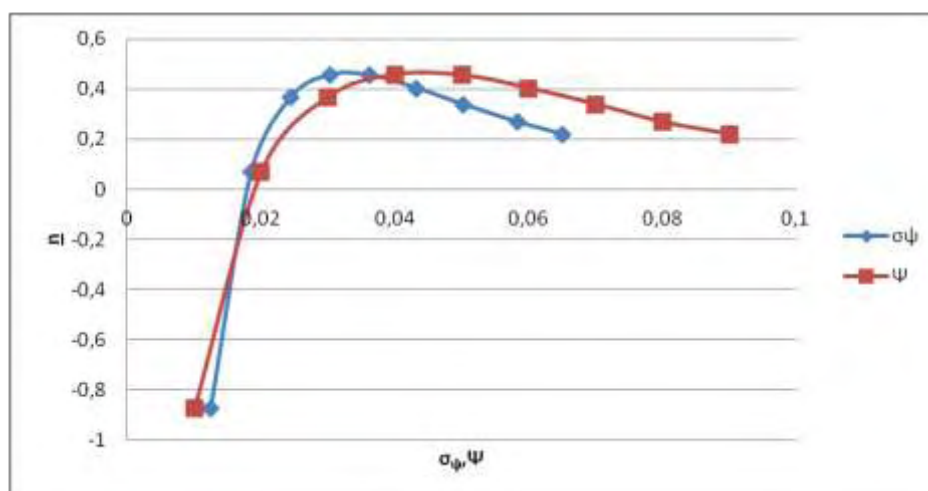
Το διάγραμμα 3 παρουσιάζει τη σχέση αναλογίας,  $\Phi = K\Psi$  ( $K=0.6803$ ) στο εύρος  $0 < \Psi < \Psi_{cr}$ .



**Διάγραμμα 3** Αδιάστατη πίεση σε σχέση με τον αδιάστατο βαθμό ροής

Η μπλε καμπύλη στο διάγραμμα 4 αναπαριστά το  $\bar{\eta} = \frac{\bar{\Pi}}{\bar{\Pi}_{avai}}$  ως μια συνάρτηση του

$\sigma_\psi$  και η κόκκινη αναπαριστά το  $\bar{\eta}$  ως συνάρτηση του  $\Psi$ . Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα η μέση απόδοση του στροβίλου είναι πολύ ευαίσθητη στην περίπτωση ενός κακού ταιριάσματος του στροβίλου και της διαθέσιμης ισχύος.



**Διάγραμμα 4** Μέση απόδοση του στροβίλου σε σχέση με το  $\Psi$  και  $\sigma_\psi$

#### 4.1.1 Υδροδυναμική της στήλης OWC και τοπικό κλίμα κύματος

Η γεωμετρία της στήλης είναι διδιάστατη και έτσι αγνοείται η εξάρτηση της κατεύθυνσης από το στιγμιαίο κυματικό πεδίο.

Το φάσμα συχνοτήτων για κάθε θαλάσσια κατάσταση δίνεται από τον τύπο:

$$S_\zeta(\omega) = 131.5H_s^2 T_e^{-4} \omega^{-5} \exp(-1054T_e^{-4} \omega^{-4}) \quad (59)$$

Εδώ η ενεργός περίοδος  $T_e$  χρησιμοποιείται αντί της  $T_{1/3}$  ( $T_e$  μπορεί να σχετιστεί με την  $T_{1/3}$  από τη σχέση  $T_e = m_n / m_0$ , όπου  $m_n$  είναι η ροπή φάσματος τάξεως  $n$  και μπορεί εύκολα να βρεθεί ότι  $T_e = 0.8997T_{1/3}$ )

Η στιγμιαία ροή κυματικής ενέργειας  $E$  ανά μονάδα μήκους κύματος μπορεί να υπολογιστεί από το φάσμα πυκνότητας από τη σχέση:

$$E = 2\rho_w g \int_0^\infty S_\zeta(\omega) c_g(\omega) d\omega \quad (60)$$

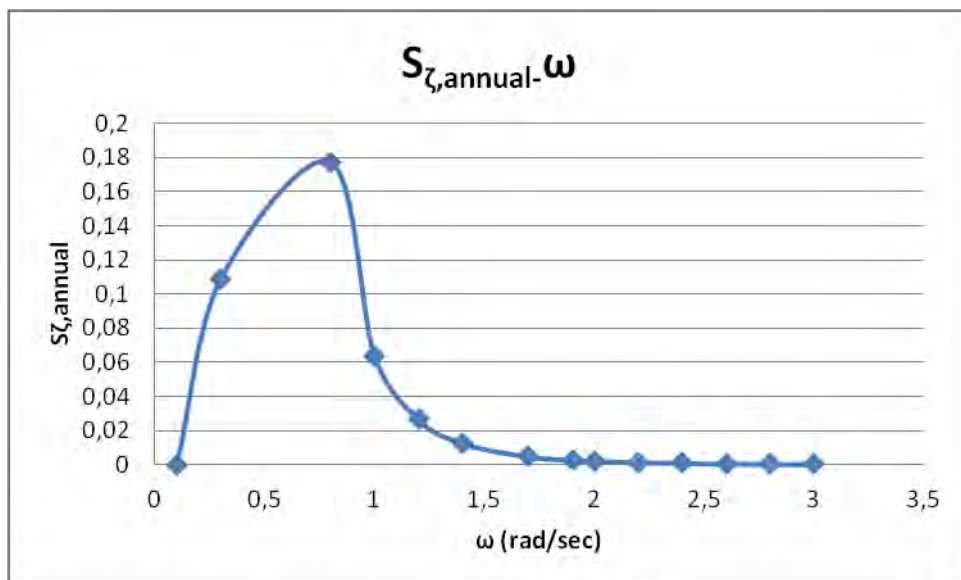
όπου  $\rho_w$  είναι η πυκνότητα του νερού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $c_g$  είναι η ομαδική ταχύτητα (group velocity) η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$c_g = \frac{g}{2\omega} (\tanh kh + kh \operatorname{sech}^2 kh) \quad (61)$$

Οι τιμές της ροής ενέργειας για τις 9 θαλάσσιες καταστάσεις δίνονται στους πίνακες 3-6, για  $\rho_w=1025\text{kg/m}^3$  και  $g=9.81\text{m/s}^2$ . Το ετήσιο φάσμα πυκνότητας ορίζεται από τη σχέση:

$$S_{\zeta,ann} = \sum_{j=1}^J S_{\zeta,j} \Phi_j \quad (62)$$

Η εξίσωση (62) αποτυπώνεται στο διάγραμμα 5 σε σχέση με τη γωνιακή συχνότητα  $\omega$ . Από την εξίσωση (60) μπορεί να ληφθεί μία μέση ετήσια ροή ενέργειας  $E_{ann}$  αντικαθιστώντας το  $S_\zeta$  με το  $S_{\zeta,ann}$ , ή ισοδύναμα από τη σχέση  $E_{ann} = \sum E_j \Phi_j$ . Ο υπολογισμός δίνει  $E_{ann} = 15.764 \text{ kW/m}$ .



**Διάγραμμα 5** Ετήσιο φάσμα πυκνότητας σε σχέση με τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega$

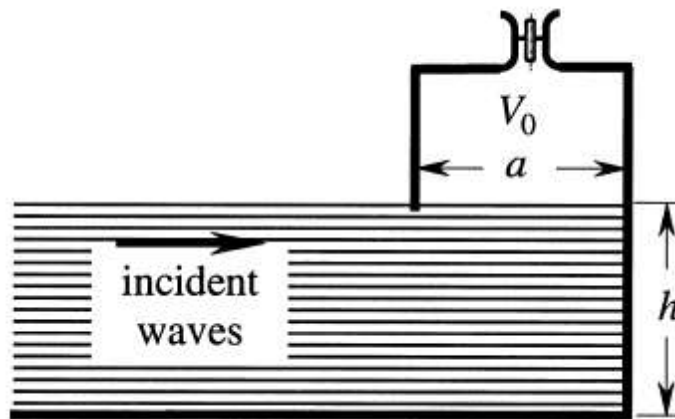
Η διακύμανση της πίεσης αέρα μέσα στο θάλαμο μπορεί να υπολογιστεί από το φάσμα πυκνότητας του προσπίπτοντος κύματος χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (42) και (43).

Στην παρούσα περίπτωση, ισχύει:

$$\sigma_p^2 = 2 \int_0^\infty S_\zeta(\omega) |\Gamma(\omega)\Lambda(\omega)|^2 d\omega \quad (63)$$

Το  $\Gamma$  εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του θαλάμου, ενώ το  $\Lambda$  εξαρτάται επίσης από το  $KX$  (όπου  $X=D(\rho_a N)^{-1}$  και από την ατμοσφαιρική πίεση του αέρα  $p_a$  (εξίσωση (38)). Υποτίθεται ότι το  $p_a$  είναι περίπου σταθερό και ίσο με την ατμοσφαιρική πίεση στο επίπεδο της θάλασσας  $p_a=1.013 \times 10^5$  Pa. Τότε για μία θαλάσσια κατάσταση και για μια συγκεκριμένη γεωμετρία θαλάμου, το  $\sigma_p$  μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση του  $KX$  και ισχύει  $\sigma_p=F_p(KX)$ .

Η διδιάστατη γεωμετρία του θαλάμου δίνεται εικόνα 14. Το μπροστινό τοίχωμα θεωρείται λεπτό και το πίσω τοίχωμα εκτείνεται κάθετα από την επιφάνεια του πυθμένα.



**Εικόνα 14** Σχηματική αναπαράσταση της παλλόμενης υδάτινης στήλης

Με αυτές τις απλουστεύσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές εκφράσεις για τους υδροδυναμικούς συντελεστές [4].

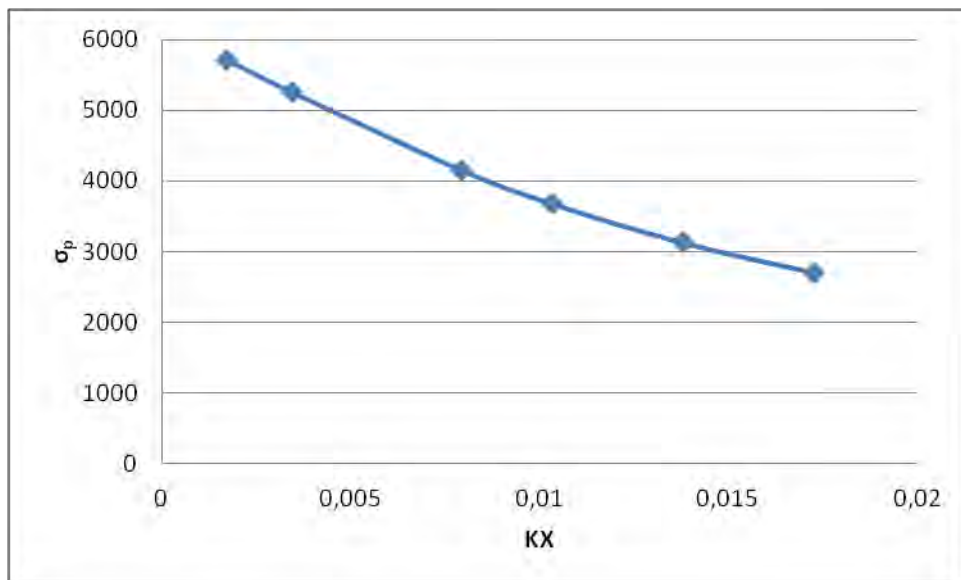
$$\Gamma(\omega) = \frac{2\omega b}{k} \text{sinka} \quad (64)$$

$$B(\omega) = \frac{\omega b m}{\rho_w g} \sin^2 ka \quad (65)$$

$$C(\omega) = -\frac{2\omega b}{\pi \rho_w g} \int_0^\infty \frac{\sin^2 ka}{k(\operatorname{acoth} kh - k)} dk \quad (66)$$

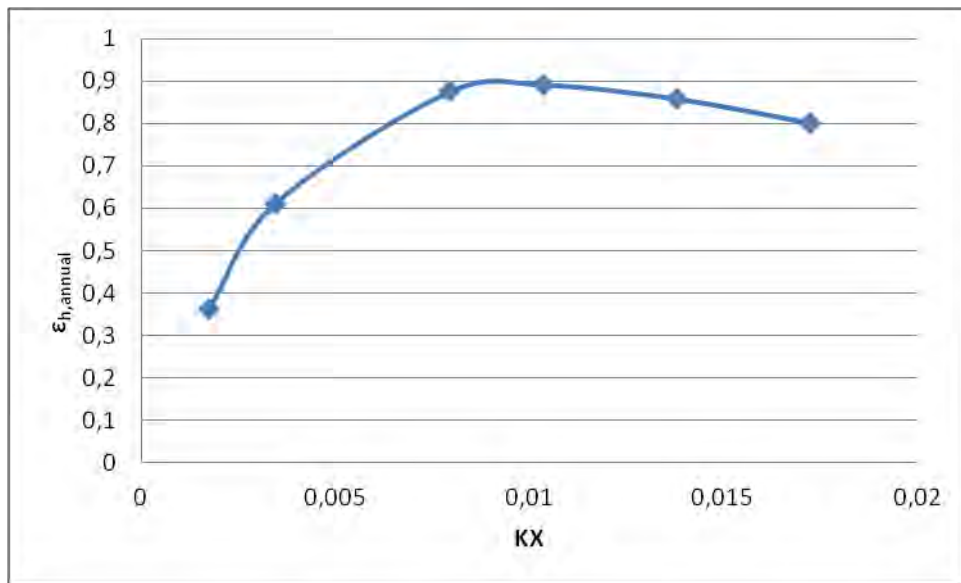
Εδώ  $a$  είναι το μήκος του θαλάμου,  $h$  είναι το βάθος νερού,  $\alpha = \omega^2/g$ ,  $\kappa$  ο κυματαριθμός που δίνεται από τη ρίζα του  $\kappa \tanh \kappa h - \alpha$  και  $m = (1 + \alpha h \operatorname{cosech}^2 \kappa h)^{-1}$ . Στους υπολογισμούς  $\alpha = b = 12$  m,  $h = 8$  m,  $V_o = 1050 \text{ m}^3$ ,  $\gamma = 1.4$ ,  $\rho_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$ . Το διάγραμμα 6 αναπαριστά τη συνάρτηση  $\sigma_p = F_p(KX)$  για την επιλεγμένη γεωμετρία και το ετήσιο φάσμα πυκνότητας  $S_{\zeta,ann}$ .

Η μέση απόδοση της μετατροπής της ενέργειας του κύματος σε αέρα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:  $\bar{\epsilon}_h = \bar{P}_{avai} (bE)^{-1}$ . Υποθέτοντας  $\Phi = K\Psi$  από την εξίσωση (53) προκύπτει ότι  $P_{avai} = \sigma_p^2 KX$  το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό του  $\bar{\epsilon}_h$  ως συνάρτηση του  $KX$ , όπως παρουσιάζεται γραφικά στο διάγραμμα 7 για το φάσμα πυκνότητας του κύματος. Η μέγιστη τιμή του  $\bar{\epsilon}_h$  είναι 0.9 και συμβαίνει όταν  $KX = 0.009$ .



**Διάγραμμα 6** Τυπική απόκλιση της πίεσης του θαλάμου σε σχέση με το

$$KX = KD(\rho_a N)^{-1} \text{ για το ετήσιο φάσμα πυκνότητας } S_{\zeta,ann}.$$



**Διάγραμμα 7** Μέση ετήσια υδροδυναμική απόδοση  $\bar{\epsilon}_h$  σε σχέση με το  $KX$ .

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών μοντέλων παρουσιάζονται για ένα σύνολο από 9 θαλάσσιες καταστάσεις, όπως φαίνεται στους πίνακες 3-6. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζονται για κάθε θαλάσσια κατάσταση η ισχύς εξόδου  $\bar{P}_t$ , η στιγμιαία ροή κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους και η περιστροφική ταχύτητα  $N$  για  $D=1.6m$ ,  $2.3m$ ,  $3.17$  και  $D=3.7m$ . Όπως ήταν αναμενόμενο η χρήση ενός μεγαλύτερου στροβίλου ( $D=3.7m$ ) μας δίνει μεγαλύτερη ισχύ  $\bar{P} = 306.75 KW$  στις πιο ενεργητικές θαλάσσιες καταστάσεις ( $T_e=4.5s$ ).

**Πίνακας 3 D=1.6m**

Θαλάσιες καταστάσεις	Ειδικό ύψος κύματος (m)	Μέση τιμή της περιόδου του κύματος (sec)	Περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων του στροβίλου (rad/sec)	Συχνότητα εμφάνισης κύματος	Στιγμιαία ροή κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους (KW/m)	Μέση ισχύς (που εκμεταλλεύεται ο στρόβιλος) (KW)
$\zeta$	$H_s$	$T_m$	N	f	E	$\bar{P}$
1	0.8	10.0033	142.012716	0.25	2.760	14.14503962
2	1.2	10.5591	177.4511108	0.2	6.360	28.42644576
3	1.6	11.1148	207.0011436	0.177	11.560	45.88040436
4	2	11.6706	212.5	0.145	18.416	62.89119288
5	2.4	12.2263	212.5	0.1	26.924	73.16811386
6	2.9	12.782	212.5	0.07	39.746	78.81013369
7	3.4	13.3378	212.5	0.045	55.120	79.5879148
8	4	13.8935	212.5	0.007	77.009	77.30574996
9	4.5	14.4493	212.5	0.006	98.601	74.21690821

**Πίνακας 4 D=2.3m**

Θαλάσσιες καταστάσεις	Ειδικό ύψος κύματος	Μέση τιμή της περιόδου του κύματος (sec)	Περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων του στροβίλου (rad/sec)	Συχνότητα εμφάνισης κύματος	Στιγμιαία ροή κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους (KW/m)	Μέση ισχύς (που εκμεταλλεύεται ο στρόβιλος)
$\zeta$	$H_S$	$T_m$	N	f	E	$\bar{P}$
1	0.8	10.0033	84.32473019	0.25	2.760	15.09176947
2	1.2	10.5591	109.1928695	0.2	6.360	34.83972974
3	1.6	11.1148	129.9757872	0.177	11.560	60.99627507
4	2	11.6706	148.1107037	0.145	18.416	92.54465686
5	2.4	12.2263	147.826087	0.1	26.924	121.7166174
6	2.9	12.782	147.826087	0.07	39.746	145.8726962
7	3.4	13.3378	147.826087	0.045	55.120	158.7041106
8	4	13.8935	147.826087	0.007	77.009	164.3876396
9	4.5	14.4493	147.826087	0.006	98.601	164.1746334



**Πίνακας 5 D=3.17m**

Θαλάσσιες καταστάσεις	Ειδικό ύψος κύματος	Μέση τιμή της περιόδου του κύματος (sec)	Περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων του στροβίλου (rad/sec)	Συχνότητα εμφάνισης κύματος	Στιγμαία ροή κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους (KW/m)	Μέση ισχύς (που εκμεταλλεύεται ο στρόβιλος) (KW)
$\zeta$	$H_S$	$T_m$	$N$	$f$	$E$	$\bar{P}$
1	0.8	10.0033	44.70218669	0.25	2.760	8.984596973
2	1.2	10.5591	61.36035097	0.2	6.360	24.61888708
3	1.6	11.1148	75.7409275	0.177	11.560	48.35760333
4	2	11.6706	88.45908801	0.145	18.416	79.63879463
5	2.4	12.2263	99.8779965	0.1	26.924	117.6347738
6	2.9	12.782	107.2555205	0.07	39.746	172.6696351
7	3.4	13.3378	107.2555205	0.045	55.120	219.289419
8	4	13.8935	107.2555205	0.007	77.009	260.5842788
9	4.5	14.4493	107.2555205	0.006	98.601	283.1630619

**Πίνακας 6 D=3.7m**

Θαλάσσιες καταστάσεις	Ειδικό ύψος κύματος	Μέση τιμή της περιόδου του κύματος (sec)	Περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων του στροβίλου (rad/sec)	Συχνότητα εμφάνισης κύματος	Στιγμαία ροή κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους (KW/m)	Μέση ισχύς (που εκμεταλλεύεται ο στρόβιλος) (KW)
$\zeta$	$H_S$	$T_m$	$N$	$f$	$E$	$\bar{P}$
1	0.8	10.0033	30.58847668	0.25	2.760	5.79167985
2	1.2	10.5591	43.15420216	0.2	6.360	16.92054583
3	1.6	11.1148	54.35642518	0.177	11.560	34.94801952
4	2	11.6706	64.45620798	0.145	18.416	59.88471039
5	2.4	12.2263	73.63019718	0.1	26.924	91.30582556
6	2.9	12.782	84.24615927	0.07	39.746	140.2203649
7	3.4	13.3378	91.89189189	0.045	55.120	197.8135325
8	4	13.8935	91.89189189	0.007	77.009	263.5332113
9	4.5	14.4493	91.89189189	0.006	98.601	306.7501324

## 4.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

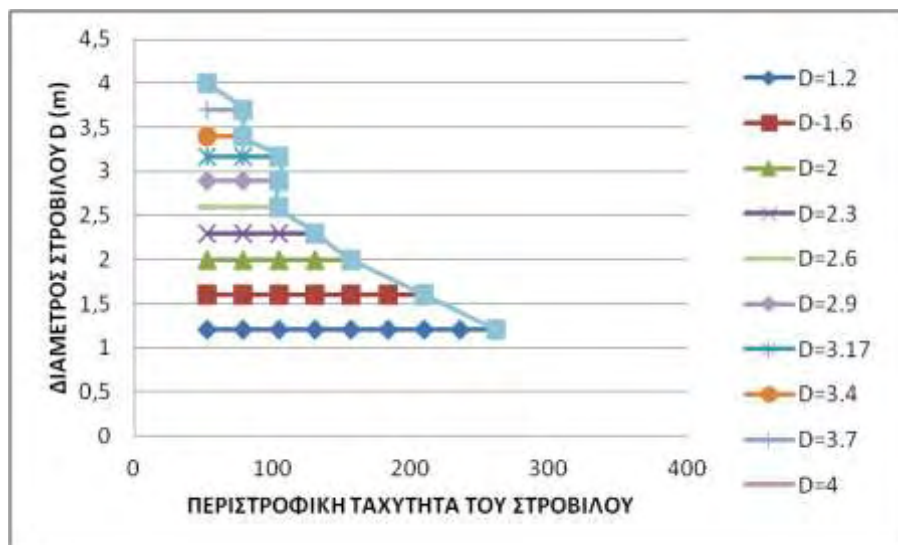
Στο κεφάλαιο 3 περιγράφηκαν δύο κριτήρια βελτιστοποίησης τα οποία τώρα εφαρμόζονται στην τυπική περίπτωση ενός σταθερού συστήματος OWC με ένα στρόβιλο Wells και μια γεννήτρια. Η κατασκευή της εγκατάστασης είναι από τσιμέντο (εσωτερικής διατομής 12m x 12m στο ελεύθερο θαλάσσιο επίπεδο) και εκτείνεται σε βάθος 8m. Αποτελείται από έναν αξονικό στρόβιλο Wells ο οποίος συνδέεται με μια γεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας.

Ο στρόβιλος έχει ένα στροφέα 8 πτερυγίων εξωτερικής διαμέτρου  $D=2.3\text{m}$  και εσωτερικής διαμέτρου  $D_i=1.36\text{ m}$  με μια σειρά από οδηγητικές βάνες σε κάθε πλευρά του στροφέα.

Θεωρείται ότι η εγκατάσταση είναι εξοπλισμένη με μια βαλβίδα ελέγχου, η οποία εμποδίζει τη διακύμανση της πίεσης του αέρα  $|p|$  να υπερβεί την κρίσιμη τιμή (εξαρτημένη από το  $N$  και  $D$ ) πάνω από την οποία τα περιστρεφόμενα πτερύγια λειτουργούν σε πάλμωση δημιουργώντας έτσι βλάβη στη λειτουργία του στροβίλου.

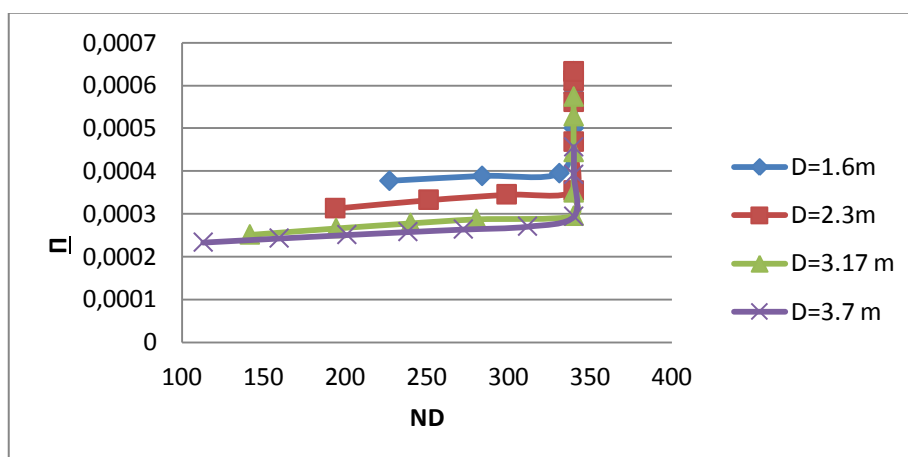
Για κάθε θαλάσσια κατάσταση, το σύστημα ελέγχου της εγκατάστασης ελέγχει την περιστροφική ταχύτητα  $N$  με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιεί τη μέση ισχύ εξόδου, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό  $\frac{ND}{2} \leq 170\text{m/s}$  για την ταχύτητα των πτερυγίων κορυφής.

Στο διάγραμμα 8 παρουσιάζονται τα όρια της περιστροφικής ταχύτητας του στροβίλου για διάφορες διαμέτρους.



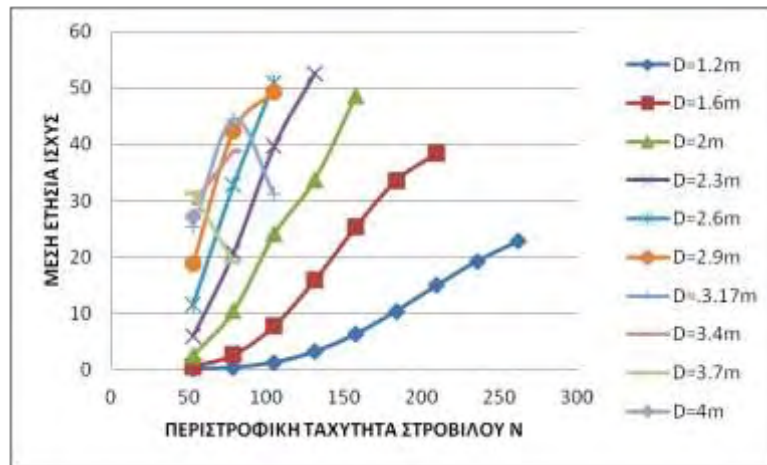
**Διάγραμμα 8** Διάμετρος στροβίλου σε σχέση με την περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου

Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερή τη διάμετρο D του στροβίλου βρέθηκε η βέλτιστη περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου η οποία μεγιστοποιεί τη μέση αδιάστατη ισχύ εξόδου  $\bar{P}$  (διάγραμμα 9). Οι καμπύλες αυτού του διαγράμματος στην ουσία αναπαριστούν τον αλγόριθμο ελέγχου (περιστροφική ταχύτητα σε σχέση με την ισχύ εξόδου) για τέσσερα μεγέθη στροβίλου (D=1.6, 2.3, 3.17 και 3.7 m).



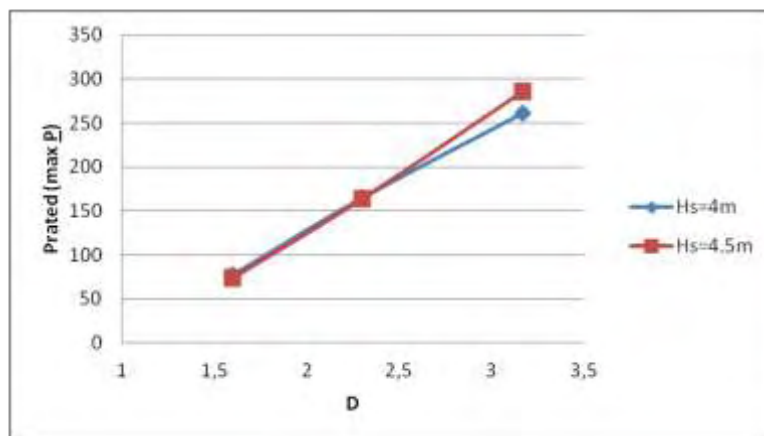
**Διάγραμμα 9** Καμπύλες ελέγχου της περιστροφικής ταχύτητας ND (m/s) σε σχέση με την αδιάστατη ισχύ εξόδου  $\bar{P}$

Στο διάγραμμα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για διάφορες τιμές της περιστροφικής ταχύτητας, η οποία διατηρείται σταθερή σε κάθε θαλάσσια κατάσταση για τις διαμέτρους 1.2, 1.6, 2, 2.3, 2.6, 2.9, 3.17, 3.4, 3.7 και 4m. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 10 η μέγιστη μέση ετήσια ισχύς  $\bar{P}_{\text{annual}} = 52.59 \text{ KW}$  αποδίδεται για διάμετρο 2.3m και σταθερό αριθμό στροφών ίσο με 130.8 rad/s.



**Διάγραμμα 10** Μέση ετήσια ισχύς για διάφορα μεγέθη στροβίλου

Στο διάγραμμα 11 παρουσιάζεται η μέγιστη υπολογισμένη τιμή της  $\bar{P}_e$ , ( $P_{rated}$ ), η οποία αντιστοιχεί στην πιο ενεργή θαλάσσια κατάσταση ( $H_s=4,5 \text{ m}$ ,  $T_e=13 \text{ s}$ ).



**Διάγραμμα 11** Μέγιστη ισχύς του συστήματος σε σχέση με τη διάμετρο του στροβίλου (και στις δύο περιπτώσεις  $T_e=14\text{s}$ ).

#### 4.2.1 Το κλίμα κύματος

Κάθε θαλάσσια κατάσταση χαρακτηρίζεται από το τοπικό κλίμα κύματος  $H_s$ , την ενεργό περίοδο  $T_e$  και τη συχνότητα εμφάνισης  $\Phi$ . Για την εύρεση του φάσματος συχνότητας κάθε θαλάσσιας κατάστασης χρησιμοποιείται η εξίσωση (59).

Για συγκριτικούς λόγους μελετώνται άλλα δύο κλίματα κύματος τα οποία προέρχονται από το αρχικό πολλαπλασιάζοντάς το με μία σταθερά ίση με  $\sqrt{2}$  για το πιο ενεργητικό και με  $1/\sqrt{2}$  για το λιγότερο ενεργητικό. Τα τρία κλίματα κύματος, των οποίων η ετήσια ισχύς (για διάμετρο  $D=2.3\text{m}$ ) είναι 37.605, 66.62 και 99.91 KW/m δηλώνονται ως κλίματα 1, 2 και 3 αντίστοιχα.

**Πίνακας 7** Μέση ετήσια ισχύς και ετήσιο κέρδος για τα 3 κλίματα κύματος

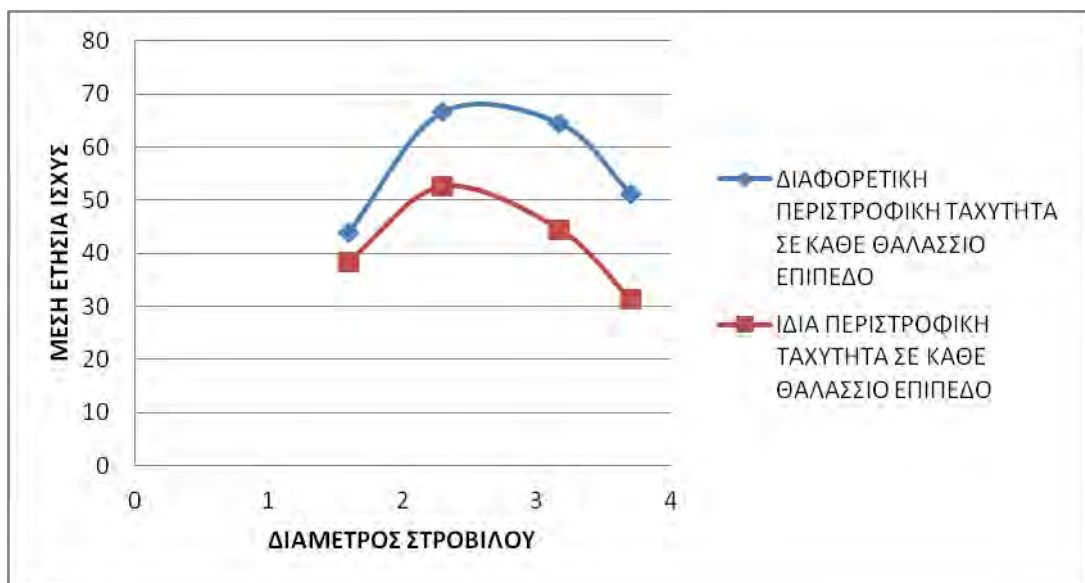
	Κλίμα κύματος 1		Κλίμα κύματος 2		Κλίμα κύματος 3	
Διάμετρος D (m)	Μέση ετήσια ισχύς (KW)	Μέσο ετήσιο κέρδος (Κ€)	Μέση ετήσια ισχύς (KW)	Μέσο ετήσιο κέρδος (Κ€)	Μέση ετήσια ισχύς (KW)	Μέσο ετήσιο κέρδος (Κ€)
1.6	28.56	39.61	43.86	68.26	57.99	94.72
2.3	37.61	44.96	66.62	98.64	99.92	160.974
3.17	29.38	13.87	64.52	75.82	120.944	180.375
3.7	21.12	-10.85	51.234	39.32	110.405	146.442

Στον πίνακα 7 παρουσιάζεται η μέση ετήσια ισχύς για κάθε διάμετρο στα 3 κλίματα κύματος καθώς και το μέσο ετήσιο κέρδος (στην περίπτωση όπου η τιμή της ηλεκτρικής

ενέργειας ισούται με  $u=0.225$  €/kWh, το προεξοφλητικό επιτόκιο  $r=0.1$ , η σταθερά του κόστους του μηχανολογικού εξοπλισμού  $B_{mech}=20$ , η σταθερά του κόστους του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού  $B_{elec}=2$  και ο χρόνος ζωής της εγκατάστασης  $\eta=20$  χρόνια).

Όπως φαίνεται στον πίνακα 7, στο πρώτο κλίμα κύματος η διάμετρος  $D=2.3$  m μας δίνει τη μεγαλύτερη ισχύ  $\bar{P}_{annual} = 37.61$  KW και το μεγαλύτερο κέρδος  $E=44.96$ Κ€, στο δεύτερο είναι επίσης η  $D=2.3$ m με ισχύ  $66.62$  KW και ετήσιο κέρδος  $98.64$  Κ€ και στο τρίτο κλίμα κύματος είναι  $D=3.17$ m με μέση ετήσια ισχύ  $120.944$  KW και κέρδος  $180.375$  Κ€.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του δεύτερου κλίματος κύματος με εκείνα για την ίδια περιστροφική ταχύτητα σε κάθε θαλάσσια κατάσταση διαπιστώνουμε ότι η χρήση διαφορετικών στροφών σε κάθε θαλάσσιο επίπεδο οδηγεί σε υψηλότερα ποσά παραγόμενης ισχύος και κέρδους. Στο διάγραμμα 12 που ακολουθεί παρουσιάζεται η σύγκριση αυτή.



**Διάγραμμα 12**

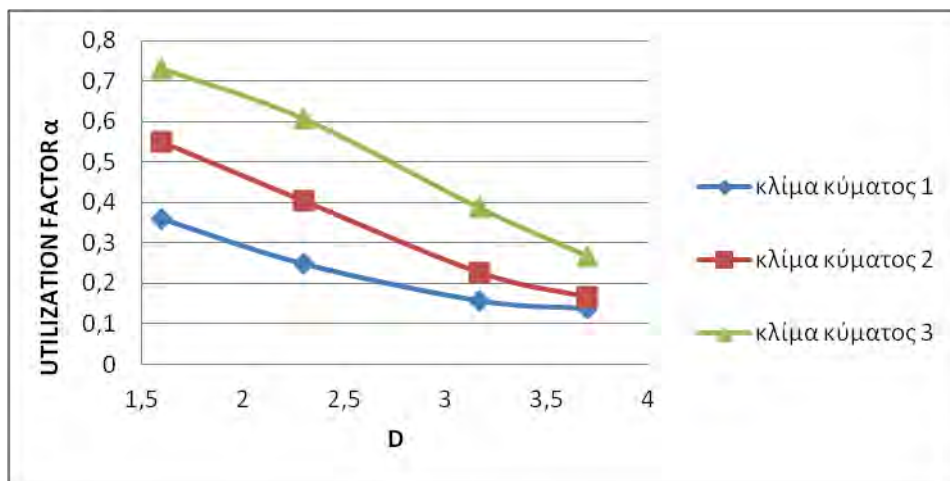
Σύγκριση των τιμών της μέσης ετήσιας ισχύος για ίδια και διαφορετική περιστροφική ταχύτητα

Θα πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι δε λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες της υδροδυναμικής διαδικασίας της μετατροπής ενέργειας του αέρα που λαμβάνουν χώρα στην OWC. Αυτές οι απώλειες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και αγνοούνται.

Ο σταθερός όρος  $\alpha$  ορίζεται ως ο λόγος του καθαρού ποσού της μέσης ετήσιας ισχύος εξόδου προς την ισχύ λειτουργίας του συστήματος.

$$\alpha = \frac{\bar{P}_{e,annual}}{P_{rated}} \quad (70)$$

Το διάγραμμα 13 απεικονίζει τον παράγοντα χρήσης (utilization factor)  $\alpha$  σε σχέση με τη διάμετρο  $D$  του στροβίλου για τα τρία κλίματα κύματος.



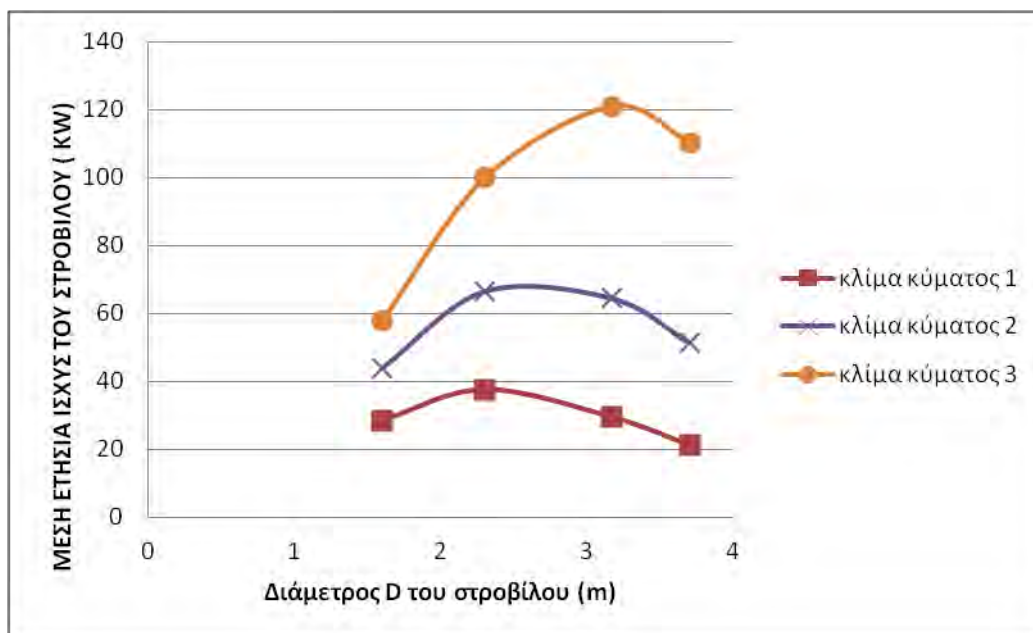
**Διάγραμμα 13** Παράγοντας χρήσης  $\alpha$  σε σχέση με τη διάμετρο  $D$  του στροβίλου.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η μέγιστη τιμή του  $\alpha$  (0.72935) είναι για το μικρότερο στρόβιλο στο πιο ενεργητικό κλίμα κύματος, ενώ η μικρότερη τιμή (0.1371) είναι για το μεγαλύτερο στρόβιλο στο λιγότερο ενεργητικό κλίμα κύματος. Για το νησί Pico (κλίμα κύματος 2,  $D=2.3\text{m}$ ) έχουμε  $\alpha=0.40524$ .

Οι καμπύλες του διαγράμματος 14 απεικονίζουν τη μέση ετήσια ισχύ εξόδου  $\bar{P}_{e,annual}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της διαμέτρου  $D$  του στροβίλου για τα τρία κλίματα κύματος. Η



βέλτιστη διάμετρος (η οποία αποδίδει το μέγιστο  $\bar{P}_{e,annual}$ ) αυξάνεται με το ενεργειακό επίπεδο των εισερχομένων κυμάτων. Αυτό σημαίνει ότι ένας μεγαλύτερος στρόβιλος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μια πιο ενεργή παραλιακή περιοχή.



**Διάγραμμα 14** Μέση ετήσια καθαρή ισχύς εξόδου του στρόβιλου σε σχέση με τη διάμετρό του για τα τρία κλίματα κύματος.

Από υδροδυναμικής απόψεως, η ενέργεια που απορροφάται από τη στήλη OWC από τα κύματα είναι μέγιστη για μια τιμή του συντελεστή απόσβεσης του στρόβιλου ( $d = \rho_a P / \dot{m}$ ) ο οποίος εξαρτάται από την περίοδο του κύματος (για ομαλά κύματα) ή από μια χαρακτηριστική περίοδο  $T_e$  (για μη ομαλά κύματα).

Στην παρούσα μελέτη η γεωμετρία του στρόβιλου είναι σταθερή και επομένως αυτό που διατηρείται σταθερό είναι η σταθερά  $K = \frac{\theta}{\psi}$  κι έτσι ο συντελεστής απόσβεσης του στρόβιλου  $d = K \rho_a^{-1} D N^{-1}$  αλλάζει κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης του μεγέθους του στρόβιλου εφόσον ο λόγος  $D/N$  δε διατηρείται σταθερός (ένας μεγαλύτερος στρόβιλος θα λειτουργεί με χαμηλότερη περιστροφική ταχύτητα). Η γεωμετρία του στρόβιλου επιλέχθηκε

εμπειρικά για να μπορέσει να προσαρμοστεί στις συνθήκες που εξετάζουμε. Για το λόγο αυτό, ο συντελεστής απόσβεσης  $d$  δε θα βελτιστοποιήσει την υδροδυναμική διαδικασία της απορρόφησης ενέργειας από τα κύματα εκτός αν αλλάξει η υδροδυναμική του στροβίλου για να ταιριάζει με το μεταβλητό μέγεθος του στροβίλου (και πιθανώς του κλίματος κύματος).

#### 4.2.2 Βελτιστοποίηση για μέγιστο κέρδος

Στο παρόν στάδιο της ανάπτυξης της τεχνολογίας κυματικής ενέργειας, οι οικονομικές παράμετροι είναι δύσκολο να εκτιμηθούν ειδικότερα όταν το αντικείμενο είναι να προβλεφθούν κόστη για μεγάλης κλίμακας ωρίμων τεχνολογιών κυματικής ενέργειας

Η δομή της κατασκευής επιδρά στο κόστος κεφαλαίου της εγκατάστασης OWC. Για να γίνουν τα συστήματα ακτογραμμής οικονομικά βιώσιμα θα πρέπει να μειωθεί το κατασκευαστικό κόστος.

Τα κόστη του μηχανολογικού εξοπλισμού (ειδικά οι αεριοστροβίλοι) είναι τα πιο δύσκολα να εκτιμηθούν. Η εκτίμηση του μηχανολογικού κόστους ( $C_{mech}$ ) έγινε σε δύο στάδια. Αρχικά ορίστηκε μια τιμή αναφοράς  $C_{mech,0}$  η οποία προήλθε εμπειρικά από ένα υπάρχον πρωτότυπο του οποίου το μέγεθος αναπαρίσταται από τη διάμετρο  $D_0$  του ρότορα του στροφέα (2.3 m για το σταθμό Pico). Θεωρώντας γεωμετρική ομοιότητα σε όλο το μηχανολογικό εξοπλισμό, ο όγκος και συνεπώς η μάζα του υλικού θα είναι ανάλογα του  $D^3$ .

Συνεπώς θα ισχύει:

$$C_{mech}(D) = C_{mech,0} \left( \frac{D^3}{D_0^3} \right)^X \quad (71)$$

Το  $X$  είναι ένας εκθέτης που συνήθως παίρνει την τιμή 0.6. Για ένα μόνο πρωτότυπο ή για ένα μικρό αριθμό μονάδων υποτίθεται ότι  $C_{mech,0} = 330$  k€,  $X=2/3$  και συνεπώς προκύπτει  $C_{mech} = 62D^2$ .

$$\text{Ομοίως, για τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό ισχύει } C_{elec} = 3.3P_{rated}^{0.7} \quad (72)$$

Σημειώνεται ότι οι εκτιμήσεις αυτές συμπεριλαμβάνουν την κατασκευή και εγκατάσταση του εξοπλισμού, αλλά όχι τα κόστη ανάπτυξης και σχεδιασμού.

Επειδή είναι δύσκολο να προβλεφθούν τα κόστη μιας ώριμης τεχνολογίας εξετάζεται ένα εύρος τιμών των οικονομικών παραμέτρων μοντελοποίησης. Συγκεκριμένα θεωρούμε:

$$20 < B_{mech} < 62,$$

$$2.0 < B_{elec} < 3.3$$

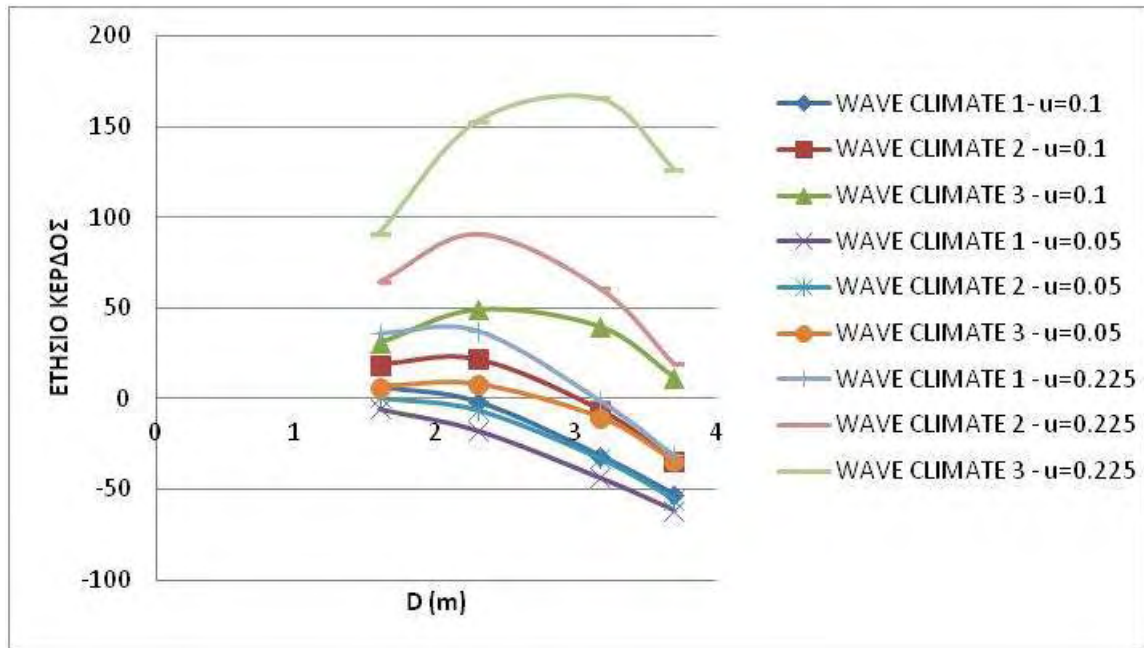
$$\text{Όπου } C_{mech} = B_{mech}D^2, C_{elec} = B_{elec}P_{rated}^{0.7}.$$

Στους υπολογισμούς που έγιναν, για το κόστος λειτουργίας και συντήρησης θεωρήθηκε ότι  $A_{O\&M} = 0.03(C_{mech} + C_{elec})$  και για διαθεσιμότητα  $A=0.95$ .

Η τιμή  $u$  σε ευρώ ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτείται στο δίκτυο είναι πολύ σημαντική. Οι χαμηλότερες τιμές του  $u$  αναμένεται να είναι σε πολύ μεγάλα ηλεκτρικά δίκτυα, ενώ οι υψηλές τιμές λαμβάνονται σε μικρά απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα (πιθανώς σε νησιά) όπου η συνήθης εναλλακτική λύση είναι η δαπανηρή παραγωγή πετρελαίου. Εξάιρεση αποτελεί η Κυβέρνηση της Πορτογαλίας, όπου το 2002, αποφάσισε να σταθεροποιήσει την τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, για λόγους προώθησης της κυματικής τεχνολογίας σε  $u=0.225\text{€/kWh}$ .

Στα διαγράμματα 15-18, παρουσιάζεται το ετήσιο κέρδος ως συνάρτηση του μεγεθους του στροβίλου  $D$ , για τα τρία κλίματα κύματος που θεωρήθηκαν παραπάνω. Το ετήσιο κέρδος μεταβάλλεται υπό την επίδραση του κλίματος κύματος, της διαμέτρου  $D$ , της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας  $u$ , του προεξοφλητικού επιτοκίου  $r$ , του κόστους αναφοράς του μηχανολογικού εξοπλισμού  $B_{mech}$  και του χρόνου ζωής του εξοπλισμού  $n$ .

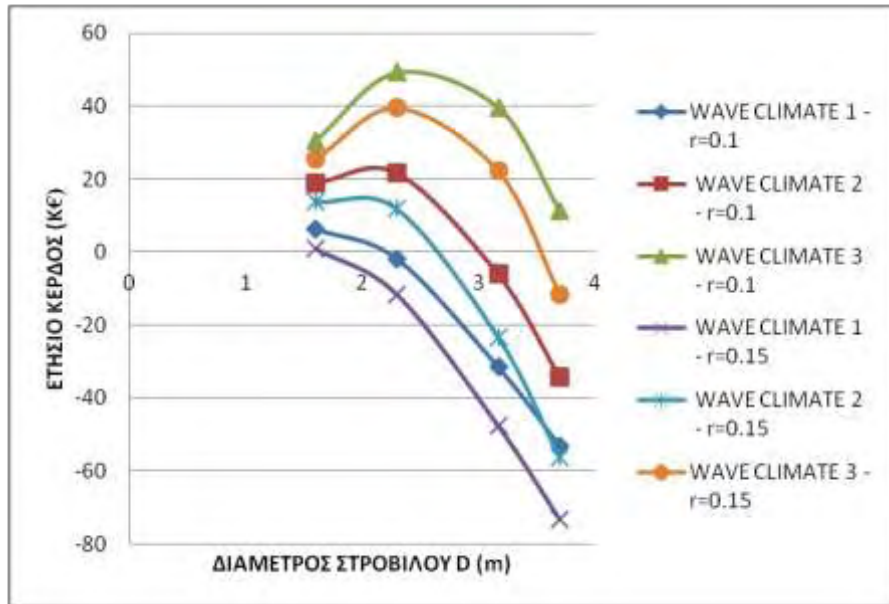
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λαμβάνεται υπόψη μόνο το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (εξαρτάται από το μέγεθος  $D$  του στροβίλου και από την ισχύ λειτουργίας του). Η παράλειψη του υπόλοιπου κόστους δεν επηρεάζει τη διαδικασία βελτιστοποίησης, αλλά αποφέρει υπερεκτιμήσεις των κερδών.



**Διάγραμμα 15** Ετήσιο κέρδος  $E$  σε σχέση με τη διάμετρο του στροβίλου  $D$  για τα τρία κλίματα κύματος (το  $u$  είναι σε €/kWh) ( $B_{\text{mech}}=30$ ,  $B_{\text{elec}}=2$ ,  $n=20$  χρόνια,  $r=0.1$ )

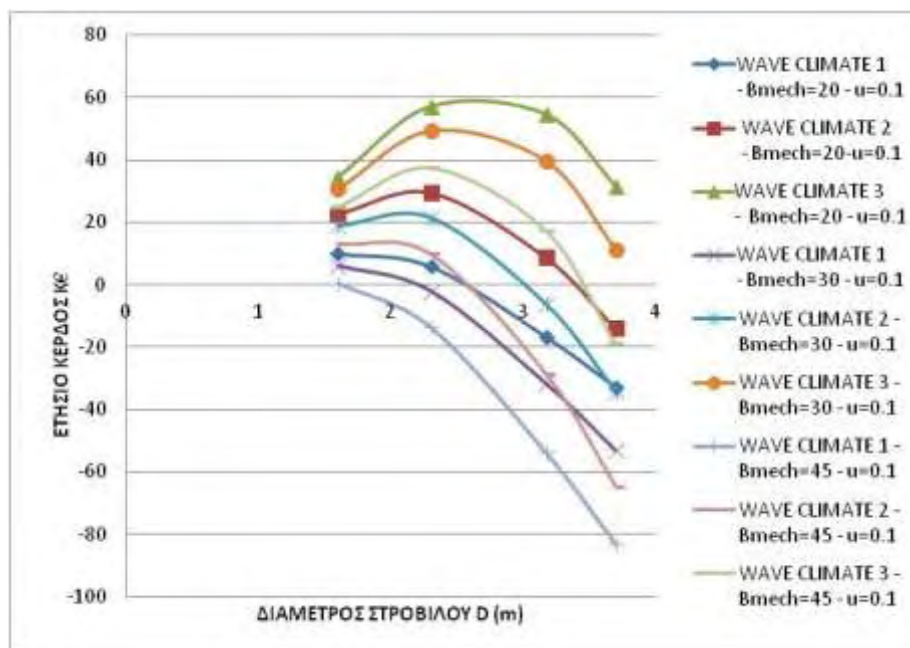
Το διάγραμμα 15 δείχνει την επίδραση της τιμής της ενέργειας  $u$  στο ιδανικό μέγεθος του στροβίλου. Συγκρίνοντας με το διάγραμμα 14, φαίνεται ότι το κριτήριο του κέρδους οδηγεί σε ένα μικρότερο στροβίλο σε σχέση με το κριτήριο της ενέργειας. Η διαφορά φαίνεται περισσότερο στα κλίματα χαμηλότερου ενεργειακού επιπέδου. Επίσης, το διάγραμμα 15 δείχνει ότι σε κλίματα κύματος με μικρή ενέργεια (κλίμα 1), δεν επιτυγχάνονται κέρδη, εκτός αν δίνεται μια σχετικά υψηλή τιμή για την παραγόμενη ενέργεια (σημαντικά μεγαλύτερη από 0.05€/kWh) και/ή αν επιτευχθούν μεγάλες μειώσεις του κόστους

κεφαλαίου (κάτω από  $B_{mech}=30$  και  $B_{elec}=2.0$ ). Από την άλλη πλευρά, αν  $u=0.225\text{€/kWh}$ , η τεχνολογία που λαμβάνεται υπόψη θα μπορούσε να είναι ερκετά επικερδής ακόμα και σε ένα κλίμα κύματος μεσαίας ενέργειας.

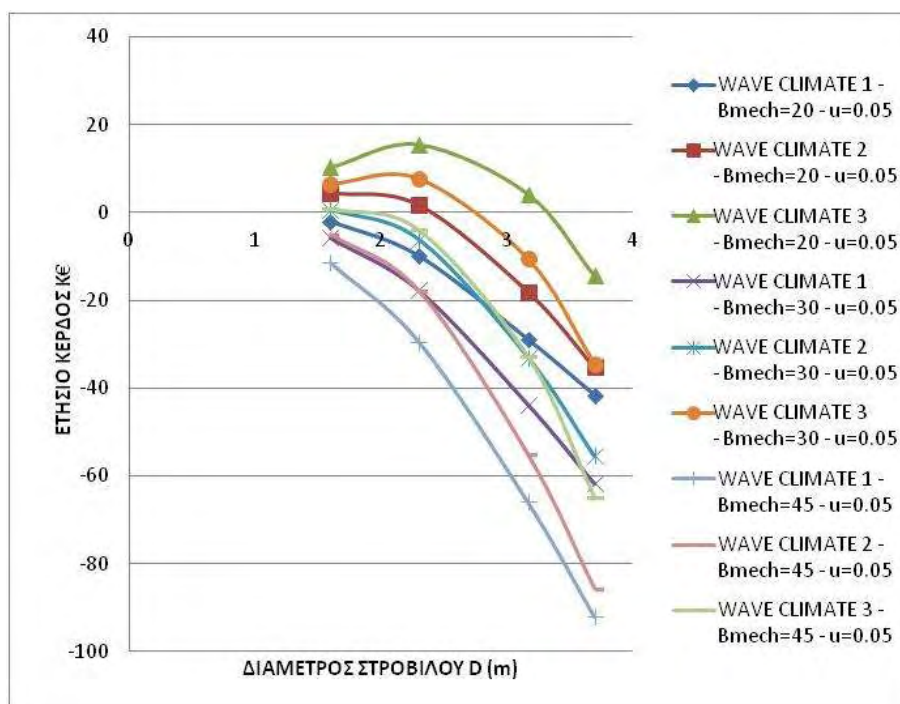


**Διάγραμμα 16** Επίδραση του προεξοφλητικού επιτοκίου ( $B_{mech}=30$ ,  $B_{elec}=2$ ,  $n=20$  χρόνια,  $u=0.1\text{€/kWh}$ )

Τα διαγράμματα 16, 17 και 18 δείχνουν την επίδραση του μεταβλητού προεξοφλητικού επιτοκίου, του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και του χρόνου ζωής του εξοπλισμού. Αύξηση των μεταβολών των τιμών αυτών οδηγούν σε αύξηση του ετήσιου κόστους (και μείωση του κέρδους) και επιφέρουν μια μείωση του ιδανικού μεγέθους του στροβίλου  $D$  και της ισχύος λειτουργίας  $P_{rated}$ .



**Διάγραμμα 17** Επίδραση του κόστους κεφαλαίου του μηχανολογικού εξοπλισμού (u=0.1€/kWh, B<sub>elec</sub>=2, n=20 χρόνια, r=0.1)



**Διάγραμμα 18** Επίδραση του κόστους κεφαλαίου του μηχανολογικού εξοπλισμού (u=0.05€/kWh, B<sub>elec</sub>=2, n=20 χρόνια, r=0.1)

### 4.3 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Το κεφάλαιο αυτό έδειξε ότι η στοχαστική μοντελοποίηση είναι ένα ισχυρό εργαλείο των προκαρκτικών μελετών και του βασικού σχεδιασμού ενός συστήματος κυματικής ισχύος, ειδικά σε ό,τι αφορά τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Αναλύθηκαν δύο κριτήρια βελτιστοποίησης, η εφαρμογή του δεύτερου (σχεδιασμός για μεγιστοποίηση του κέρδους) βρέθηκε ότι οδηγεί σε μικρότερο στρόβιλο και λιγότερο αποτελεσματικό εξοπλισμό σε σύγκριση με το πρώτο κριτήριο (σχεδιασμός για μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), η διαφορά μεταξύ των δύο είναι σημαντική ειδικά για υψηλά κόστη και χαμηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας.

Αν και το βασικό αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι ο εξοπλισμός, η τεχνική ανάλυση και τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ μπορούν να επεκταθούν, για λόγους βελτιστοποίησης, σε όλο το σταθμό, εξασφαλίζοντας ότι τα κόστη που δε σχετίζονται με τον εξοπλισμό λαμβάνονται υπόψη.

## Κεφάλαιο 5 Σύνοψη Μεταπτυχιακής Εργασίας

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε μια μέθοδος μοντελοποίησης ενός συστήματος κυματικής ενέργειας με παλλόμενη υδάτινη στήλη και στρόβιλο Wells.

Μελετήθηκε η περίπτωση όπου η περιστροφική ταχύτητα του στρόβιλου (N) προσαρμόζεται σε κάθε θαλάσσια κατάσταση και η περίπτωση όπου διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αλλαγή της περιστροφικής ταχύτητας σε κάθε θαλάσσιο επίπεδο οδηγεί σε υψηλή παραγωγή ενέργειας και υψηλότερο ετήσιο κέρδος.

Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές για διάφορες διαμέτρους D του στρόβιλου σε τρία διαφορετικά κλίματα κύματος. Οι δοκιμές αυτές οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι σε κλίματα κύματος χαμηλού ενεργειακού επιπέδου η χρήση μικρότερων στρόβιλων οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος, ενώ αντίθετα σε υψηλά ενεργειακά επίπεδα στρόβιλοι μεγαλύτερης διαμέτρου οδηγούν σε υψηλότερη ισχύ.

Επίσης σε κλίματα κύματος με χαμηλό ενεργειακό επίπεδο (κλίμα 1) δεν επιτυγχάνονται κέρδη, εκτός αν δίνεται μια σχετικά υψηλή τιμή για την παραγόμενη ενέργεια (σημαντικά μεγαλύτερη από 0.05 €/KWh) και αν επιτευχθούν μεγάλες μειώσεις του κόστους κεφαλαίου. Από την άλλη πλευρά αν τιμή για την παραγόμενη ενέργεια είναι 0.225€/KWh, η τεχνολογία που λαμβάνεται υπόψη θα μπορούσε να είναι αρκετά επικερδής ακόμα και σε ένα κλίμα κύματος μέσης ενέργειας. Επίσης έγιναν δοκιμές για την επίδραση του προεξοφλητικού επιτοκίου, του κόστους ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και του χρόνου ζωής του εξοπλισμού. Αύξηση των τιμών αυτών οδηγεί σε αύξηση του ετήσιου κόστους και επιφέρει μείωση του ιδανικού μεγέθους του στρόβιλου και της μέγιστης ισχύος λειτουργίας.



Στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε ως δεδομένη τη συνάρτηση  $\Pi(\Psi)$  που παριστά τις χαρακτηριστικές του στροβίλου. Πιστεύουμε ότι όσον αφορά τη μελλοντική έρευνα στο αντικείμενο θα ήταν ενδιαφέρον να εξεταστεί η εύρεση της καταλληλότερης μορφής αυτής της συνάρτησης με βάση τα κριτήρια βελτιστοποίησης ισχύος ή/και κέρδους. Η εύρεση της συνάρτησης αυτής σε συνδυασμό με τις υπολογισμένες τιμές διαμέτρου και στροφών θα αποτελέσουν τα δεδομένα σχεδιασμού του βέλτιστου στροβίλου Wells που αντιστοιχεί σε μια στήλη ορισμένης γεωμετρίας. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει ταυτόχρονα βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της υδάτινης στήλης.

## Βιβλιογραφία

1. <http://www.waveplam.eu/files/downloads/WavePlamFinal.pdf>.
2. Μαυράκος, Σ.Α., *Θαλάσσια ενέργεια, Παρουσίαση στα πλαίσια ημερίδας Η συμβολή της Σχολής ΝΜΜ του ΕΜΠ στη Ναυπηγική & Θαλάσσια Βιομηχανία & Ναυτιλία, Αθήνα, Ευγενίδειο Ίδρυμα 2007.*
3. Economist, T., *Wave Power, The coming wave.* 2008.
4. [http://www.spitia.gr/greek/aiforos/ananeosimes/kimatiki\\_energy/kimatiki.htm](http://www.spitia.gr/greek/aiforos/ananeosimes/kimatiki_energy/kimatiki.htm).
5. (CRES), C.f.R.E.S., *Wave energy Utilization in Europe: Current Status and Perspectives.* European Thematic Network on Wave Energy. 2002.
6. (CRES), C.f.R.E.S., *Ocean Energy Conversion in Europe: Recent advancements and prospects* Athens, Centre for Renewable Energy Sources. 2006.
7. [http://dSPACE.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/3173/3/apostolidism\\_waveenergy.pdf](http://dSPACE.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/3173/3/apostolidism_waveenergy.pdf).
8. [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESERGASIAS/OI\\_PROOPTIKES\\_TWN\\_APE\\_STHN\\_ELLADA/59-73.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESERGASIAS/OI_PROOPTIKES_TWN_APE_STHN_ELLADA/59-73.pdf).
9. <http://dbserver.forthnet.gr/Praxis/servlet/praxis.PServlet?s=praxis.TMShowPublic?id=5&l=el>.
10. <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi3262.html>.
11. <http://www.aquaret.com/images/stories/aquaret/pdf/cswavepico.pdf>.
12. Falcaõ, A.F., de O., *The Shoreline OWC Power Plant at the Azores.* 2000(4th European Wave Energy Conference).
13. Sorensen, H.C., Hansen, R., Friis-Madsen, E., Panhauser, W., Mackie, G., H.H. Hansen, Frigaard, P., Hald, T., Knapp, W., Holmen, E., Holmes, B., and G. Thomas, and Rasmussen, P., *The Wave Dragon-Now Ready for Tests in Real Sea.* 2000.
14. Rademakers, L.W.M.M.S., R.G. van; Schuitema, R.; Vriesema, B.; Gardner, F., *Physical model testing for characterising the AWS, in ECN contribution to the European Wave Energy Conference EWEC '98.* 1998, ECN: Patras, Greece. p. 8.
15. Curran, R., Denisse, T., and Boake, C., *Multidisciplinary Design for Performance: Ocean Wave Energy Conversion.* Proc. 10th Int. Offshore & Polar Eng. Conf., Seattle, ISOPE, 2000. **1**: p. 434–441.
16. Raju, V.S., and Jayakuma, Neelami, S. and . *Concrete Caisson for a 150kW Wave Energy Pilot Plant: Design, Construction and Installation Aspects.* IIT Madras, India, 1992.
17. Thorpe, T., ed., *Economic Analysis of Wave Power Devices.* Proc. 3rd European Wave Energy Conference, W. Dursthoff, 1998: p. 266–271.
18. Evans, D.V. and R. Porter, *Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device.* Applied Ocean Research, 1995. **17**(3): p. 155-164.

19. Delauré, Y.M.C. and A. Lewis, *3D hydrodynamic modelling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods*. Ocean Engineering, 2003. **30**(3): p. 309-330.
20. Josset, C. and A.H. Clément, *A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants*. Renewable Energy, 2007. **32**(8): p. 1379-1402.
21. Paixão Conde, J.M. and L.M.C. Gato, *Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter*. Renewable Energy, 2008. **33**(12): p. 2637-2644.
22. Falcão, A.F.d.O. and P.A.P. Justino, *OWC wave energy devices with air flow control*. Ocean Engineering, 1999. **26**(12): p. 1275-1295.
23. Sarmiento, A.J.N.A., *Wave flume experiments on two-dimensional oscillating water column wave energy devices*. Experiments in Fluids, 1992. **12**(4): p. 286-292.
24. Setoguchi, T., et al., *A review of impulse turbines for wave energy conversion*. Renewable Energy, 2001. **23**(2): p. 261-292.
25. A.EL Marjani, F.C., M. Bahaji, B. Filali, *3D UNSTEADY FLOW SIMULATION IN AN OWC WAVE CONVERTER PLANT*.
26. A.F.de O, F., *Control of an oscillating-water-column wave power plant for maximum energy production*. Applied Ocean Research, 2002. **24**(2): p. 73-82.
27. António F.de O, F., *Stochastic modelling in wave power-equipment optimization: maximum energy production versus maximum profit*. Ocean Engineering, 2004. **31**(11–12): p. 1407-1421.
28. Falcão, A.F.d.O. and R.J.A. Rodrigues, *Stochastic modelling of OWC wave power plant performance*. Applied Ocean Research, 2002. **24**(2): p. 59-71.
29. Olvera, A., E. Prado, and S. Czitrom, *Parametric resonance in an oscillating water column*. Journal of Engineering Mathematics, 2007. **57**(1): p. 1-21.
30. Alberdi, M.A., M. Garrido, A.J. Garrido, *Ride through of OWC-based wave power generation plant with air flow control under symmetrical voltage dips*. 2010(Control & Automation (MED), 2010 18th Mediterranean Conference on): p. 1271-1277.
31. Amundarain, M.A., M.Garrido, A.J. Garrido, *Control strategies for OWC wave power plants*. 2010(American Control Conference): p. 4319-4324.
32. Commussion, T.E., *European wave energy pilot plant on the island of Pico, Azores, Portugal. Phase two: Equipment*. 1998.
33. I. Le Crom, A.B.-M., F. Neumann, A. Sarmiento, *Numerical Estimation of incident wave parameters based on the air pressure measurements in Pico OWC plant*. 2009.
34. R.G.H. Arlitt, K.T., R.Starzmam, J. Lees, *Dynamic system modeling of an oscillating water column wave power plant based on characteristic curves obtained by computational fluid dynamics to enhance Engineered reliability*. 2010.
35. Ram, K., et al., *Experimental studies on the flow characteristics in an oscillating water column device*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010. **24**(10): p. 2043-2050.
36. Sarmiento, A.J.N.A., A. Brito e Melo, and M.T. Pontes, *The Influence of the Wave Climate on the Design and Annual Production of Electricity by OWC Wave Power*

- Plants*. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2003. **125**(2): p. 139-144.
37. Suroso, A., *Hydraulic model test of wave energy conversion*. Jurnal Mekanikal, 2005: p. 84-94.
  38. Tseng, R.-S., R.-H. Wu, and C.-C. Huang, *Model study of a shoreline wave-power system*. Ocean Engineering, 2000. **27**(8): p. 801-821.
  39. Sarmiento, A.J.N.A. and A.F.d.O. Falcão, *Wave generation by an oscillating surface-pressure and its application in wave-energy extraction*. Journal of Fluid Mechanics, 1985. **150**: p. 467-485.
  40. Alessandro Corsini, F.R., *Modelling of wave energy conversion with an Oscillating Water Column device*.