



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΑ  
ΚΥΜΑΤΑ**

**ΔΡΙΜΑΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΕΤΡΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Σαρρής Ιωάννης, Αναπληρωτής καθηγητής**

**ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019**

**Περιεχόμενα**

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></b> .....	4
<b>1.1 Εισαγωγή</b> .....	4
<b>1.2 Είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας</b> .....	9
1.2.1 Ηλιακή ενέργεια.....	9
1.2.2 Αιολική ενέργεια.....	9
1.2.3 Γεωθερμική ενέργεια.....	10
1.2.4 Ενέργεια από Βιομάζα.....	11
1.2.5 Υδροηλεκτρική Ενέργεια.....	12
1.2.6 Ενέργεια από τη θάλασσα.....	13
<b>1.3 Τεχνολογίες Αξιοποίησης των ΑΠΕ</b> .....	14
<b>1.4 Εκτίμηση των Ανανεώσιμων Πόρων</b> .....	15
<b>1.5 Η Θέση των ΑΠΕ στην Παγκόσμια Παραγωγή Ενέργειας</b> .....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup></b> .....	21
<b>2.1 Ενέργεια προερχόμενη από κύματα - Εισαγωγή</b> .....	21
<b>2.2 Προκλήσεις</b> .....	22
<b>2.3 Μετατροπείς ενέργειας κυμάτων (Wave Energy Converter – WEC)</b> .....	23
2.3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την θέση.....	24
2.3.2 Κατηγοριοποίηση συσκευών με βάση τον τύπο.....	25
<b>2.4 Μέθοδοι λειτουργίας</b> .....	27
2.4.1 Υποθαλάσσιες συσκευές που βασίζονται στην διαφορά πίεσης.....	27
2.4.2 Μετατροπέας ταλάντωσης ύψους κύματος.....	28
2.4.3 Ταλαντευόμενη στήλη νερού (Oscillating water column - OWC).....	29
2.4.4 Συσκευές υπερπλήρωσης.....	30
<b>2.5 Μέθοδοι δέσμευσης της ενέργειας</b> .....	31
2.5.1 Περιστροφικές γεννήτριες.....	32
2.5.2 Τύπος γεννητριών με στρόβιλο.....	33
2.5.3 Υδραυλική μέθοδος δέσμευσης.....	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup></b> .....	38
<b>3.1 Δέσμευση ενέργειας από κύματα με χρήση ταλαντευόμενων πτερυγίων (flapping foils)</b> ...	38
<b>3.2 Βασικοί τύποι συστημάτων ταλαντευόμενων πτερυγίων</b> .....	40
3.2.1 Τύπος 1: Συστήματα με εξαναγκασμένη γωνιακή κίνηση και άνωση.....	40
3.2.2 Τύπος 2: Συστήματα με εξαναγκασμένη γωνιακή κίνηση και επαγόμενες κινήσεις άνωσης (ημι-ενεργοποιημένα συστήματα).....	41
3.2.3 Τύπος 3: Συστήματα με αυτοσυντηρούμενες κινήσεις κλίσης και άνωσης (Αυτοδύναμα συστήματα).....	41

3.3 Επισκόπηση των συστημάτων με εξαναγκασμένη γωνιακή κίνηση και άνοση .....	42
3.3.1 Επίδρασεις κινηματικών παραμέτρων .....	42
3.3.2 Επίδραση της αστάθειας της ροής πίσω από το ταλαντευόμενο πτερύγιο στην αποδοτικότητα της συλλογής ενέργειας .....	47
3.3.3 Άλλοι παράγοντες επίδρασης.....	48
3.3.4 Επίδραση αριθμού Reynolds .....	50
3.4. Μηχανισμοί για την περαιτέρω ενίσχυση της ικανότητας εξαγωγής ενέργειας .....	51
3.4.1. Μη-ημιτονοειδής κίνηση .....	52
3.4.2. Κυματοειδή πτερύγια .....	52
3.4.3 Δομική ευελιξία.....	53
3.4.4. Διαμορφώσεις πολλαπλών πτερυγίων .....	54
3.5 Ανασκόπηση των ημι-ενεργοποιημένων συστημάτων .....	56
3.6 Ανασκόπηση των αυτοσυντηρούμενων συστημάτων.....	59
3.7 Συμπεράσματα .....	62
<i>Παράρτημα Α</i> .....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup></b> .....	66
4.1 Εισαγωγή.....	66
4.2 Περιγραφή της γεννήτριας ταλαντευόμενου πτερυγίου .....	67
4.3. Πείραμα και ανάλυση δεδομένων .....	69
4.4 Αριθμητικές προσομοιώσεις και ανάλυση απόδοσης της γεννήτριας ταλαντευόμενων πτερυγίων .....	71
4.5. Τελικές παρατηρήσεις- Συμπεράσματα .....	74
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	76

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη και υπολογισμός της ροής νερού γύρω από υδροδυναμικά πτερύγια (flapping foils), που χρησιμοποιούνται από μηχανές παραγωγής ενέργειας από

κύματα. Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η έννοια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα είδη που τις απαρτίζουν αλλά επίσης αναφέρονται και διάφορα στατιστικά στοιχεία τα οποία ισχύουν για αυτές σήμερα. Ακολουθώντας στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσεται εκτενώς η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία προέρχεται από την εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων. Γίνεται εκτενής αναφορά στις συσκευές που υπάρχουν σήμερα για την μετατροπή της ανωτέρω μορφής ενέργειας αλλά και στον τρόπο δέσμευσης της. Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσουμε την δέσμευση ενέργειας από κύματα με χρήση της τεχνολογίας ταλαντευόμενων πτερυγίων (flapping foils). Γίνεται αναφορά στην αρχή λειτουργίας τους αλλά και στους βασικούς τύπους που υπάρχουν σήμερα. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφεται μια γεννήτρια ταλαντευόμενου πτερυγίου η οποία μπορεί να προσομοιωθεί και επίσης παρουσιάζονται το σύνολο των εξισώσεων που θα περιγράψουν την απόδοσή της.

## **ABSTRACT**

In the present thesis, the flow of water around flapping foils used by wave power generators is studied and calculated. The first chapter develops the concept of renewable energy technologies and also the various statistics that apply to them today. The next chapter analyzes the type of renewable energy which originates from the exploitation of wave energy. There is extensive reference to the current devices for converting the above form of energy and the way it is captured. In the next chapter, the wave energy capture using flapping foils technology is described. Reference is made to the principle of operation and to the basic types that exist today. Finally, the last chapter describes an oscillating flap generator that can be simulated and also the set of equations that will describe its performance are reviewed.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>**

### **1.1 Εισαγωγή**

Ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ, renewable energy source - RES) ονομάζεται εκείνη η μορφή ενέργειας η οποία δεν εξαντλείται στο απώτερο ορατό μέλλον της ανθρωπότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σταθερό και αξιόπιστο τρόπο. Οι ορισμοί και η κάλυψη των στατιστικών στοιχείων για τις ΑΠΕ ποικίλλουν μεταξύ χωρών, διαφόρων οργανισμών και συγγραφέων. Για παράδειγμα, οι ΑΠΕ ορίζονται από τον Sorensen (2004) ως «οι ενεργειακές ροές που αντικαθίστανται με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο καταναλώνονται». Στις σημειώσεις αυτές υιοθετούνται οι ορισμοί του International Energy Association (IEA), όπου οι ΑΠΕ ταξινομούνται ως εξής:

- 1) Ηλιακή ενέργεια
- 2) Υδροηλεκτρική ενέργεια ή υδροϊσχύς
- 3) Αιολική ενέργεια
- 4) Καύσιμες ανανεώσιμες πηγές και απορρίμματα (combustible renewables and waste, CRW), βασικά η βιομάζα, όρος που χρησιμοποιείται στις σημειώσεις.
- 5) Γεωθερμία (και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας)
- 6) Παλιρροϊκή ενέργεια
- 7) Ενέργεια από τα κύματα
- 8) Θερμότητα από τους ωκεανούς

Συχνά, οι τρεις τελευταίες μορφές ενέργειας καλούνται ενέργειες από τη θάλασσα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα κάτωθι:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνετε η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.

- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας πιο ορθολογική χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (πχ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με γεωθερμική ενέργεια).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους:

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.

Συχνά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βρίσκονται με τις ονομασίες εναλλακτικές πηγές ενέργειας (alternative energy sources), από το γεγονός ότι μπορούν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μορφές ενέργειας), ήπιες (benign), επειδή έχουν σχετικά μικρές επιπτώσεις στο περιβάλλον ή μικρότερες από τις επιπτώσεις των συμβατικών πηγών ενέργειας, και πρόσθετες

(additive), επειδή με το τωρινό επίπεδο τεχνολογίας μόνο συμπληρωματικά μπορούν να συνυπάρχουν με τις συμβατικές μορφές ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η βασική έννοια της ανανεωσιμότητας των ΑΠΕ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια της αιφόρου ανάπτυξης και την προσπάθεια της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Όλο και περισσότερο οι ΑΠΕ συνεισφέρουν στις τρεις κύριες συνιστώσες της αιφόρου ανάπτυξης: στην οικονομία, το περιβάλλον και στην κοινωνική ευημερία. Θα πρέπει, βεβαίως, να τονιστεί ότι καμία μορφή ενέργειας, όσο ανανεώσιμη και «καθαρή» και αν είναι, δεν έχει μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΑΠΕ ανά κατηγορία συνοψίζονται στον Πίνακα 1, ενώ περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στα επιμέρους κεφάλαια.

**Πίνακας 1.** Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα ανά κατηγορία ΑΠΕ.

<b>ΑΠΕ</b>	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
<i>Ηλιακή ενέργεια</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τεράστιο δυναμικό</li> <li>• Πάντοτε παρούσα</li> <li>• Δεν ρυπαίνει</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μικρή απόδοση</li> <li>• Υψηλό αρχικό κόστος</li> <li>• Πρόβλημα αποθήκευσης</li> <li>• Υψηλό κόστος στον καταναλωτή</li> <li>• Διαφέρει με την ώρα και τη θέση</li> </ul>
<i>Υδρο-ενέργεια</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή απόδοση (&gt;80%)</li> <li>• Ελάχιστη απορριπτόμενη θερμότητα</li> <li>• Το μικρότερο κόστος ανά kWh</li> <li>• Ρυθμίζεται εύκολα</li> <li>• Δυνατότητα μερικής αποθήκευσης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αποθέσεις/ιζήματα</li> <li>• Αποτυχία φραγμάτων</li> <li>• Μεταβολή τοπικού κλίματος</li> <li>• Ορισμένα είδη ψαριών σε κίνδυνο</li> </ul>
<i>Αιολική</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ευέλικτη, ακόμη και σε μεμονωμένα σπίτια</li> <li>• Ιδιαίτερη συνεισφορά σε «ανεμοδαρμένες» περιοχές</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μεταβλητή λειτουργία</li> <li>• Μικρή απόδοση (30%)</li> <li>• Οπτική ρύπανση</li> </ul>
<i>Γεωθερμική</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή απόδοση</li> <li>• Όχι τόσο μεγάλο πάγιο κόστος</li> <li>• Συνεχής παραγωγή ενέργειας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μερικώς ανανεώσιμη</li> <li>• Τοπικός πόρος – τοπική ανάπτυξη</li> <li>• Κάποιες μορφές ρύπανσης</li> </ul>
<i>Θερμική ενέργεια ωκεανών</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μεγάλο δυναμικό</li> <li>• Αξιοποίηση μεγάλης κλίμακας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τεχνολογικά προβλήματα</li> <li>• Τεράστιο κόστος</li> </ul>
<i>Παλιρροϊκή</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σταθερή πηγή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κύκλο μικρού καθήκοντος</li> <li>• Αλλαγή της ακτογραμμής</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μπορούν να αξιοποιηθούν πολλά συστήματα εκβολών ποταμών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υψηλό κόστος</li> </ul>
<i>Καύση βιομάζας</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Φυσικό προϊόν</li> <li>Και για συμπαραγωγή και για μεμονωμένη χρήση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Σωματιδιακή ρύπανση</li> <li>Περιορισμός στη μεταφορά</li> <li>Μεγάλη κλίμακα ;</li> </ul>

Πολλά είναι τα τεχνικά προβλήματα που θα πρέπει να λυθούν για να μπορέσουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να καλύψουν σημαντικό μέρος των αναγκών μας. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα είναι η αποθήκευσή τους, είτε όπως έχουν ή με τη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 2013 κάλυψαν το 11,2% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνουν οι Η.Π.Α., ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση (των 28 χωρών) το αντίστοιχο ποσοστό ανήλθε στο 15% για την ίδια χρονιά. Στους άμεσους στόχους της ΕΕ είναι να αυξηθεί αυτό το ποσοστό στο 20% το 2020. Σε παγκόσμιο επίπεδο το μερίδιο των ΑΠΕ στην πρωτογενή παραγωγή ενέργειας το 2012 ήταν 13,2%.

Σήμερα, βασικός περιορισμός για την αξιοποίηση και περαιτέρω διείσδυση όλων σχεδόν των ΑΠΕ αποτελεί το υψηλότερο αρχικό κόστος, το οποίο σχετίζεται ασφαλώς με το επίπεδο της τεχνολογίας. Βεβαίως, τα τελευταία 15-20 χρόνια το κόστος της ανανεώσιμης ενέργειας μειώθηκε σημαντικά και πολλές ανανεώσιμες τεχνολογίες είναι ανταγωνιστικές ως προς τα ορυκτά καύσιμα, ιδιαίτερα όταν ληφθούν υπόψη και ορισμένες «κρυφές» παράμετροι (περιβάλλον, ασφάλεια, ενεργειακή ανεξάρτηση κ.ά.). Οι παράμετροι αυτοί τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να εκτιμηθούν και να ποσοτικοποιηθούν επακριβώς

Σήμερα, δεν υπάρχει ΑΠΕ που να μπορεί να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες σε μεγάλη κλίμακα, με εξαίρεση βέβαια την υδροηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, σύνηθες χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι η δέσμευση μεγάλων εκτάσεων. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι αναγκαίες εκτάσεις για την παραγωγή ενέργειας από ορισμένες ΑΠΕ.

**Πίνακας 2.** Χρήση για παραγωγή άμεσης και έμμεσης ηλιακής ενέργειας

<b>Μορφή ενέργειας</b>	<b>Απαιτούμενα στρέμματα ανά έτος και άτομο</b>
Βιομάζα	70



Υδροίσχυς	23
Αιολική	4
Φωτοβολταϊκά	1

## 1.2 Είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

### 1.2.1 Ηλιακή ενέργεια

Χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο, οι οποίες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μορφές ΑΠΕ και ιδιαίτερα για τη χώρα μας λόγω της αυξημένης και συνεχούς ηλιοφάνειας. Η εκμετάλλευσή της επιτυγχάνεται με τρεις κυρίως τρόπους: α) τα παθητικά ηλιακά συστήματα, β) τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και γ) τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα δύο πρώτα συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική με τη χρήση διάφορων τεχνολογιών όπως αυτή των ηλιακών συλλεκτών και των φακών ή κάτοπτρων μεγάλης επιφάνειας. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζουν τη λειτουργία τους στην άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου με τη χρήση ηλιακών κυττάρων.



Εικ. 1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια [1]

### 1.2.2 Αιολική ενέργεια

Ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Οι άνεμοι αποτελούν κίνηση αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα που προκαλείται από την ηλιακή

ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, λόγω διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους ή διαφορετικής θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης δημιουργούνται θερμοκρασιακές διαφορές στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την μετακίνηση αέριων μαζών από τόπο σε τόπο. Η εκμετάλλευση αυτής της μορφής ενέργειας έχει ξεκινήσει από τα αρχαία ακόμα χρόνια (ιστιοφόρα) και στις μέρες μας έχει εξελιχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό με τη χρήση ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.



**Εικ. 2** Αιολικό πάρκο με ανεμογεννήτριες [2]

### **1.2.3 Γεωθερμική ενέργεια**

Αποτελεί τη φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το εσωτερικό της προς την επιφάνεια με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Η θερμότητα αυτή μπορεί να αντληθεί είτε με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια είτε με ρεύματα μεταφοράς κοντά στα όρια των λιθосφαιρικών πλακών. Η γεωθερμία θεωρείται ανεξάντλητη μορφή ενέργειας λόγω των τεράστιων ποσοτήτων θερμότητας που περιέχονται στο εσωτερικό της Γης. Βρίσκει έδαφος κυρίως σε ηφαιστιογενείς περιοχές. Ανάλογα με το θερμοκρασιακό επίπεδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανση ή ψύξη, αγροτικές χρήσεις, ιχθυοκαλλιέργειες, βιομηχανικές εφαρμογές και θερμά λουτρά.



**Εικ. 3** Γεωθερμικές Πηγές [3]

#### **1.2.4 Ενέργεια από Βιομάζα**

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στην ενέργεια που παράγεται από την καύση οποιουδήποτε υλικού που παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (όπως είναι το ξύλο, αγροτικά παραπροϊόντα, κτηνοτροφικά απόβλητα, απορρίμματα βιομηχανιών παραγωγής τροφίμων κ.λπ.). Η ηλιακή ενέργεια, που ακολουθεί τον φωτοσυνθετικό δρόμο, αποθηκεύεται σαν χημική ενέργεια μέσα στους φυτικούς ιστούς των ανωτέρω υλικών. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από βιομάζα γίνεται με δύο τρόπους: α) Η καύση της βιομάζας από έναν καυστήρα προκαλεί θέρμανση νερού και λειτουργία γεννήτριας παραγωγής ηλεκτρισμού από τον ατμό που δημιουργείται, και β) Τα αέρια που δημιουργούνται από τη βιομάζα χρησιμοποιούνται για καύση και παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Γενικά, η βιομάζα ίσως αποτελεί την πιο παλιά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας καθώς από την εποχή των σπηλαίων ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε τη θερμότητα που προερχόταν από την καύση ξύλων για την επιβίωσή του.



**Εικ. 4 Πέλλετ [4]**

### **1.2.5 Υδροηλεκτρική Ενέργεια**

Είναι η ενέργεια που αποταμιεύεται ως δυναμική με τη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε υψομετρική διαφορά από τη συνέχιση της ροής του ελεύθερου νερού, και αποδίδεται ως κινητική μέσω της υδατόπτωσης. Η εκμετάλλευση αυτής της μορφής ενέργειας γίνεται μέσω των υδροηλεκτρικών μονάδων οι οποίες αρχικά, μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων στηρίζεται στη δημιουργία μιας δεξαμενής μέσω ενός φράγματος που συγκρατεί μεγάλες ποσότητες νερού. Η διαφορά ύψους μεταξύ στροβίλου και δεξαμενής, παρέχει κινητική ενέργεια στο νερό, δημιουργείται μεγάλη πίεση, κινείται ο υδροστρόβιλος και αυτός με τη σειρά του μέσω ενός άξονα περιστρέφει τη γεννήτρια.





**Εικ. 5** Το υδροηλεκτρικό φράγμα του Itaipu [5]

### **1.2.6 Ενέργεια από τη θάλασσα**

Διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- α) την ενέργεια των παλιρροιών,
- β) την ενέργεια από τα κύματα και
- γ) την θερμική ενέργεια των ωκεανών.

Πιο αναλυτικά, η παλίρροια προκαλείται από την έλξη που ασκούν ο ήλιος και η σελήνη στο υδάτινο περιβάλλον του πλανήτη. Κατά το φαινόμενο αυτό, τα νερά της παλίρροιας κατά την πλημμυρίδα αποθηκεύονται σε φράγματα και κατά την άμπωτη, απελευθερώνονται και κινούν έναν στρόβιλο, λειτουργία όπως αυτή των υδροηλεκτρικών μονάδων. Έτσι παράγεται συνήθως ηλεκτρική ενέργεια στους παλιρροιακούς σταθμούς.

Αναφερόμενοι στη δεύτερη κατηγορία, αυτή εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων όπως του ανέμου. Με την κίνηση του κύματος, πιέζεται τον αέρα μέσα στον θάλαμο του συστήματος κυματικής ενέργειας και περιστρέφεται η τουρμπίνα με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από την γεννήτρια.

Τέλος, η ενέργεια των ωκεανών βασίζεται στις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των επιφανειακών θερμότερων στρωμάτων νερού του ωκεανού και των ψυχρότερων που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη.

Σε επόμενο κεφάλαιο πρόκειται να γίνει εκτενής αναφορά σε αυτού του είδους ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και συγκεκριμένα θα γίνει ανάπτυξη των διάταξης δέσμευσης ενέργειας με χρήση του συστήματος ταλαντευόμενων πτερυγίων (flapping foils).

### 1.3 Τεχνολογίες Αξιοποίησης των ΑΠΕ

Υπάρχει πληθώρα μεθόδων αξιοποίησης των ΑΠΕ, μερικές από τις οποίες συμμετέχουν ήδη σε σημαντικό βαθμό στις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας, ιδιαίτερα των αναπτυσσόμενων χωρών. Είναι ενδιαφέρον ότι οι μισές ανάγκες για ενέργεια στην Αφρική καλύπτονται σήμερα από τις ΑΠΕ και κυρίως από τη βιομάζα. Οι κυριότερες εφαρμογές είναι:

#### ➤ Παραγωγή ηλεκτρισμού

Πολλές ανανεώσιμες τεχνολογίες εφαρμόζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Σήμερα, ηλεκτρική ισχύς παράγεται κυρίως από την υδροϊσχύ, την αιολική ενέργεια και τη γεωθερμία. Επίσης μπορεί να παραχθεί από τη βιομάζα με καύση, τα ηλιακά θερμικά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα κύματα και τις παλίρροιες.

#### ➤ Μεταφορές

Οι μεταφορές απαιτούν ενέργεια «υψηλής ποιότητας» και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η «πράσινη» ηλεκτρική ενέργεια για την κίνηση ηλεκτρικών αυτοκινήτων και τρένων. Υγρά και αέρια βιοκαύσιμα (βιοαιθανόλη, βιοαέριο, βιοντίζελ), καθώς και το υδρογόνο (το οποίο θα παράγεται όμως από τον λεγόμενο «πράσινο» ηλεκτρισμό) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στις μεταφορές.

➤ Θερμότητα

Θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να παραχθεί με καύση της βιομάζας και των βιοκαυσίμων καθώς και με συγκεντρωτικά συστήματα ηλιακών συλλεκτών. Χαμηλής θερμοκρασίας θερμότητα μπορεί να παραχθεί από ηλιακούς συλλέκτες, γεωθερμία και καύση απορριμμάτων.

## 1.4 Εκτίμηση των Ανανεώσιμων Πόρων

Η εκτίμηση των ανανεώσιμων πόρων είναι τόσο δύσκολη και αβέβαιη όσο και η εκτίμηση των συμβατικών πόρων. Προσεγγιστικές εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν από την ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και του ποσοστού της που μετατρέπεται σε άλλες μορφές. Αυτές οι εκτιμήσεις δίνουν προφανώς το ανώτερο όριο των ΑΠΕ. Το ποσοστό των ΑΠΕ που μπορούν να αξιοποιηθούν με οικονομικό τρόπο είναι ασφαλώς πολύ μικρότερο και κάθε φορά (όπως και με τις συμβατικές μορφές ενέργειας) αυτό αποτελεί συνάρτηση του επιπέδου τεχνολογικής ανάπτυξης.

Υπάρχουν στη βιβλιογραφία πολλές προσπάθειες για την εκτίμηση των διαθέσιμων πόρων των ΑΠΕ. Μια τέτοια πρόσφατη εκτίμηση (από την έκθεση World Energy Assessment 2003) παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Οι ανανεώσιμοι πόροι είναι τεράστιοι και, εάν διαχειριστούν με ορθολογικό τρόπο, πρακτικά ανεξάντλητοι.

**Πίνακας 3** Εκτιμήσεις ανανεώσιμων πόρων σε EJ (10<sup>18</sup> J) ανά έτος (πηγή: The World Energy Assessment, UNDP, 2003, p. 148)

<i>Πηγή</i>	<i>Τρέχουσα χρήση</i>	<i>Τεχνικά δυνατό δυναμικό</i>	<i>Θεωρητικό δυναμικό</i>
<i>Ηλιακή</i>	0,1	>1575	3.900.000
<i>Υδροίςχυς</i>	9	50	147
<i>Αιολική</i>	10 TW	640	6.000
<i>Βιομάζα</i>	0,12	>276	2.900
<i>Γεωθερμική</i>	0,6	5000	140.000.000
<i>Ενέργεια ωκεανών</i>	δ.ε.	δ.ε.	7.400
<b>Σύνολο</b>	56	32 TW years	>144.000.000

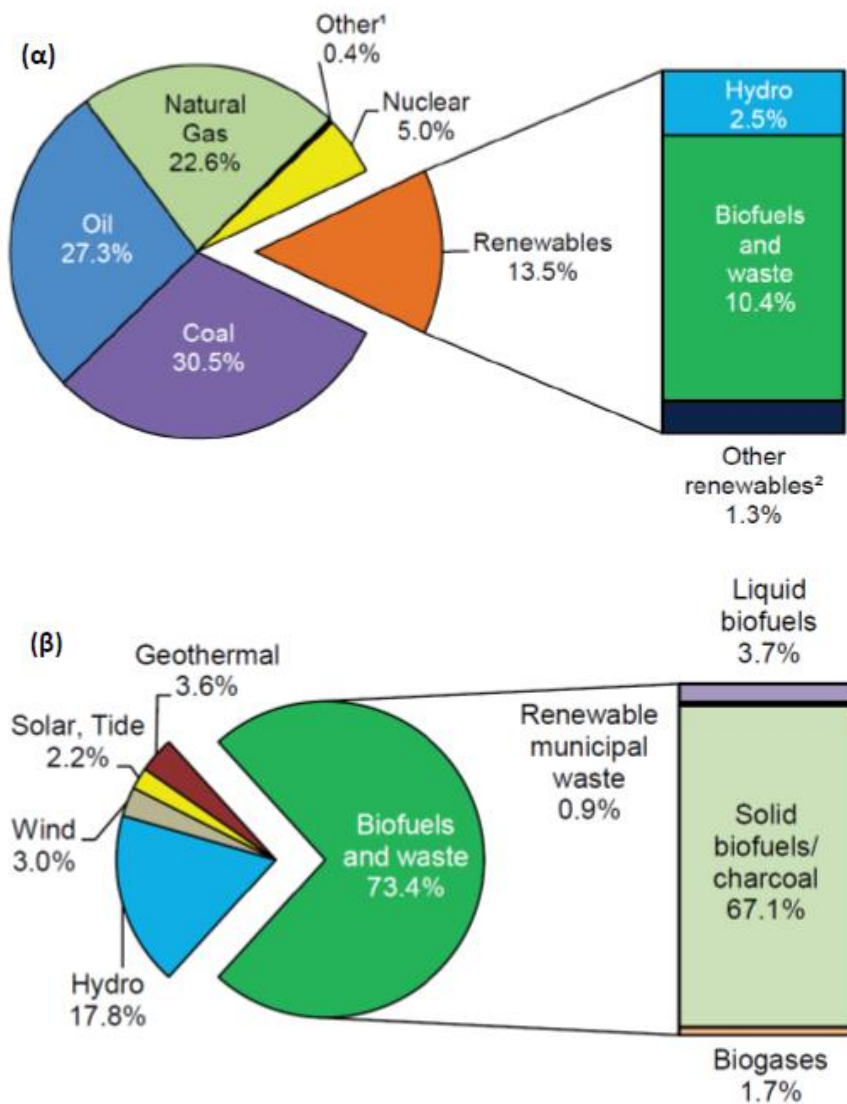
δ.ε.: δεν εκτιμήθηκε

## 1.5 Η Θέση των ΑΠΕ στην Παγκόσμια Παραγωγή Ενέργειας

Ενδιαφέρον και σημαντική ώθηση στις ΑΠΕ σημειώθηκε αρχικά στη δεκαετία του 70, με «ωθούσα» δύναμη την πετρελαϊκή κρίση του 1973. Μόλις όμως ξεπεράστηκε η κρίση (όπως συνέβη και με την κρίση του 1979-1980), η ώθηση αυτή σταμάτησε, τουλάχιστον για ορισμένες ΑΠΕ. Μέρος αυτής της τελμάτωσης οφειλόταν και στα τεχνολογικά προβλήματα που προέκυψαν. Αλλά από το 1990 και μετά η παρατηρούμενη ώθηση στις ΑΠΕ οφειλόταν κυρίως στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων (Συνάντηση του Ρίο, Πρωτόκολλο του Κιότο κτλ.) και, δευτερευόντως, στην ευαισθητοποίηση μεγάλων τμημάτων της κοινωνίας μας.

Στην εικόνα 6 παρουσιάζεται τη συμμετοχή των ΑΠΕ (13,5%) στη συνολική παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας (total primary energy supply, TRES) για το 2013, σύμφωνα με την International Energy Association. Το ποσοστό αυτό μάλλον μένει σταθερό (με πολύ μικρή τάση ανόδου). Αν και μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας θα παραχθούν στο μέλλον από τις ΑΠΕ, η συμμετοχή τους αναμένεται σε παγκόσμιο επίπεδο να μείνει σταθερή. Το διάγραμμα τύπου «πίτας» της εικόνας 6 δίνει περαιτέρω εξειδίκευση της συμμετοχής των διαφόρων ΑΠΕ. Κυριαρχούσες πηγές ενέργειας είναι η βιομάζα (10,4% της TRES ή 73% όλων των ΑΠΕ) και η υδροϊσχύς (2,5% της TRES). Από τις άλλες ΑΠΕ η γεωθερμία συμμετέχει με ποσοστό λίγο μικρότερο του 0,5%, ενώ με λίγο μικρότερα ποσοστά συμμετέχουν η αιολική και της ηλιακή ενέργειας. Σημειώνεται όμως ότι λόγω της ραγδαίας αύξησης της παραγόμενης φωτοβολταϊκής και αιολικής ενέργειας τελευταία, το ποσοστό αυτών των ΑΠΕ αυξάνεται σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Στη βιομάζα, τη συντριπτική πλειοψηφία (με 90% της συνολικής ενέργειας από τη βιομάζα) κατέχουν η στερεή βιομάζα και ο ξυλάνθρακας.



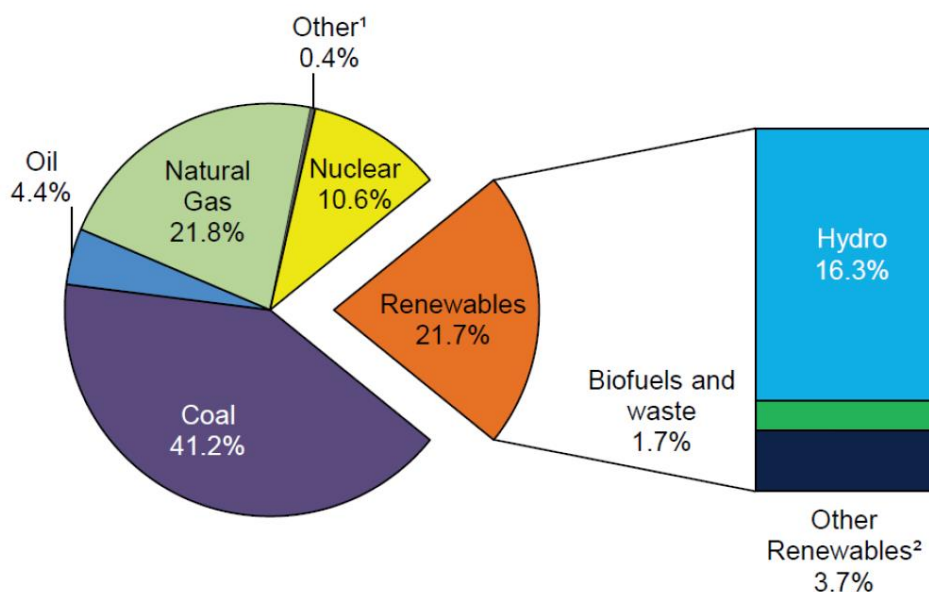


**Εικ. 6** (α) Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας για το 2013 και (β) τα μερίδια των διαφόρων ΑΠΕ (Πηγή: IEA RENEWABLES INFORMATION, 2015 Edition.)

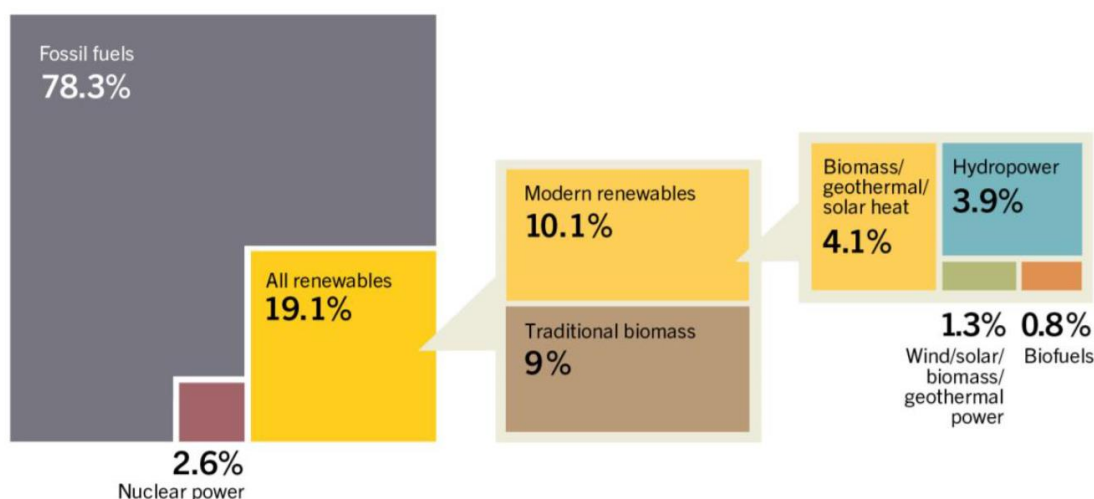
Η εικόνα 7 παρουσιάζει τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η εικόνα 8 απεικονίζεται η συμμετοχή των ΑΠΕ στην παγκόσμια κατανάλωση τελικής ενέργειας για το 2013.

Οι ΑΠΕ συνεισφέρουν σήμερα κατά 21,7% στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πίσω από τον γαιάνθρακα (41%), κατέχοντας σχεδόν το ίδιο μερίδιο με το φυσικό αέριο. Ο «πράσινος» ηλεκτρισμός, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, κυριαρχείται από τα υδροηλεκτρικά συστήματα (76% το 2013) και ακολουθούν η βιομάζα/απορρίμματα (8%) και οι «νέες» ΑΠΕ. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά συστήματα αποτελούν καθιερωμένη τεχνολογία εδώ και

δεκαετίες, αλλά η εγκατεστημένη ισχύς τέτοιων συστημάτων δεν αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά για δύο λόγους: το μεγαλύτερο δυναμικό έχει ήδη αξιοποιηθεί και η ύπαρξη ανησυχιών για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή και λειτουργία των φραγμάτων. Επομένως, η περαιτέρω ανάπτυξη του «πράσινου» ηλεκτρισμού θα πρέπει να προέλθει από τα μικρά υδροηλεκτρικά σχήματα και τις άλλες ΑΠΕ, όπως, ηλιακή και αιολική ενέργεια και βιομάζα.

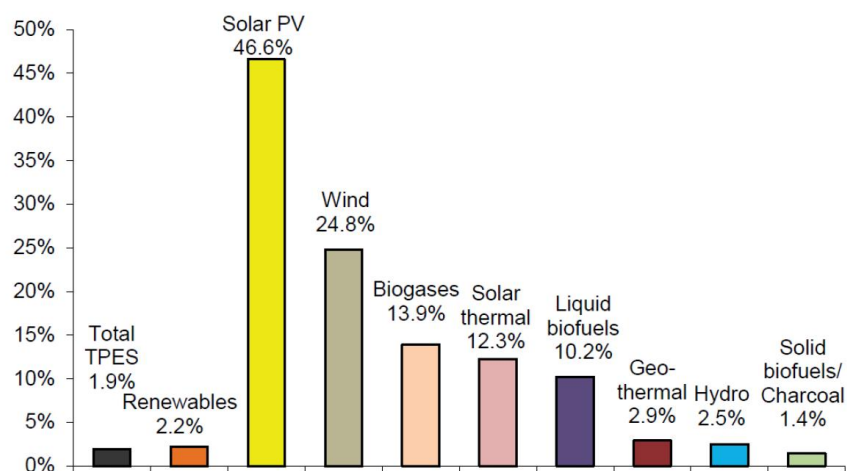


**Εικ. 7** Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το 2013.  
(Πηγή: IEA RENEWABLES INFORMATION, 2015 Edition.)



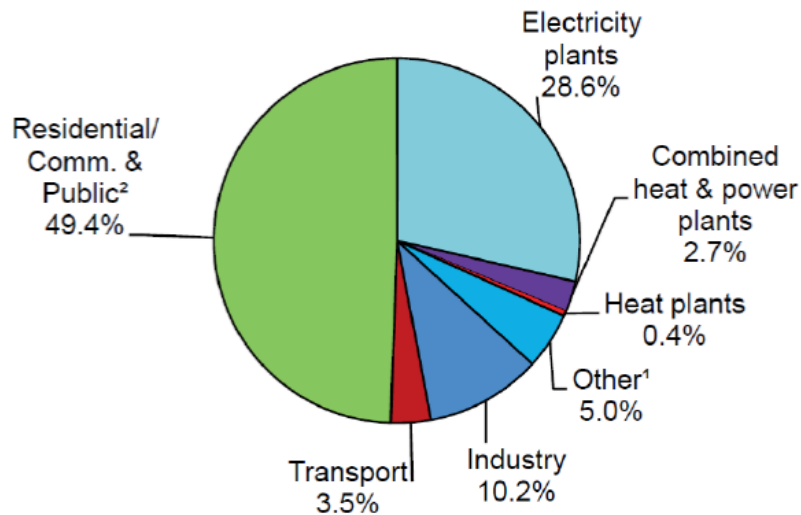
**Εικ. 8** Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην παγκόσμια κατανάλωση τελικής ενέργειας για το 2013  
(Πηγή: REN21, Renewables 2015 Global Status report.)

Τέλος, αναφορικά με το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας από τις ΑΠΕ, το κόστος αυτό για την υδροηλεκτρική, τη γεωθερμική και την αιολική ενέργεια είναι συγκρίσιμο και μερικές φορές μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος με τη χρήση συμβατικής ενέργειας. Στο χρονικό διάστημα 1990-2013 η συνολική παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ παρουσίασε μέση αύξηση 2,2%, λίγο μεγαλύτερη από τη μέση αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας (1,9%), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 9. Πρέπει να τονιστεί όμως, ότι οι λιγότερο σημαντικές σήμερα ΑΠΕ (ηλιακή, αιολική, κ.ά.), που συχνά αναφέρονται και ως «νέες» ΑΠΕ, παρουσιάζουν μέση ετήσια αύξηση 46% και η αιολική ενέργεια εμφανίζει εντυπωσιακή αύξηση της τάξης του 25% ετησίως.



**Εικ. 9** Ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης των ΑΠΕ κατά τη χρονική περίοδο 1990-2013. (Πηγή: IEA RENEWABLES INFORMATION, 2015 Edition.)

Σχετικά με τους τομείς κατανάλωσης της ενέργειας από τις ΑΠΕ (για το 2013), η περισσότερη ενέργεια, σχεδόν 50%, καταναλώνεται σε οικιακές και εμπορικές χρήσεις (θέρμανση χώρων, κλιματισμός, φωτισμός, μαγείρεμα κτλ.), ενώ η παραγωγή ηλεκτρισμού κατέχει το 29% της παραγωγής (Εικ. 10).



**Εικ. 10** Κατανάλωση ΑΠΕ ανά τομέα δραστηριότητας για το 2013. (Πηγή: IEA RENEWABLES INFORMATION, 2015 Edition.)

Η θερμότητα αποτελεί σημαντικό τμήμα της συνολικής κατανάλωσης τελικής ενέργειας. Στις αναπτυγμένες χώρες η βιομηχανία είναι ο μεγαλύτερος τελικός χρήστης θερμότητας με μερίδιο περίπου 40% ( 44% στις χώρες του ΟΟΣΑ). Σε αντίθεση με την ηλεκτρική ενέργεια, η θερμότητα δεν μπορεί να μεταφερθεί αποτελεσματικά σε μεγάλες αποστάσεις. Ως αποτέλεσμα, θα πρέπει να παραχθεί κοντά στο σημείο όπου καταναλώνεται. Μια άλλη πρόκληση για τις ΑΠΕ αποτελούν οι διαφορετικές απαιτήσεις για θερμότητα στους διάφορους τομείς. Έτσι, ενώ για τη θέρμανση κτιρίων απαιτούνται θερμοκρασίες 40-70°C, σε ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες απαιτούνται θερμοκρασίες άνω των 400°C. Πολλές ΑΠΕ μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση θερμότητας διακρίνονται για τη θέρμανση χώρων και παραγωγή ζεστού νερού στα κτίρια και στο γεωργικό τομέα. Στην ΕΕ-28, το μερίδιο των ΑΠΕ για θέρμανση και ψύξη ανήλθε στο 16,5% της συνολικής χρήσης ενέργειας, παρουσιάζοντας σημαντική αύξηση από το 9,9% το 2004. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ σε ορισμένους βιομηχανικούς τομείς, αλλά και στον κτιριακό τομέα με τη αξιοποίηση της αεροθερμικής και της γεωθερμικής ενέργειας με αντλίες θερμότητας. Σημειώνεται βεβαίως ότι ακόμη και σήμερα η βιομάζα εδώ αποτελεί την κύρια πηγή της παραγόμενης θερμότητας. Η παραγωγή θερμότητας από ΑΠΕ είναι άκρως ανταγωνιστική με τη συμβατική ενέργεια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Ενέργεια προερχόμενη από κύματα - Εισαγωγή

Παρά το γεγονός ότι η συζήτηση για την αξιοποίηση της ενέργειας από τα κύματα υπήρξε από τα τέλη του 18ου αιώνα [6], η σύγχρονη έρευνα για την αξιοποίηση της εντάθηκε από την αναδυόμενη πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970 [7]. Δεδομένου ότι σήμερα επικεντρώνεται η παγκόσμια προσοχή της επιστημονικής κοινότητας στην αλλαγή του κλίματος και στην μείωση του επιπέδου του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, η εστίαση στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί για άλλη μια φορά σημαντικό τομέα της παγκόσμιας έρευνας. Εκτιμάται ότι το δυνητικό παγκόσμιο απόθεμα ενέργειας προερχόμενης από τα κύματα είναι της τάξης των 2 TW [8].

Υπάρχουν διάφορες έρευνες πάνω στους μετατροπείς ενέργειας κυμάτων (wave energy converter - WEC) ([7], [8], [11] και [12]). Πολλά είδη συσκευών και διατάξεων διερευνώνται, με τα περισσότερα από αυτά να βρίσκονται στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης, με μόνο ένα μικρό αριθμό συσκευών να έχουν δοκιμαστεί σε μεγάλη κλίμακα και να αναπτύσσονται στους ωκεανούς. Η στήλη ταλάντωσης LIMPET (OWC), που εγκαταστάθηκε στο Islay της Σκωτίας το 2000, αντιπροσωπεύει ένα σύστημα το οποίο παράγει σήμερα ισχύ για το εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης [13]. Τον Σεπτέμβριο του 2008 άρχισε να λειτουργεί ένα άλλο εμπορικό σύστημα κυματικής ενέργειας στη Βόρεια Πορτογαλία. Χρησιμοποιεί τη συσκευή παραγωγής ενέργειας Pelamis που κατασκευάστηκε από την PelamisWave (πρώην OPD) στη Σκωτία.

Η χρήση κυμάτων ως πηγής ανανεώσιμης ενέργειας προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

1. Τα κύματα προσφέρουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [11]. Παράγονται από τους ανέμους, οι οποίοι με τη σειρά τους παράγονται από την ηλιακή ενέργεια. Ένταση ηλιακής ενέργειας μιας οριζόντιας επιφάνειας της τάξης του 0,1 - 0,3kW / m<sup>2</sup> μετατρέπεται σε μέση ένταση ροής ισχύος 2-3kW / m<sup>2</sup> κάθετου επιπέδου προς την κατεύθυνση της διάδοσης κύματος ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του νερού [14].

2. Περιορισμένες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά χρήση. Ο Thorpe [8] περιγράφει λεπτομερώς τον πιθανό αντίκτυπο και παρουσιάζει μια εκτίμηση των εκπομπών κύκλου ζωής μιας τυπικής συσκευής που λειτουργεί κοντά σε ακτές. Σε γενικές γραμμές, οι συσκευές που βρίσκονται μακριά από τις ακτές έχουν τις χαμηλότερες πιθανές επιπτώσεις.
3. Φυσική εποχική μεταβλητότητα της ενέργειας των κυμάτων, η οποία ακολουθεί τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε εύκρατα κλίματα [11].
4. Τα κύματα μπορούν να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστη απώλεια ενέργειας. Για παράδειγμα οι καταιγίδες στη δυτική πλευρά του Ατλαντικού Ωκεανού θα ταξιδέψουν στη δυτική ακτή της Ευρώπης, υποστηριζόμενες από τους δυτικούς ανέμους.
5. Αναφέρεται ότι οι συσκευές εκμετάλλευσης των κυμάτων μπορούν να παράγουν ισχύ έως και 90% του χρόνου που λειτουργούν, σε σύγκριση με περίπου το 20-30% για συσκευές αιολικής και ηλιακής ενέργειας [15, 16].

## 2.2 Προκλήσεις

Για να υλοποιηθούν τα πλεονεκτήματα που αναφέρονται παραπάνω, υπάρχουν ορισμένες τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για να αυξηθεί η απόδοση και επομένως η εμπορική ανταγωνιστικότητα των συσκευών δέσμευσης ενέργειας από τα κύματα στην παγκόσμια αγορά ενέργειας.

Μία σημαντική πρόκληση είναι η μετατροπή της αργής ( $\sim 0.1$  Hz), τυχαίας, ταλαντευόμενης και υψηλού δυναμικού κίνησης σε χρήσιμη κίνηση για την λειτουργία μιας γεννήτριας με ποιότητα εξόδου αποδεκτή από το δίκτυο κοινής ωφέλειας. Καθώς τα κύματα ποικίλλουν σε ύψος και περίοδο, τα αντίστοιχα επίπεδα ισχύος ποικίλλουν αναλόγως. Ενώ τα ακαθάριστα επίπεδα μέσης ισχύος μπορούν να προβλεφθούν εκ των προτέρων, αυτή η μεταβλητή είσοδος πρέπει να μετατραπεί σε ομαλή ηλεκτρική ισχύ και ως εκ τούτου συνήθως απαιτεί κάποιο τύπο συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ή άλλα μέσα αντιστάθμισης όπως μια σειρά συσκευών.

Επιπρόσθετα, στις υπεράκτιες περιοχές, η κατεύθυνση του κυματισμού είναι πολύ μεταβλητή και έτσι οι συσκευές κύματος πρέπει να ευθυγραμμίζονται ανάλογα ή να είναι συμμετρικές,

προκειμένου να εκμεταλλευτούν την ενέργεια του κύματος. Οι κατευθύνσεις των κυμάτων κοντά στην ακτή μπορούν να προσδιοριστούν σε μεγάλο βαθμό εκ των προτέρων λόγω των φυσικών φαινομένων διάθλασης και αντανάκλασης. Η πρόκληση της αποτελεσματικής σύλληψης αυτής της ακανόνιστης κίνησης έχει επίσης αντίκτυπο στο σχεδιασμό της συσκευής.

Για να λειτουργήσει αποτελεσματικά, η συσκευή και τα αντίστοιχα συστήματα πρέπει να ρυθμίζονται για τα πιο κοινά επίπεδα ισχύος κύματος. Γύρω από τα βρετανικά νησιά και τις δυτικές ακτές της Ευρώπης, τα πιο κοινά υπεράκτια κύματα είναι της τάξης περίπου των 30-70kW / m [17]. Ωστόσο, η συσκευή πρέπει επίσης να είναι σε θέση να αντέχει σε συνθήκες ακραίων κυμάτων που συμβαίνουν πολύ σπάνια, αλλά θα μπορούσαν να έχουν επίπεδα ισχύος άνω των 2000 kW / m. Όχι μόνο αυτό δημιουργεί δύσκολες δομικές τεχνικές προκλήσεις, αλλά παρουσιάζει επίσης μία από τις οικονομικές προκλήσεις καθώς η κανονική παραγωγή της συσκευής (και συνεπώς και τα έσοδα) θα αφορά τα συχνότερα εμφανιζόμενα κύματα, ωστόσο το κόστος κεφαλαίου της κατασκευής των συσκευών θα επηρεάζεται από την ανάγκη να αντέξει το υψηλό επίπεδο ισχύος των ακραίων, αλλά σπάνιων, κυμάτων [18]. Υπάρχουν επίσης προκλήσεις σχεδιασμού προκειμένου να μετριαστεί το περιβάλλον υψηλής διαβρωτικότητας των συσκευών που λειτουργούν στην επιφάνεια του νερού [11].

Τέλος, η εστίαση της έρευνας ποικίλει. Μέχρι στιγμής, το επίκεντρο των ερευνητών και ένα σημαντικό μέρος του δημοσιευμένου ακαδημαϊκού έργου ήταν κυρίως η επίδοση και η επιβίωση στη θάλασσα, καθώς και ο σχεδιασμός. Ωστόσο, οι μέθοδοι χρήσης της κίνησης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι διαφορετικές. Λεπτομερέστερη αξιολόγηση ενός πλήρους συστήματος είναι απαραίτητη καθώς σκοπός είναι η ανάπτυξη βελτιστοποιημένων, και αποτελεσματικότερων συστημάτων.

### **2.3 Μετατροπείς ενέργειας κυμάτων (Wave Energy Converter – WEC)**

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός σχεδίων για συσκευές που μετατρέπουν την ενέργεια των κυμάτων. Πάνω από 1000 τεχνικές μετατροπής ενέργειας κυμάτων έχουν κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στην Ιαπωνία, τη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη [11]. Παρά τις μεγάλες διαφορές στο σχεδιασμό, οι WEC (wave energy converter) κατηγοριοποιούνται γενικά ανάλογα με τη θέση και τον τύπο.

### 2.3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την θέση

Οι συσκευές δέσμευσης ενέργειας κυμάτων με βάση την θέση, διαχωρίζονται σε αυτές που βρίσκονται κοντά στις ακτές και στις υπεράκτιες.

Οι συσκευές που τοποθετούνται κοντά στην ακτή έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι κοντά στο δίκτυο κοινής ωφέλειας, είναι εύκολο να συντηρηθούν και καθώς τα κύματα εξασθενούν καθώς περνούν μέσα από ρηγά νερά έχουν μειωμένη πιθανότητα να υποστούν βλάβη σε ακραίες συνθήκες. Αυτό βέβαια οδηγεί σε ένα από τα μειονεκτήματα των συσκευών που τοποθετούνται κοντά στην ακτή, καθώς το ρηχό νερό οδηγεί σε χαμηλότερη ενέργεια κύματος (αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί εν μέρει από θέσεις όπου υπάρχει εκ φύσεως συγκέντρωση ενέργειας [11]).

Το ύψος της παλίρροιας μπορεί επίσης να είναι ένα ζήτημα. Επιπλέον υπάρχουν γενικά ειδικές απαιτήσεις για την εκάστοτε περιοχή, συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας και της γεωλογίας των ακτών, και της διαφύλαξη των παράκτιων τοπίων, γεγονός το οποίο καθιστά πολύ δύσκολο τον σχεδιασμό συσκευών για μαζική παραγωγή. Οι συσκευές που βρίσκονται κοντά σε ακτές ορίζονται ως συσκευές που βρίσκονται σε σχετικά ρηγά νερά (υπάρχει έλλειψη συναίνεσης για αυτό που ορίζει τα "ρηγά" ύδατα, αλλά έχει προταθεί ότι αυτό θα μπορούσε να είναι βάθος μικρότερο από το ένα τέταρτο του μήκους κύματος [9]). Συσκευές σε αυτή τη θέση συνδέονται συχνά με τον πυθμένα, που δίνει μια κατάλληλη σταθερή βάση πάνω στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ένα ταλαντευόμενο σώμα.

Οι υπεράκτιες συσκευές είναι γενικά σε βαθιά νερά, αν και πάλι δεν υπάρχει συμφωνία για το τι συνιστά «βαθύ» νερό. "Δεκάδες μέτρα" είναι ένας ορισμός [10], με "μεγαλύτερα από 40 μέτρα" [9] και "βάθος που υπερβαίνει το ένα τρίτο του μήκους κύματος" [14] είναι άλλοι. Το πλεονέκτημα της τοποθεσίας μιας τέτοιας συσκευής σε βαθιά ύδατα είναι ότι μπορεί να συγκεντρώνει μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας λόγω της υψηλότερης ενεργειακής περιεκτικότητας που υπάρχει εκεί [9]. Ωστόσο, οι υπεράκτιες συσκευές είναι πιο δύσκολο να κατασκευαστούν και να συντηρηθούν, και λόγω του μεγαλύτερου ύψους κύματος και του ενεργειακού δυναμικού στα κύματα, πρέπει να σχεδιαστούν για να επιβιώσουν στις πιο ακραίες συνθήκες που προσθέτουν επιπλέον κόστος στην κατασκευή.



Είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι η ενέργεια κυμάτων εμφανίζεται στις κινήσεις του νερού κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας [10]. Μέχρι το 95% της ενέργειας σε ένα κύμα βρίσκεται μεταξύ της επιφάνειας του νερού και του ενός τετάρτου ενός μήκους κύματος κάτω από αυτό [9].

### 2.3.2 Κατηγοριοποίηση συσκευών με βάση τον τύπο

Παρά τις μεγάλες διαφορές στα σχέδια και τις έννοιες, οι WEC μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κυρίαρχους τύπους.

➤ Συσκευή υποβιβασμού (*Attenuator*) (A)

Οι συσκευή υποβιβασμού (εξασθένησης) βρίσκονται παράλληλα με την κυρίαρχη κατεύθυνση του κύματος. Ένα παράδειγμα ενός WEC τύπου *Attenuator* είναι το σύστημα Pelamis, που αναπτύχθηκε από την Ocean Power Delivery Ltd (τώρα γνωστή ως Pelamis Wave Power [19]).

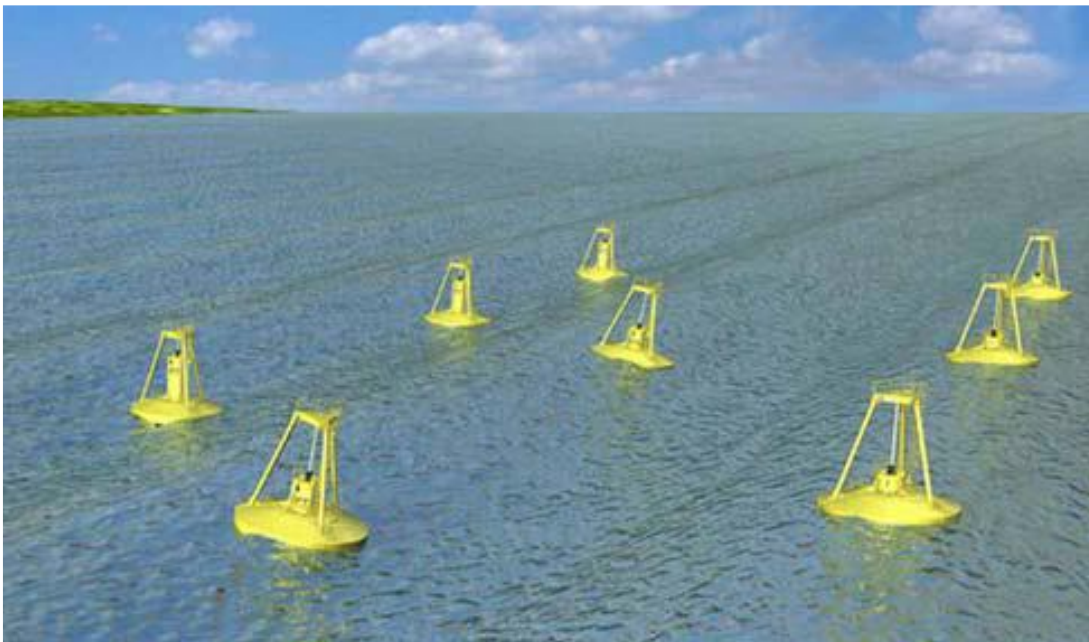
Η εικόνα 11 δείχνει την καλλιτεχνική απεικόνιση ενός συστήματος Pelamis.



Εικ. 11 Συσκευή υποβιβασμού Pelamis [21]

➤ Απορροφητής σημείου (*Point absorber (B)*)

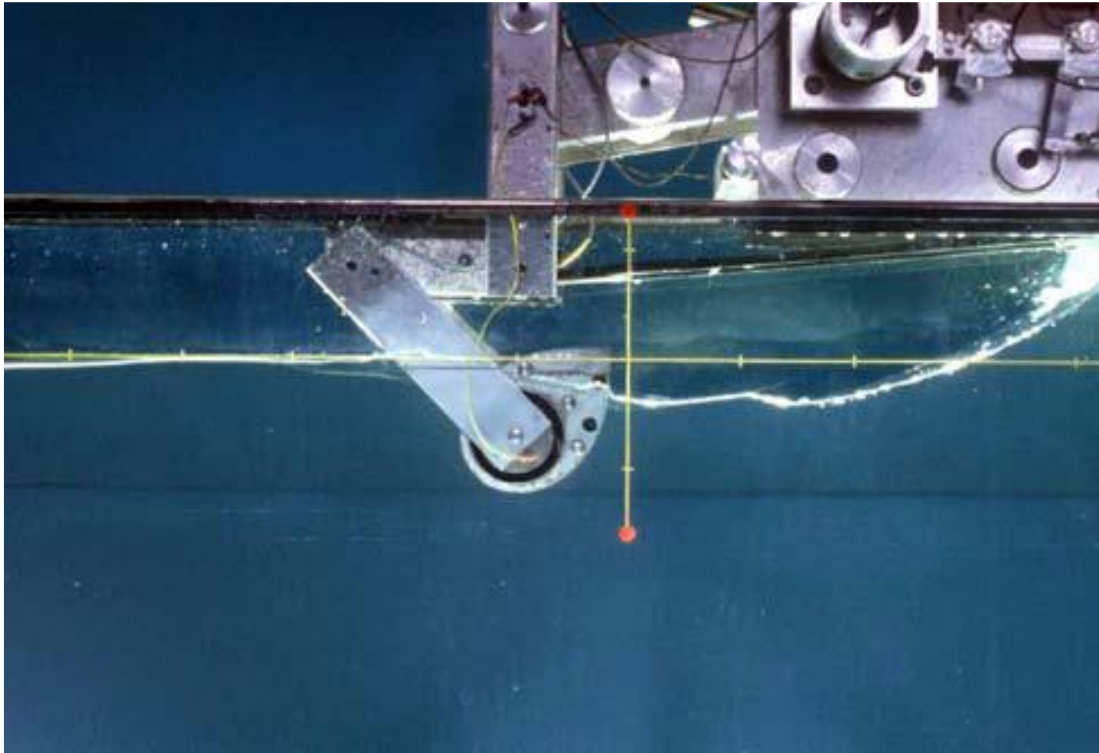
Ο απορροφητής σημείου είναι μια συσκευή που έχει μικρές διαστάσεις σε σχέση με το μήκος του προσπίπτοντος κύματος. Μπορεί να είναι επιπλέουσες δομές που ανεβαίνουν πάνω και κάτω στην επιφάνεια του νερού ή παραμένουν βυθισμένες κάτω από την επιφάνεια και στηρίζονται στη διαφορά πίεσης. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, η κατεύθυνση κύματος δεν είναι σημαντική για αυτές τις συσκευές. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα σημειακών απορροφητών, ένα από τα οποία είναι το Powerbuoy της Ocean Power Technology [20]. Η εικόνα 12 δείχνει την καλλιτεχνική απεικόνιση του ανωτέρω συστήματος.



**Εικ. 12** Απορροφητής σημείου: OPT Powerbuoy [22]

➤ Terminator (*C*)

Οι συσκευές Terminator έχουν τον κύριο άξονά τους παράλληλο προς το εμπρόσθιο κύμα (κάθετο προς την κυρίαρχη κατεύθυνση κύματος) και φυσικά ανακόπτουν τα κύματα. Ένα παράδειγμα WEC τύπου Terminator είναι το Salter's Duck, που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου, όπως φαίνεται στη εικόνα 13.



**Εικ. 13** Συσκευή Terminator: Salter's Duck [23]

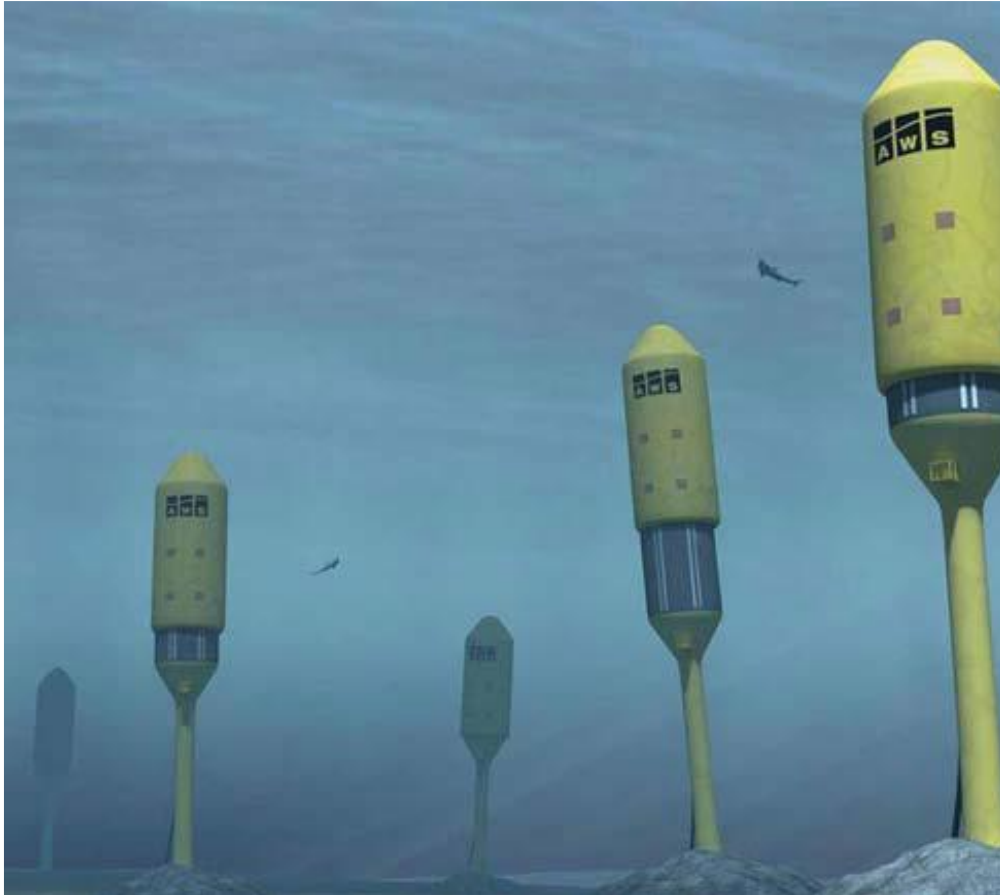
## **2.4 Μέθοδοι λειτουργίας**

Εντός των κατηγοριών που προσδιορίστηκαν παραπάνω, υπάρχει ένα περαιτέρω επίπεδο ταξινόμησης των συσκευών, που καθορίζεται από τον τρόπο λειτουργίας τους. Μερικά σημαντικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω.

### **2.4.1 Υποθαλάσσιες συσκευές που βασίζονται στην διαφορά πίεσης**

Η υποθαλάσσιες συσκευές που βασίζονται στην διαφορά πίεσης είναι ένας απορροφητής σημείου βυθού που χρησιμοποιεί τη διαφορά πίεσης πάνω από τη συσκευή μεταξύ κορυφών κύματος και κοιλοτήτων. Περιλαμβάνει δύο βασικά μέρη: ένα σταθερό θαλάσσιο κυλινδρικό θάλαμο γεμάτο αέρα με κινητό άνω κύλινδρο. Καθώς η κορυφή περνά πάνω από τη συσκευή, η πίεση του νερού πάνω από τη συσκευή συμπιέζει τον αέρα μέσα στον κύλινδρο, μετακινώντας τον ανώτερο κύλινδρο προς τα κάτω. Καθώς περνάει μια κοιλότητα, η πίεση του νερού στη συσκευή μειώνεται και ο ανώτερος κύλινδρος ανεβαίνει. Ένα πλεονέκτημα αυτής της συσκευής είναι ότι, δεδομένου ότι είναι πλήρως βυθισμένο, δεν εκτίθεται στις επικίνδυνες δυνάμεις που υφίστανται οι επιπλέουσες συσκευές [24] και μειώνει την οπτική επίδραση της

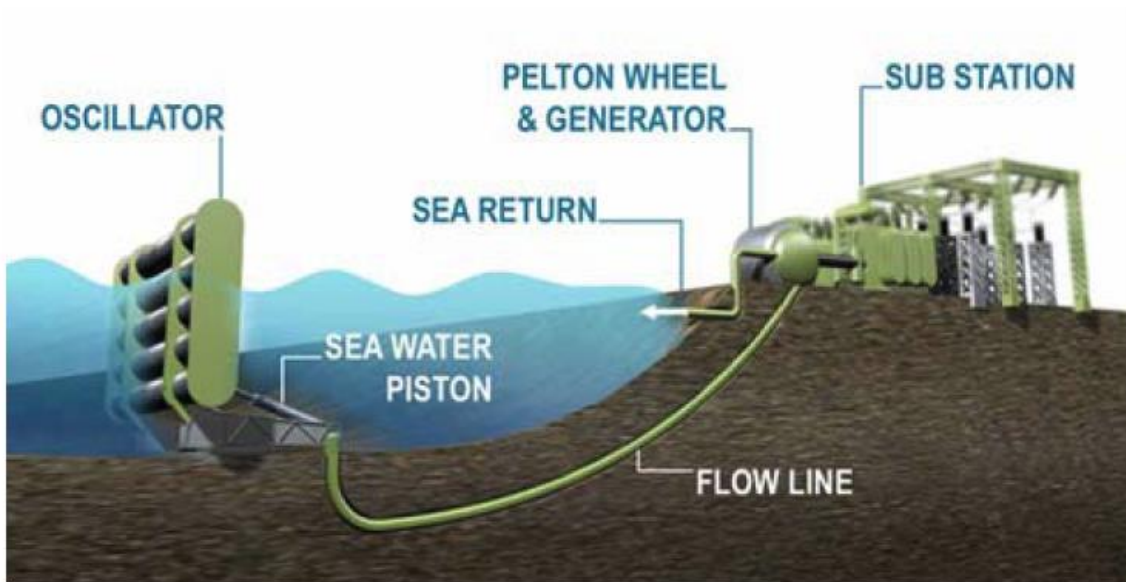
συσκευής. Ωστόσο, η συντήρηση της συσκευής αποτελεί πιθανό ζήτημα. Λόγω του τμήματος της συσκευής που συνδέεται με τη θάλασσα, αυτές οι συσκευές βρίσκονται συνήθως κοντά στην ακτή. Ένα παράδειγμα αυτής της συσκευής είναι η Archimedes Wave Swing (Εικ. 14 )



**Εικ. 14** Υποθαλάσσια συσκευή που βασίζεται στην διαφορά πίεσης: The Archimedes Wave Swing [25]

#### **2.4.2 Μετατροπείας ταλάντωσης ύψους κύματος**

Ένας μετατροπείας ταλάντωσης ύψους κύματος αποτελείται γενικά από έναν αρθρωτό εκτροπέα, τοποθετημένο κάθετα στην κατεύθυνση του κύματος , ο οποίος κινείται εμπρός και πίσω εκμεταλλευόμενος την οριζόντια ταχύτητα των σωματιδίων του κύματος. Ένα παράδειγμα είναι το Oyster Power Aquamarine [26], μια συσκευή που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια, όπου η κορυφή του εκτροπέα είναι πάνω από την επιφάνεια του νερού και στρέφεται παράλληλα σε σχέση με τον βυθό της θάλασσας. Ένα πρωτότυπο αυτής της συσκευής έχει κατασκευαστεί. Η εικόνα 15 απεικονίζει τη συσκευή.



Εικ. 15 Μετατροπέας ταλάντωσης ύψους κύματος: Aquamarine Power Oyster [27]

### 2.4.3 Ταλαντευόμενη στήλη νερού (Oscillating water column - OWC)

Ένα σύστημα OWC αποτελείται από ένα θάλαμο με άνοιγμα προς τη θάλασσα κάτω από την ίσαλο γραμμή. Καθώς πλησιάζουν τα κύματα στη συσκευή, το νερό εξαναγκάζεται μέσα στο θάλαμο, ασκώντας πίεση στον αέρα μέσα στο θάλαμο. Αυτός ο αέρας διαφεύγει στην ατμόσφαιρα μέσω ενός στρόβιλου. Καθώς το νερό υποχωρεί, τότε εισέρχεται αέρας μέσα από τον στρόβιλο. Ένας στρόβιλος Wells χαμηλής πίεσης χρησιμοποιείται συχνά σε αυτή την εφαρμογή καθώς περιστρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την κατεύθυνση ροής, αφαιρώντας την ανάγκη να διορθωθεί η ροή του αέρα. Έχει προταθεί ότι ένα από τα πλεονεκτήματα της ιδέας του OWC είναι η απλότητα και η αποτελεσματικότητά του [9].

Ένα παράδειγμα τέτοιας συσκευής τοποθετημένης κοντά σε ακτή είναι το Wavegen Limpet. Η συσκευή έχει εγκατασταθεί στο νησί Islay της Δυτικής Σκωτίας και παράγει ενέργεια για το εθνικό δίκτυο. Η εικόνα 16 δείχνει το σχέδιο του Limpet. Η ιδέα του OWC έχει επίσης προταθεί από την Oceanlinx, έναν αυστραλιανό ενεργειακό πάροχο [28].





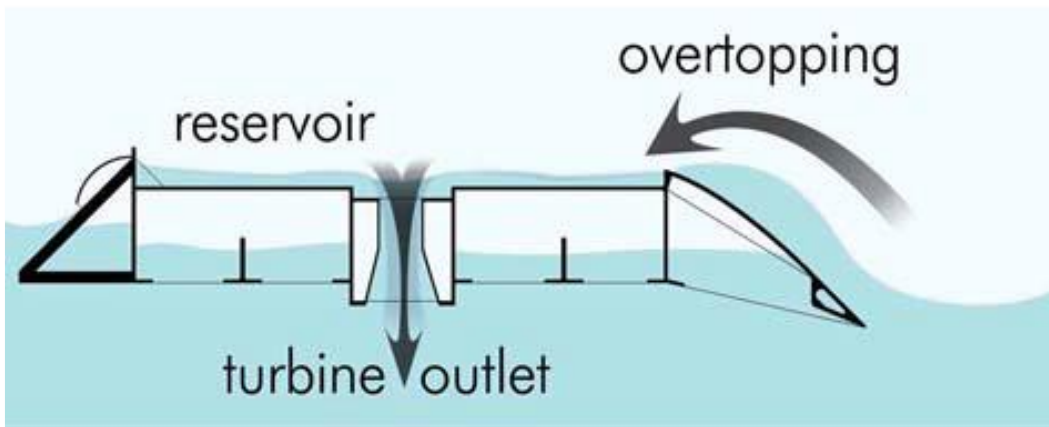
Εικ. 16 OWC: The Limpet [29]

#### 2.4.4 Συσκευές υπερπλήρωσης

Μια συσκευή υπερπλήρωσης συλλαμβάνει το θαλάσσιο νερό των κυμάτων σε μια δεξαμενή πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, στη συνέχεια απελευθερώνει το νερό πίσω στη θάλασσα μέσω των στροβίλων. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας συσκευής είναι το Wave Dragon, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 17. Αυτή η συσκευή χρησιμοποιεί ένα ζευγάρι από μεγάλους καμπύλους ανακλαστήρες για να συγκεντρώσει κύματα στο κεντρικό τμήμα υποδοχής, όπου ρέουν πάνω σε μια ράμπα και πάνω από την κορυφή σε ένα ανυψωμένο δεξαμενή, από την οποία επιτρέπεται στο νερό να επιστρέφει στη θάλασσα μέσω ενός αριθμού στροβίλων.



(a)



(b)

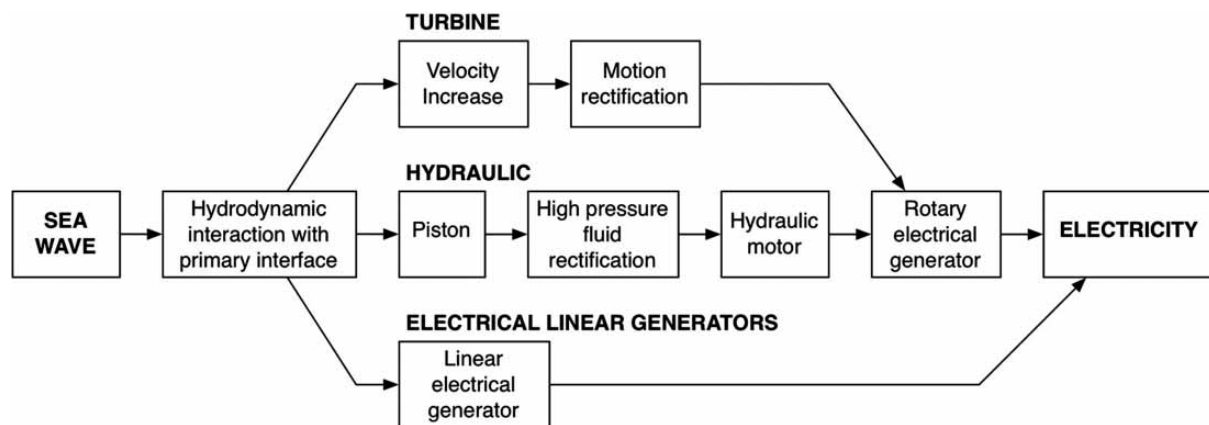
Εικ. 17 Συσκευές υπερπλήρωσης : The Wave Dragon [30,31]

## 2.5 Μέθοδοι δέσμευσης της ενέργειας

Η μέθοδοι δέσμευσης ενέργειας ποικίλλουν από συσκευή σε συσκευή αλλά η γενική μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω συμβατικών περιστροφικών ηλεκτρικών γεννητριών υψηλής ταχύτητας [32]. Μία από τις μείζονες προκλήσεις των WECs αφορά την τροφοδότηση αυτών των γεννητριών. Οι συσκευές που περιεγράφηκαν παραπάνω δεν είναι

άμεσα συμβατές με τις συμβατικές περιστροφικές ηλεκτρικές μηχανές και απαιτείται ένα σύστημα μετάδοσης για τη διασύνδεση του WEC με την ηλεκτρική γεννήτρια [24].

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά διάφοροι τύποι περιστροφικών γεννητριών, και ακολούθως γίνεται μια επισκόπηση των διαφορετικών μεθόδων μεταφοράς ενέργειας. Γίνεται αναφορά στην μεταφορά ενέργειας μέσω στροβίλων, στις υδραυλικές μεθόδους μετατροπής. Αυτοί οι διαφορετικοί μηχανισμοί παρουσιάζονται στην εικόνα 18.



**Εικ. 18** Μηχανισμοί μετατροπής ενέργειας προερχόμενη από κύματα.

### 2.5.1 Περιστροφικές γεννήτριες

Οι παραδοσιακοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες (SGs) και λειτουργούν με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, που ταιριάζει με τη συχνότητα της σύνδεσης στο δίκτυο. Ανάλογα με το σύστημα μετατροπής, οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται για ενέργεια προερχόμενη κύματα ίσως χρειαστεί να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της μεταβλητής ταχύτητας.

Ο O'Sullivan και ο Lewis [33] συζητούν αυτές τις επιλογές γεννητριών όσον αφορά την καταλληλότητα για μια εφαρμογή OWC, εξετάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που αφορούν τις περιβαλλοντικές και ηλεκτρικές πτυχές αλλά και τους συντελεστές κόστους χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο MATLAB. Οι γεννήτριες σε συσκευές OWC λειτουργούν συνήθως με μεταβλητή ταχύτητα. Υπάρχουν ομοιότητες σε αυτήν την εφαρμογή με τις ώριμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες είναι πιθανόν υποψήφιες για χρήση σε συσκευές OWC.



Οι μελέτες του O'Sullivan και Lewis καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι σύγχρονες γεννήτριες SG, είναι η προτιμώμενη επιλογή λόγω της καλύτερης ενεργειακής απόδοσης, του βάρους και της δυνατότητας ελέγχου, παρά την απαίτηση για έναν μετατροπέα πλήρους συχνότητας μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου.

### **2.5.2 Τύπος γεννητριών με στρόβιλο**

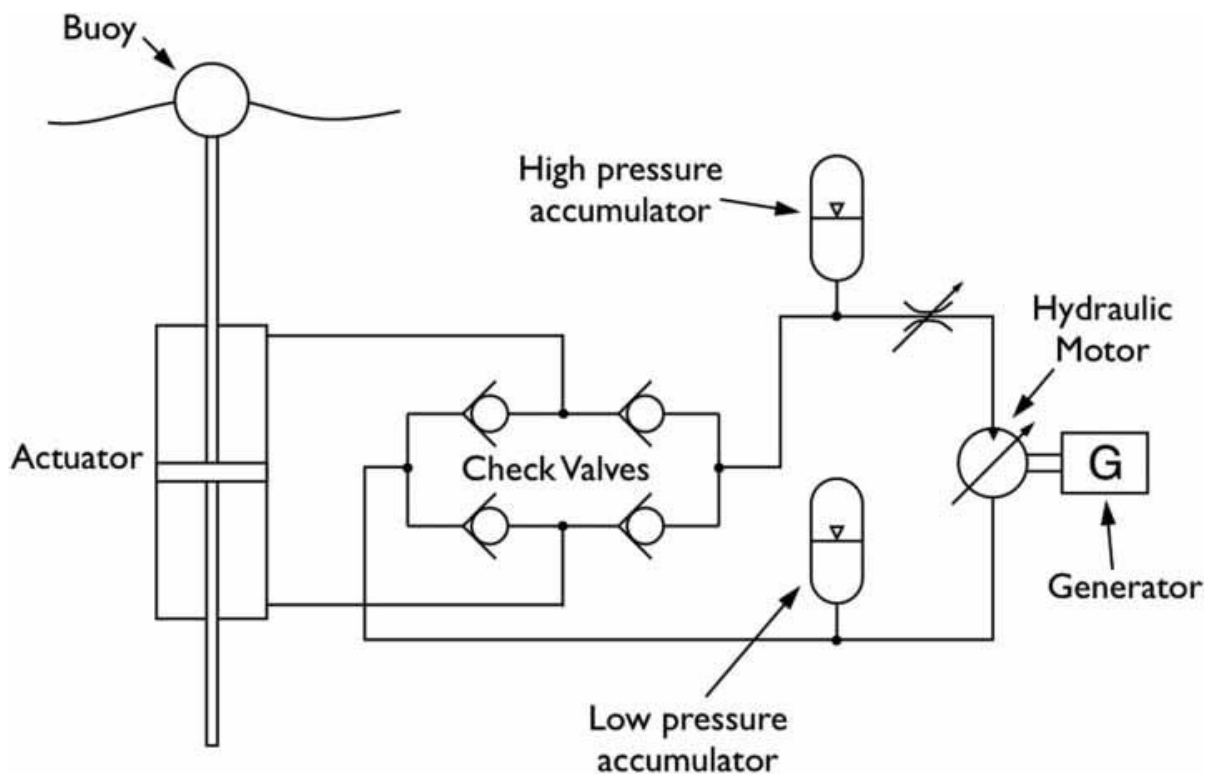
Στις γεννήτριες οι οποίες που χρησιμοποιούν στρόβιλους η ροή του ρευστού (είτε θαλάσσιο νερό είτε αέρα) οδηγεί έναν στρόβιλο, ο οποίος συνδέεται άμεσα με μια γεννήτρια. Οι τύποι συσκευών που χρησιμοποιούν αυτές τις γεννήτριες περιλαμβάνουν τις συσκευές OWC και τις συσκευές υπερπλήρωσης.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι απαιτήσεις για γεννήτριες σε OWCs, όπως πχ η μεταβλητή ταχύτητα εισόδου, είναι παρόμοιες με εκείνες μιας ανεμογεννήτριας και έτσι έχουν ερευνηθεί καλά (για παράδειγμα, [34] έως [36]). Το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης θαλάσσιων στρόβιλων είναι ότι η διαρροή υγρών δεν προκαλεί περιβαλλοντικά προβλήματα. Το μειονέκτημα είναι ότι το θαλάσσιο νερό είναι ένα πολύπλοκο υγρό με διάφορα απρόβλεπτα συστατικά. Επιπλέον, σε συσκευές που βρίσκονται κοντά, τα σωματίδια θα μπορούσαν να βλάψουν τα διάφορα εξαρτήματα του στρόβιλου. Η σπηλαιώση θα μπορούσε επίσης να είναι ένα πρόβλημα, εκτός αν ο στρόβιλος βρίσκεται σε βαθιά νερά για να διατηρεί θετική πίεση. Σε καταστάσεις χαμηλής πίεσης, που δοκιμάζονται σε συσκευές υπερπλήρωσης, χρησιμοποιούνται συχνά στρόβιλοι τύπου προπέλας, όπως ο σχεδιασμός Kaplan. Η χρήση του αέρα ως εργαζόμενο μέσο έχει το πλεονέκτημα ότι αυξάνει τις αργές ταχύτητες των κυμάτων σε υψηλό ρυθμό ροής αέρα. Ο πιο δημοφιλής σχεδιασμός αεροστρόβιλου είναι ο στρόβιλος Wells, λόγω της ικανότητάς του να περιστρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της ροής του αέρα.

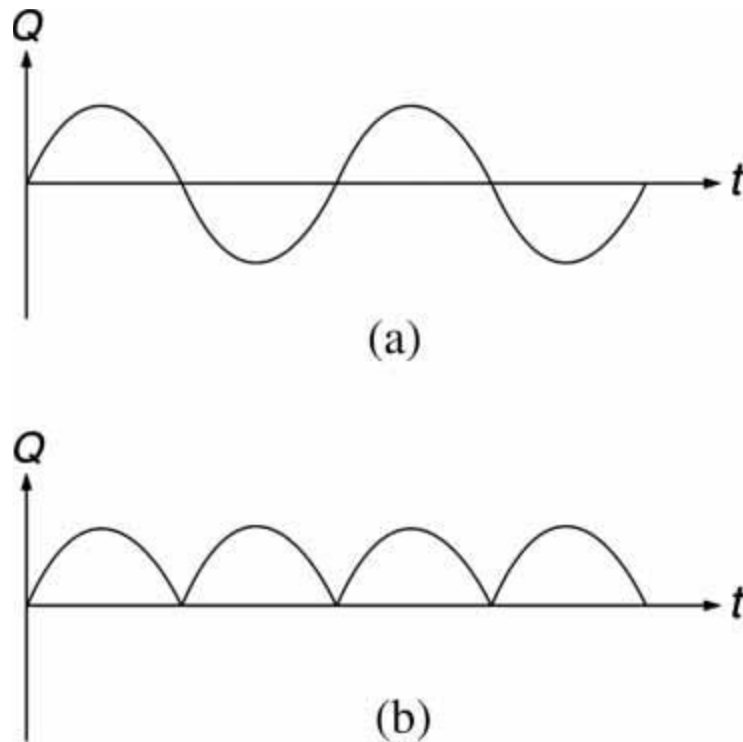
Τα εγγενή μειονεκτήματα περιλαμβάνουν χαμηλή απόδοση (περίπου 60-65% [37, 38]), κακή εκκίνηση, υψηλό θόρυβο και υψηλή αξονική ώθηση σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς στρόβιλους [39]. Ο έλεγχος των πτερυγίων του στρόβιλου μπορεί να αυξήσει την απόδοση [40].

### 2.5.3 Υδραυλική μέθοδος δέσμευσης

Μια άλλη μέθοδος μετατροπής της αργής ταλάντωσης που προκύπτει από τα κύματα είναι η χρήση ενός υδραυλικού συστήματος. Τα κύματα εφαρμόζουν μεγάλες δυνάμεις σε χαμηλές ταχύτητες και τα υδραυλικά συστήματα είναι κατάλληλα για την απορρόφηση της ενέργειας σε αυτές τις περιπτώσεις [41]. Η εικόνα 19 είναι ένα διάγραμμα για ένα βασικό υδραυλικό σύστημα PTO για ένα WEC. Η ράβδος του υδραυλικού κυλίνδρου ωθείται προς τα πάνω και προς τα κάτω από έναν πλωτήρα, ο οποίος οδηγεί το ρευστό μέσω των βαλβίδων ελέγχου, διορθώνοντας τη ροή, σε έναν υδραυλικό κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση, η γεννήτρια θα μπορούσε να είναι μια συσκευή σταθερής ταχύτητας και ο υδραυλικός κινητήρας έχοντας μεταβλητή χωρητικότητα, μπορεί να οδηγεί τη γεννήτρια κοντά σε σταθερή ταχύτητα παρά τη μεταβλητή παροχή. Ο έλεγχος της χωρητικότητας του κινητήρα θα μπορούσε να βασίζεται σε μετρημένες ή προβλεπόμενες θαλάσσιες καταστάσεις γύρω από το WEC ή σε μετρήσεις ροής ρευστού εντός του συστήματος. Επιπλέον, μια βαλβίδα στραγγαλισμού θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ροής προς τον κινητήρα. Οι συσσωρευτές περιλαμβάνονται στο κύκλωμα για την αποθήκευση ενέργειας και τη διατήρηση σταθερής ροής στον υδραυλικό κινητήρα. Επιπλέον, ο συσσωρευτής χαμηλής πίεσης παρέχει μια μικρή πίεση ώθησης για τη μείωση του κινδύνου σπηλαίωσης στην πλευρά χαμηλής πίεσης.



Εικ. 19 Τυπικό υδραυλικό σκαρίφημα για WEC



**Εικ 20** Διάγραμμα ροής χρόνου για υδραυλικές συσκευές WEC

Υπάρχουν ορισμένες τεχνολογικές προκλήσεις που συνδέονται με τα υδραυλικά συστήματα μετατροπής σε συστήματα WEC. Αυτά περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

➤ *Περιορισμός υδραυλικών υγρών*

Ο περιορισμός των υδραυλικών υγρών έχει μεγάλη σημασία, όπως επίσης και η αποτροπή της εισόδου του θαλάσσιου νερού στον χώρο των υδραυλικών υγρών. Το πρόγραμμα Wave Energy του Υπουργείου Εμπορίου και Βιομηχανίας του Ηνωμένου Βασιλείου (DTI) χρηματοδότησε μια έκθεση για την ανασκόπηση της τρέχουσας κατάστασης των τεχνολογιών ενεργειακών κυμάτων [42]. Η έκθεση αυτή υπογράμμισε το περιορισμό του ρευστού ως ένα μείζον ζήτημα για την λειτουργία αυτών των συστημάτων και έκανε μια σύσταση να διερευνηθεί η ανάπτυξη υδραυλικών συστημάτων με βάση το νερό ή άλλο περιβαλλοντικά αποδεκτό ρευστό. Οι κατευθυντήριες οδηγίες σχετικά με το σχεδιασμό και τη λειτουργία των WEC [43] δείχνουν ότι ο περιορισμός του υδραυλικού υγρού αποτελεί το πρωταρχικό μέλημα για το υδραυλικό σύστημα. Υπάρχουν διάφορα εναλλακτικά βιοαποικοδομήσιμα υγρά, αλλά το καθένα παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επιπλέον, πρέπει να εξασφαλιστεί η συμβατότητα των υγρών με τα εξαρτήματα και τα στεγανοποιητικά. Η χρήση θαλάσσιου νερού ως εργαζόμενου μέσου μπορεί να είναι η πιο φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος, αλλά

υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά τη διαρροή, τη στεγανοποίηση, τη θερμοκρασία, την πίεση, την ταχύτητα, το μέγεθος, τη βιολογική ανάπτυξη, τη λίπανση και τη διάβρωση. Το Pelamis WEC χρησιμοποιεί υδραυλικό υγρό που είναι βιοαποικοδομήσιμο στο θαλάσσιο περιβάλλον.

#### ➤ *Στεγανοποίηση*

Το θέμα της στεγανοποίησης συνδέεται με το περιορισμό του υδραυλικού ρευστού που αναφέρθηκε παραπάνω. Οι τυποποιημένες στεγανοποιητικές διατάξεις σχεδιάζονται για να λειτουργούν με ταχύτητες μικρότερες από τις τυπικές των συστημάτων WEC [32]. Η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από την τριβή στα κινούμενα μέρη αποτελεί σοβαρό παράγοντα για τη φθορά της στεγανοποίησης. Η διάρκεια ζωής της στεγανοποίησης συνδέεται αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα, την απόσταση και το μήκος της εφαρμογής της, η οποία με τη σειρά της έχει αντίκτυπο στις απαιτήσεις συντήρησης.

#### ➤ *Αποδοτικότητα*

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος PTO είναι ζωτικής σημασίας για την ικανότητα δέσμευσης της ενέργειας της συσκευής. Τα παραδοσιακά υδροστατικά κιβώτια τείνουν να χρησιμοποιούν συζευγμένες αντλίες μετατόπισης και κινητήρες, οι οποίες έχουν ιδανικό σημείο λειτουργίας και μέγιστη απόδοση περίπου 80%. Μακριά από αυτό το ιδανικό σημείο λειτουργίας, η απόδοση πέφτει. Οι απώλειες σε μειωμένο φορτίο (συμπεριλαμβανομένου της ιξώδους τριβής, της διαρροής και της συμπίεστικότητας) είναι σημαντικές. Αν και το υδραυλικό σύστημα μπορεί να έχει υψηλή απόδοση, είναι λογικό ότι η συσκευή θα περάσει το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου λειτουργίας σε ένα κλάσμα αυτής της απόδοσης και επομένως πρέπει να έχει υψηλότερη απόδοση σε μερικά φορτία [44]. Η έκθεση DTI [42] υπογραμμίζει επίσης το ζήτημα της αποδοτικότητας του υδραυλικού συστήματος, συνιστώντας ότι οι εργασίες πρέπει να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη αποκλειστικών υδραυλικών κινητήρων με χαμηλές απώλειες σε μερικό φορτίο και αντλίες υψηλής ροπής. Επιπλέον, οι βαλβίδες ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση της ροής και η βαλβίδα στραγγαλισμού για τον έλεγχο της ροής, έχουν πτώσεις πίεσης που συνδέονται με τα ανοίγματα τους, οδηγώντας σε απώλεια ισχύος και μειωμένη απόδοση.

### ➤ *Συντήρηση*

Η εκτέλεση συντήρησης στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι δαπανηρή, χρονοβόρα και ενέχει πολλούς κινδύνους. Σε ένα σύστημα υδραυλικής μετατροπής, είναι πιθανό να υπάρχουν διάφορα στάδια μεταξύ της κύριας διασύνδεσης και της ηλεκτρικής γεννήτριας, το καθένα από τα οποία περιλαμβάνει κινούμενα μέρη και συνεπώς ενδεχομένως να απαιτεί συντήρηση. Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιείται η απαιτούμενη συντήρηση, κατά προτίμηση απαιτώντας μόνο επιθεώρηση ετησίως ή και περισσότερο [42]. Επιπλέον, οι μεταλλικές επιφάνειες και τα εξαρτήματα πρέπει να προστατεύονται από τη διάβρωση λόγω του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Οι κεραμικές επικαλύψεις (όπως το Ceramax, κατασκευασμένο από τη Bosch Rexroth) προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο προστασίας των εξαρτημάτων τα οποία βρίσκονται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό. Μία μέθοδος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης (και ενδεχομένως να μειώσει τη δυνατότητα διαρροής από υδραυλικές συσκευές) θα ήταν η τοποθέτηση του υδραυλικού συστήματος PTO στην ακτή. Αυτό έχει λάβει περιορισμένο ενδιαφέρον εξαιτίας των μεγάλων, δαπανηρών και αναποτελεσματικών σωληνώσεων που απαιτούνται για τη μεταφορά του υγρού από τη συσκευή που βρίσκεται μακριά από την ακτή ή πλησίον στην ακτή και τη σχετική σημαντική απώλεια ισχύος.

### ➤ *Αποθήκευση ενέργειας*

Κάποια μορφή αποθήκευσης ενέργειας θα πρέπει να ενσωματώνεται συνήθως σε ένα σύστημα PTO, καθώς οι διακυμάνσεις της απορροφούμενης ισχύος από τα κύματα θα έχουν ως αποτέλεσμα την μεταβλητή ηλεκτρική ισχύ εξόδου, η οποία είναι ακατάλληλη για το ηλεκτρικό δίκτυο [45]. Οι συσσωρευτές μπορούν να λειτουργήσουν ως βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας σαν μέρος του υδραυλικού συστήματος. Με την αποθήκευση ενέργειας, οι συσσωρευτές θα βοηθούσαν το σύστημα να αντιμετωπίσει το υψηλό επίπεδο διακύμανσης, μειώνοντας το κόστος κεφαλαίου και τις απώλειες ισχύος όλων των επακόλουθων στοιχείων του συστήματος κίνησης [40].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Δέσμευση ενέργειας από κύματα με χρήση ταλαντευόμενων πτερυγίων (flapping foils)

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ανάγκη που έχει προκύψει στην σύγχρονη εποχή για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει προκαλέσει την στρέψη του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας και στην δέσμευση της ενέργειας των κυμάτων. Η πλειονότητα των υπαρχόντων σχεδίων για συσκευές παλιρροϊκής ενέργειας χρησιμοποιούν είτε μετατροπείς ενέργειας με οριζόντιο άξονα είτε κατακόρυφα άξονα με βάση τον στρόβιλο.

Αυτές οι συσκευές, που λειτουργούν μεμονωμένα και σε συστοιχίες, παρουσιάζουν πολλές προκλήσεις που σχετίζονται με την οικονομική και τεχνική βιωσιμότητα καθώς και με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις [89],[61], [67].

Τα υδρόβια ζώα, καθώς και τα έντομα και τα πτηνά, εκμεταλλεύονται έναν διαφορετικό κινητικό μηχανισμό στη μετακίνηση. Αντί για περιστροφικές έλικες, αυτά τα ζώα χρησιμοποιούν ταλαντευτικές κινήσεις με πτερύγια ή φτερά για να επιτύχουν εξαιρετικά αποτελεσματική πρόωση και ελιγμούς [87]. Παραδείγματος χάριν, ο τόνος, το δελφίνι και ο καρχαρίας παρουσιάζουν εξαιρετικές υδροδυναμικές επιδόσεις με υψηλή ταχύτητα πλευσης, υψηλή απόδοση και χαμηλό θόρυβο μέσω της κίνησης των ουραίων πτερυγίων τους. Επιπλέον, μέσω αυτών των ταλαντευτικών κινήσεων είναι δυνατή η εξαγωγή ενέργειας από τις εισερχόμενες στροβιλές ή τις ασταθείς ροές.

Αρκετές συσκευές συλλογής ενέργειας εμπνευσμένες από τη βιολογία βασισμένες στις κινήσεις ταλάντωσης πτερυγίων έχουν αναπτυχθεί στο πέρασμα των χρόνων. Μια πρώιμη ιδέα είναι ότι ένα ταλαντευόμενο πτερύγιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαγάγει ενέργεια από τα ασταθή πεδία ροής που παράγονται από κύματα ελεύθερης επιφάνειας [90], [91]. Πράγματι, και στα δύο πειράματα και στις θεωρητικές αναλύσεις ανακαλύφθηκε ότι ένα πτερύγιο βυθισμένο ακριβώς κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια θα μπορούσε να προωθηθεί προς τα εμπρός χρησιμοποιώντας την ενέργεια από τα εισερχόμενα κύματα ([90], [56], [53]) . Η εφαρμογή φτερωτών πτερυγίων για την εξαγωγή ενέργειας από ομοιόμορφες ροές προτάθηκε αρχικά από τους [74]. Με την αυξανόμενη σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το ενδιαφέρον για αυτή τη νέα ιδέα αναζωπυρώθηκε τα τελευταία χρόνια. Ένα αξιοσημείωτο

φαινόμενο είναι η συμμετοχή της βιομηχανίας στην ανάπτυξη πρωτότυπων πλήρους κλίμακας, συμπεριλαμβανομένων, π.χ. το Oscillating Marine Current Energy Converter που αναπτύχθηκε αρχικά από την The Engineering Business Ltd. (Τεχνική Έκθεση Τεχνικών Επιχειρήσεων Ltd., 2002, 2003, 2005) και βελτιώθηκε περαιτέρω από την Pulse Tidal Ltd. (<http://www.pulsetidal.com>).

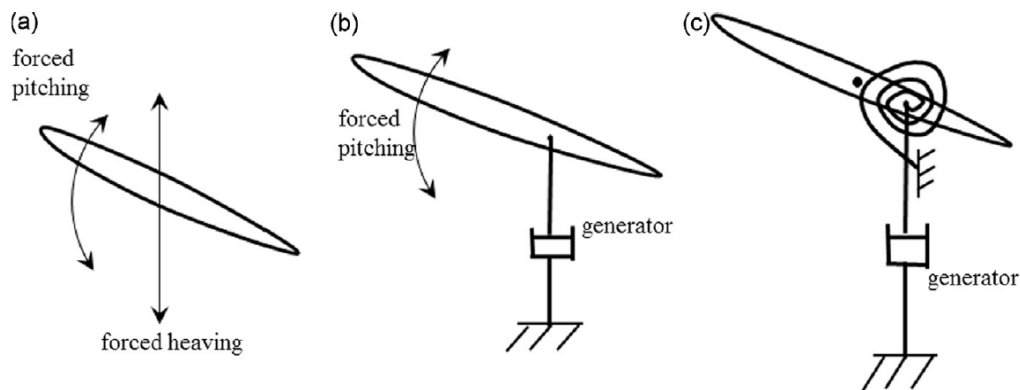
Σε αντίθεση με τους συμβατικούς στροβίλους, υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα τέτοιων βιο-εμπνευσμένων μετατροπέων ενέργειας:

- (i) Είναι φιλικά προς το περιβάλλον όσον αφορά την παραγωγή θορύβου λόγω της σχετικά χαμηλής ταχύτητάς τους, μειώνοντας έτσι τις επιπτώσεις στην ναυσιπλοΐα των υδρόβιων ζώων
- (ii) Χωρίς την φυγοκεντρική τάση που σχετίζεται με τα περιστρεφόμενα πτερύγια, οι ταλαντευόμενες διατάξεις είναι δομικά πιο ανθεκτικές.
- (iii) Τα ταλαντευόμενα συστήματα πτερυγίων σαρώνουν μια ορθογώνια διατομή ροής. Η περιοχή σάρωσης για μία μόνο συσκευή μπορεί έτσι να είναι ευρεία και ρηχή, επιτρέποντας την εγκατάσταση μεγάλων συστημάτων σε ρηγά νερά.

Στη συνέχεια, μπορούν να προβλεφθούν συσκευές πολλών μεγαβάτ για ένα ευρύτερο φάσμα περιοχών πηγών παλιρροιακών ρευμάτων. Με την ταχεία ανάπτυξη τέτοιων συσκευών, απαιτείται η κατανόηση της υποκείμενης φυσικής τους, συμπεριλαμβανομένης της δυναμικής ρευστού, των αλληλεπιδράσεων ρευστού-δομής και της συζευγμένης δυναμικής του μη γραμμικού συστήματος, προκειμένου να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα των υφιστάμενων συσκευών και να ανοίξει ο δρόμος για την ανάπτυξη νέων συστημάτων που θα είναι εμπορικά κερδοφόρα. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα σχετικά με τη δυναμική των ταλαντευόμενων συσκευών δέσμευσης ενέργειας που βασίζονται σε πτερύγια που ταλαντεύονται έχει προσελκύσει σταδιακά περισσότερη προσοχή, όπως αποδεικνύεται από τον αυξανόμενο αριθμό δημοσιεύσεων.

### 3.2 Βασικοί τύποι συστημάτων ταλαντευόμενων πτερυγίων

Οι μελέτες σχετικά με τους μετατροπείς ενέργειας ταλαντευόμενων πτερυγίων μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες σε σχέση με τον μηχανισμό ενεργοποίησης της συσκευής.



**Εικ. 21.** Διαγράμματα υφιστάμενων τύπων συσκευών ταλαντευόμενων πτερυγίων.

#### 3.2.1 Τύπος 1: Συστήματα με εξαναγκασμένη γωνιακή κίνηση και άνωση

Όπως φαίνεται στο (Εικ. 21α), αυτά τα συστήματα διαθέτουν προδιαγεγραμμένη κίνηση άνωσης  $h(t)$  και κλίσης  $\theta(t)$ . Προφανώς, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο μηχανισμός ενεργοποίησης, είναι ως επί το πλείστον υποθετικοί. Ωστόσο, αυτά τα εξιδανικευμένα μοντέλα είναι απλά και ευκολότερα διατυπωμένα μαθηματικά και έτσι προτιμώνται στις υπάρχουσες θεωρητικές και αριθμητικές μελέτες. Τα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί μπορούν να παράσχουν ορισμένες χρήσιμες θεωρητικές γνώσεις και καθοδήγηση για τον σχεδιασμό πραγματικών συσκευών σε προκαταρκτικό στάδιο. Εάν οι κινήσεις του πτερυγίου είναι περιοδικές με την χρονική περίοδο  $T$ , η απόδοση της συγκομιδής ενέργειας συχνά χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή ισχύος ( $C_{op}$ ) ο οποίος ορίζεται ως:

$$C_{op} = \bar{P} / \left( (1/2) \rho U_{\infty}^3 c s \right)$$

Όπου  $U_{\infty}$  είναι η ταχύτητα της εισερχόμενης ροής,  $\rho$  είναι η πυκνότητα ρευστού,  $c$  είναι το μήκος της χορδής του πτερυγίου, το  $s$  είναι το μήκος έκτασης, και  $\bar{P}$  είναι η μέση τιμή ισχύος ενός κύκλου που ορίζεται ως:



$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [Y(t)h(t) + M(t)\theta(t)] dt$$

Στην ανωτέρω σχέση τα  $Y(t)$  και  $M(t)$  είναι η στιγμιαία δύναμη ανύψωσης και η ροπή ανύψωσης, αντίστοιχα. Ένα περισσότερο κατανοητό μέτρο απόδοσης είναι η αποτελεσματικότητα της συλλογής ενέργειας, που ορίζεται ως το ποσοστό της εισερχόμενης κινηματικής ροής που εξάγεται από το σύστημα, το οποίο εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$n = \bar{P} / (1/2)\rho U_\infty^3 Y_p s$$

όπου  $Y_p$  είναι η διαφορά μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου που φθάνει το πτερύγιο.

### 3.2.2 Τύπος 2: Συστήματα με εξαναγκασμένη γωνιακή κίνηση και επαγόμενες κινήσεις άνωσης (ημι-ενεργοποιημένα συστήματα)

Αυτά τα συστήματα απαιτούν έλεγχο / ενεργοποίηση της γωνιακής κίνησης. Οι υφιστάμενες μηχανές συγκομιδής ενέργειας στη βιομηχανία συχνά βασίζονται σε αυτό το σχέδιο. Με αυτόν τον τρόπο απαιτείται ενέργεια εισόδου για την ενεργοποίηση της κίνησης, ενώ η συγκομιδή ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της προκύπτουσας ανυψωτικής κίνησης που παράγεται από τις δυνάμεις ανώσεως του ρευστού. Η θετική καθαρή ενεργειακή δέσμευση είναι δυνατή μόνο εάν η ενέργεια που εξάγεται από την κίνηση ανόδου είναι υψηλότερη από την ενεργειακή δαπάνη για να ενεργοποιηθεί η γωνιακή κίνηση. Εάν το σύστημα θεωρηθεί ότι ως γραμμικό αποσβεστήρας με συντελεστή απόσβεσης  $c_0$ , η καθαρή παραγωγή ισχύος εκφράζεται ως:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [c_0 h^2(t) - M(t)\theta(t)] dt$$

### 3.2.3 Τύπος 3: Συστήματα με αυτοσυντηρούμενες κινήσεις κλίσης και άνωσης (Αυτοδύναμα συστήματα)

Αυτά τα συστήματα βασίζονται σε αστάθειες που προκαλούνται από τη ροή για να παράγουν ταλαντευτικές κινήσεις στις κατευθύνσεις ανόδου και γωνίας. Αυτό απλοποιεί πολύ τον

μηχανικό σχεδιασμό, καθώς δεν απαιτείται σύστημα ενεργοποίησης. Η επακόλουθη ενεργειακή εξαγωγή, καθαυτή, είναι εγγυημένη ότι είναι θετική. Εάν οι κινήσεις είναι περιοδικές (με την περίοδο  $T$ ) και εξετάζουμε μόνο την παραγωγή ενέργειας από την κίνηση ανόδου, η αντίστοιχη παραγωγή ενέργειας είναι

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} c_0 h^2(t) dt$$

Η αποδοτικότητα για τα συστήματα τύπου 2 και 3 ακολουθεί τον ίδιο ορισμό όπως φαίνεται στην εξίσωση για του Cor. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι καθαρή παραγωγή ενέργειας που αναφέρεται στις παραπάνω εξισώσεις αναφέρεται στο ανώτατο όριο που μπορεί να προκύψει χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές απώλειες του συστήματος κίνησης και του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.3 Επισκόπηση των συστημάτων με εξαναγκασμένη γωνιακή κίνηση και άνωση

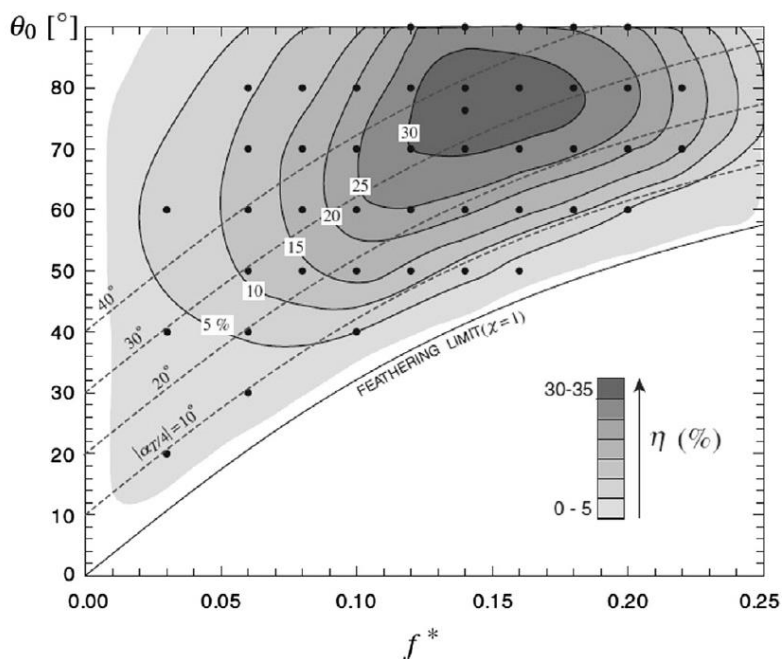
Σε αυτή την κατηγορία, ένα πτερύγιο αναγκάζεται να ταλαντεύεται με τις προδιαγεγραμμένες κινήσεις γωνίας και άνωσης. Στις περισσότερες από τις υπάρχουσες μελέτες, υποτίθεται ότι το πτερύγιο υφίσταται ημιτονοειδείς κινήσεις και στην ανύψωσης και στην κλίσης έτσι ώστε:

- $h(t) = h_0 \sin(\omega t)$  και
- $\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \varphi)$ .

Για να περιγράψουμε αυτό το πρόβλημα ποσοτικά, υπάρχουν αρκετές κινηματικές παράμετροι, συμπεριλαμβανομένων των ταλαντώσεων ( $h_0$  και  $\theta_0$ ), της συχνότητας ( $\omega$  ή  $f = \omega / 2\pi$ ) και της χρονικής υστέρησης μεταξύ της ανύψωσης και της κλίσης ( $\varphi$ ). Μεταξύ αυτών, οι περισσότεροι ερευνητές υιοθετούν δύο μορφές αδιάστατης συχνότητας, την μειωμένη συχνότητα  $f^* = fc / U_\infty$  και τον αριθμό Strouhal ( $St = 2fh_0 / U_\infty$ ).

#### 3.3.1 Επιδράσεις κινηματικών παραμέτρων

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, η μελέτη του συστήματος συγκομιδής ενέργειας από ταλαντευόμενα πτερύγια άρχισε με το πειραματικό έργο των McKinney και DeLaurier (1981), το οποίο απέδειξε τη δυνατότητα εξαγωγής ενεργειακής ροής από μια αρμονικά ταλαντευόμενη πτέρυγα. Μετά από αυτή την ιδέα, οι Jones και Platzler (1997) εξέτασαν τη μετάβαση από την παραγωγή ώσης στην παραγωγή ισχύος χρησιμοποιώντας ένα ασταθές κώδικα πλαισίου σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο οριακού στρώματος. Με τη σταθεροποίηση του εύρους, της συχνότητας απέδειξαν ότι εάν το πλάτος της γωνιακής κίνησης αυξηθεί σε επαρκώς υψηλή τιμή, το σύστημα ταλαντευόμενων πτερυγίων αλλάζει από σύστημα προώθησης σε σύστημα παραγωγής ενέργειας. Με διάφορους συνδυασμούς κινήσεων γωνίας και ανύψωσης η προϋπόθεση για την εμφάνιση ισχύος είναι ότι το εύρος της γωνίας ( $\theta_0$ ) πρέπει να υπερβαίνει τη γωνία προσβολής ( $\arctan [h(t)/U_\infty]$ ). Μία ουδέτερη κατάσταση επιτυγχάνεται όταν η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία κλίσης. Σε αυτή την κατάσταση, η ταλαντευόμενη πτέρυγα δεν δημιουργεί ούτε ώθηση ούτε έλξη.



**Εικ. 22.** Χαρτογράφηση της απόδοσης ( $\eta$ ) στον παραμετρικό χώρο ( $f^*$ ,  $\theta_0$ ) (συχνότητα πτερυγισμού, πλάτος κλίσης) για ένα πτερύγιο NACA0012 για αριθμό  $Re = 1100$ .

Από τις πρωτοποριακές αυτές μελέτες, ένα σημαντικό ζήτημα ήταν να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός κινηματικών παραμέτρων που οδηγούν στην καλύτερη απόδοση του συστήματος (με αυτό τον τρόπο η απόδοση του συστήματος συνήθως ποσοτικοποιείται χρησιμοποιώντας την αποδοτικότητα συλλογής ενέργειας που ορίζεται ανωτέρω), έτσι ώστε αυτό το νέο σύστημα να μπορεί να ανταγωνιστεί τα παραδοσιακά σχέδια που βασίζονται σε

περιστρεφόμενα πτερύγια.

Με τις πειραματικές μετρήσεις και τις αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας έναν κώδικα, τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τον Davids (1999) [52] δείχνουν ότι η απόδοση της ενεργειακής δέσμησης με ταλαντευόμενο πτερύγιο NACA0012 μπορεί να φθάσει το 30% με βελτιστοποιημένο συνδυασμό εύρους γωνίας και συχνότητας. Συστηματικότερες αριθμητικές και πειραματικές έρευνες διεξήχθησαν από τον Lindsey (2002) σε σύστημα διπλού πτερυγίου και Jones et al. (2003) σχετικά με ένα σύστημα ενιαίας πτέρυγας. Οι πρόσφατες υπολογιστικές προσπάθειες των Dumas και Kinsey (2006) και Kinsey και Dumas (2008) παρουσιάζουν μια απεικόνιση της αποδοτικότητας της δέσμησης ενέργειας για ένα ταλαντευόμενο πτερύγιο NACA0015 (Εικ. 22). Μέσα από ασταθή στρωτή ροή χρησιμοποιώντας το εμπορικό λογισμικό FLUENT, παρατηρούσαν ότι εντός της περιοχής  $0 < \Gamma^* < 0.25$  και  $0 < \theta_0 < 90^\circ$ , η μέγιστη απόδοση θα μπορούσε να φθάσει το 34% όταν το πλάτος βύθισης είναι περίπου ένα μήκος χορδής και ο άξονας ανύψωσης που βρίσκεται στο ένα τρίτο του μήκους της χορδής από την αιχμή.

Για μία μόνο πτέρυγα ταλάντωσης, η επίδραση της συχνότητας ταλάντωσης, του εύρους της άνωσης, του εύρους της κλίσης και της υστέρησης φάσης μεταξύ της ανύψωσης και της κλίσης στην αποδοτικότητα ισχύος συνοψίζονται ως εξής:

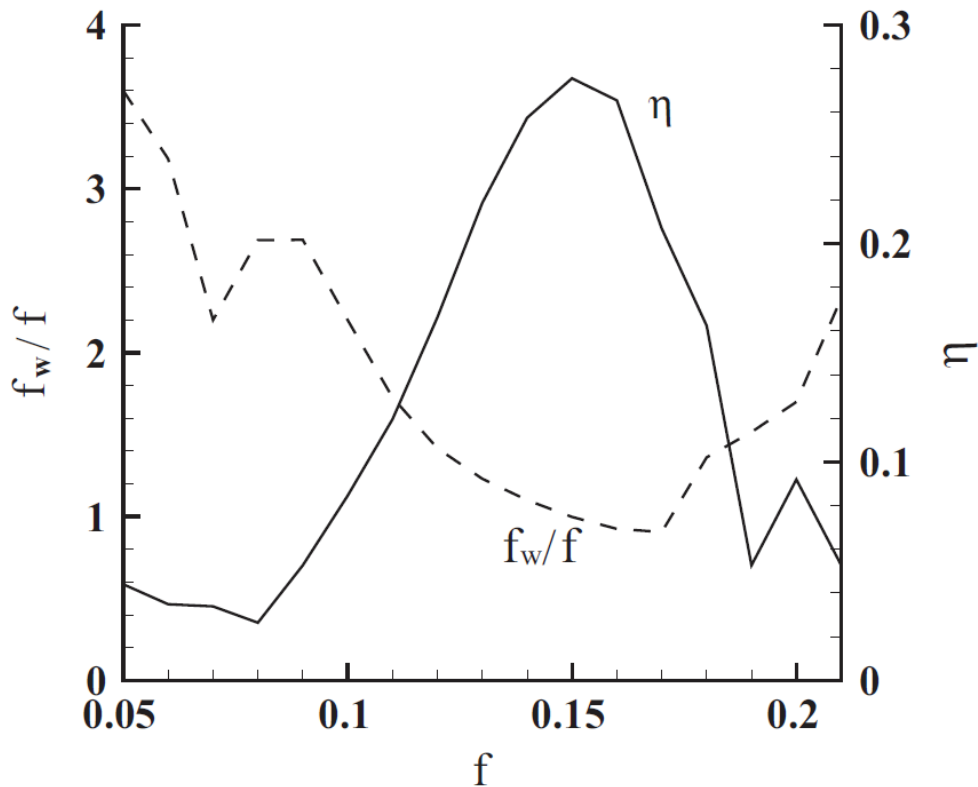
#### ➤ **Συχνότητα ταλάντωσης**

Η επίδραση της συχνότητας ταλάντωσης στη μεταβολή της απόδοσης δέσμησης ισχύος είναι παρόμοια με αυτή ενός ταλαντευόμενου πτερυγίου που χρησιμοποιείται για πρόωση. Συγκεκριμένα, όταν σταθεροποιούνται οι άλλες παράμετροι, η απόδοση ενεργειακής δέσμησης αρχικά αυξάνει με τη συχνότητα  $f^*$ . Μετά την επίτευξη της κορυφής, μειώνεται απότομα όταν το  $f^*$  αυξάνεται περαιτέρω.

Τοπικά, η συχνότητα κορυφής εξαρτάται και από άλλες κινηματικές παραμέτρους, όπως τα πλάτη ανύψωσης και γωνίας, η υστέρηση φάσης μεταξύ γωνίας και ανύψωσης, και ακόμη και από το σημείο pivot για την κίνηση της γωνίας. Ωστόσο, το συνολικό βέλτιστο σημείο που αντιστοιχεί στην μέγιστη απόδοση σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς παραμέτρων συμβαίνει πάντα όταν η μειωμένη συχνότητα  $f^*$  είναι εντός της περιοχής μεταξύ 0,10 και 0,15.

### ➤ Εύρος άνωσης

Όπως συζητήσαμε προηγουμένως, για να φτάσουμε σε μια κατάσταση παραγωγής ενέργειας, η γωνία προσβολής που προκαλείται από την ανύψωση πρέπει να είναι μικρότερη από το εύρος της γωνίας κλίσης. Για να επιτευχθεί επαρκής ισχύς εξόδου, το πλάτος ανόδου ( $h_0$ ) επιλέγεται συνήθως για να είναι συγκρίσιμο με το μήκος της χορδής. Δεδομένου ότι οι άλλες παράμετροι είναι σταθερές, οι γενικές παρατηρήσεις από σχετικές μελέτες είναι ότι καθώς αυξάνεται το εύρος κλίσης αυξάνεται ο συντελεστής ισχύος (C<sub>op</sub>) γραμμικά (Davids, 1999 [52], Lindsey, 2002 [71], Dumas and Kinsey, 2006 [51], Xiao et al. 2012 [92]). Ωστόσο, αυτή η τάση δεν ισχύει πάντα για την απόδοση  $\eta$ . Στην πραγματικότητα, η επίδραση της αύξησης του πλάτους στην  $\eta$  είναι περίπλοκη, καθώς επηρεάζεται όχι μόνο την ταλαντευόμενη ταχύτητα αλλά και το μέγεθος της επιφάνειας που σαρώνει το πτερύγιο. Σύμφωνα με αυτές τις μελέτες, σε χαμηλά πλάτη εμβάπτισης ( $h_0 < 0.5c$ ), το  $\eta$  αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του  $h_0$ . Μόλις το πλάτος βύθισης φτάσει σε ένα μήκος χορδής, η απόδοση πέφτει αφού η περιοχή σάρωσης συνεχίζει να αυξάνεται, ενώ μειώνεται η γωνία προσβολής σε ορισμένα τμήματα του κύκλου ταλάντωσης.



**Εικ. 23.** Η συχνότητα σε διάφορες περιπτώσεις κυματισμού και η απόδοση συλλογής ενέργειας ( $\eta$ ) σε διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης ενός ταλαντευόμενου πτερυγίου (Zhu, 2011 [96]).

➤ **Υστέρησης φάσης μεταξύ της ανύψωσης και της κλίσης**

Εντός του εύρους των μεταβλητών, διαπιστώνεται ότι η μέγιστη ενεργειακή παραγωγή συμβαίνει όταν οι υπάρχει υστέρησης φάσης μεταξύ της ανύψωσης και της κλίσης κατά  $90^\circ$  (Davids, 1999 [52], Dumas και Kinsey, 2006 [51] · Kinsey and Dumas, 2008 [63]). Μπορεί να υπάρχουν κάποιες παραλλαγές εάν το σημείο περιστροφής μετακινηθεί κατάντη από το ένα τρίτο (ή το ένα τέταρτο) του μήκους της χορδής στο ήμισυ του μήκους της χορδής από την πρόσθια άκρη.

➤ **Αποτελεσματική γωνία προσβολής (Effective angle of attack (AoA))**

Η δυναμική του συστήματος καθορίζεται από τον συνδυασμό των κινηματικών παραμέτρων, έτσι συχνά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σφαιρικά. Μια παράμετρος που υιοθετείται συνήθως από τους ερευνητές στην μελέτη πτερυγίων πρόωσης είναι η «αποτελεσματική γωνία προσβολής» που ορίζεται ως εξής:

$$a_{eff}(t) = -\arctan\left[\frac{h(t)}{U_\infty}\right] + \theta(t)$$

Η ονομαστική γωνία προσβολής ( $a_0$ ), η οποία δεν είναι ανεξάρτητη από το χρόνο, υιοθετείται ευρέως στις μελέτες. Ορίζεται ως

$$a_0 = -\arctan\left[\frac{\omega h_0}{U_\infty}\right] + \theta_0$$

Για λόγους ευκολίας, μερικές φορές η  $a_0$  ονομάζεται επίσης και «effective AoA». Όπως υποδεικνύεται στον ορισμό της αυτή η παράμετρος συνδυάζει τις συνεισφορές της συχνότητας ταλάντωσης, της ανύψωσης, της γωνίας κλίσεως, καθώς και των εισερχόμενων συνθηκών ροής. Οι μελέτες σχετικά με την επίδραση της «effective AoA» αποκαλύπτουν μια τάση αύξησης της ισχύος (απόδοσης) με την αύξηση της  $a_0$  όταν η τιμή της είναι χαμηλή (Davids, 1999 [52], Xiao et al., 2012 [92]).

➤ **Θέση του άξονα ανύψωσης (θέση περιστροφής)**

Για τα περισσότερα ταλαντευόμενα πτερύγια σε αεροδυναμικές ή υδροδυναμικές εφαρμογές, ο άξονας ανύψωσης βρίσκεται στο ένα τρίτο ή ένα τέταρτο του μήκους χορδών από την πρόσθια ακμή. Αυτό μετριάζει το ενεργειακό κόστος για να δημιουργήσει την κίνηση ανύψωσης αφού το κέντρο της δύναμης του ρευστού είναι κατά προσέγγιση στο ένα τέταρτο της χορδής. Έχει παρατηρηθεί ότι στα ταλαντευόμενα πτερύγια το να μεταβάλλεις την θέση του άξονα ανύψωσης έχει παρόμοιο αποτέλεσμα με την αλλαγή της φάσης υστέρησης μεταξύ γωνίας και ανύψωσης (Davids, 1999 [52], Kinsey and Dumas, 2008 [63]). Πράγματι, μια συστηματική μελέτη από τον Davids (1999) [52] σχετικά με τη σχέση μεταξύ της φάσης υστέρησης και του σημείου περιστροφής δείχνει μια προφανή αλληλεξάρτηση. Για υστέρηση φάσης μικρότερη από  $90^\circ$ , το σημείο περιστροφής που αντιστοιχεί στο μέγιστο  $C_{op}$  βρίσκεται σε ένα σημείο πίσω από το μέσο της της χορδής του πτερυγίου. Ωστόσο, για υστέρηση φάσης μεγαλύτερη από  $90^\circ$ , η βέλτιστη θέση περιστροφής μετατοπίζεται προς την εμπρόσθια άκρη. Μια μεταγενέστερη έρευνα για την ανάλυση της στιγμιαίας τυρβώδους ροής και της κατανομής της πίεσης στην επιφάνεια του πτερυγίου δείχνει ότι η αλλαγή του σημείου περιστροφής του πτερυγίου τροποποιεί άμεσα την στιγμιαία τοπική επιτάχυνση της επιφάνειας του σώματος, οδηγώντας σε στροβιλισμό της ροής στο τοίχωμα του πτερυγίου (Kinsey και Dumas, 2008 [63]). Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από αυτές τις μελέτες είναι ότι η υψηλότερη απόδοση προκύπτει όταν ο άξονας περιστροφής βρίσκεται ακριβώς μπροστά από τη μεσαία θέση της χορδής.

### **3.3.2 Επίδραση της αστάθειας της ροής πίσω από το ταλαντευόμενο πτερύγιο στην αποδοτικότητα της συλλογής ενέργειας**

Είναι καλά κατανοητό ότι η αποτελεσματικότητα ενός ταλαντευμένου πτερυγίου που χρησιμοποιείται για πρόωση, είναι στενά συνδεδεμένη με την αστάθεια της ροής πίσω από το πτερύγιο. Οι διαταραχές της ροής πίσω από το πτερύγιο αυξάνονται καθώς ταξιδεύουν κατάντη, ενώ δεν υπάρχει δυνατότητα τοπικής ανάπτυξης. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη προωθητική απόδοση συμπίπτει με την ενεργοποίηση των πλέον ασταθών ροών μετά από έναν βέλτιστο αριθμό Strouhal περίπου 0,3 (Triantafyllou κ.ά., 1991, 1993 [85],[86]). Υπό αυτή την έννοια, ο μηχανισμός δέσμευσης ενέργειας με ταλαντευόμενο πτερύγιο είναι παρόμοιος, καθώς η απόδοση της συλλογής ενέργειας σχετίζεται επίσης με την ένταση της δημιουργούμενης ροής πίσω από αυτό. Έτσι η ικανότητα ανάκτησης ενέργειας καθορίζεται από τη μείωση της ταχύτητας στα απόνερα του, η οποία προκαλείται από τις δίνες που δημιουργούνται στην επιφάνεια του πτερυγίου.

Έχει διεξαχθεί μια αριθμητική μελέτη για να εξεταστεί ο συσχετισμός μεταξύ της αστάθειας της δημιουργούμενης ροής πίσω από το πτερύγιο και της απόδοσης της δέσμευσης ενέργειας ενός πτερυγίου (Zhu, 2011 [96]). Αυτή η εργασία περιλαμβάνει προδιαγεγραμμένες (ημιτονοειδείς) κινήσεις ανύψωσης και γωνίας ενός δισδιάστατου πτερυγίου. Το ανωτέρω

πρόβλημα δυναμικής ρευστών επιλύεται χρησιμοποιώντας έναν επιλυτή εξισώσεων Navier-Stokes. Το βασικό εύρημα είναι ότι επιτυγχάνεται η υψηλότερη αποδοτικότητα δέσμευσης ενέργειας όταν η συχνότητα ταλάντωσης συμπίπτει με τη συχνότητα της μεγαλύτερης αστάθειας. Αυτό το σενάριο μπορεί να συμβεί μόνο με πολύ ισχυρή παραγωγή δινών από την αιχμή του πτερυγίου, η οποία προκαλείται από μεγάλες αποτελεσματικές γωνίες προσβολής ( $> 40^\circ$ ). Η αντίστοιχη μειωμένη συχνότητα  $f^*$  είναι στην περιοχή μεταξύ 0,10 και 0,15, σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες.

### 3.3.3 Άλλοι παράγοντες επίδρασης

#### ➤ Επίδραση 3D γεωμετρίας

Σε πραγματικές εφαρμογές, τα πτερύγια έχουν πάντα περιορισμένο λόγο διαστάσεων, καθώς το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή τους. Μελέτες σχετικά με την επίδραση της τρισδιάστατης γεωμετρίας έχουν εκτελεστεί από τους Simpson et al. (2008a, β [80],[81]) και Kinsey και Dumas (2012c [66]).

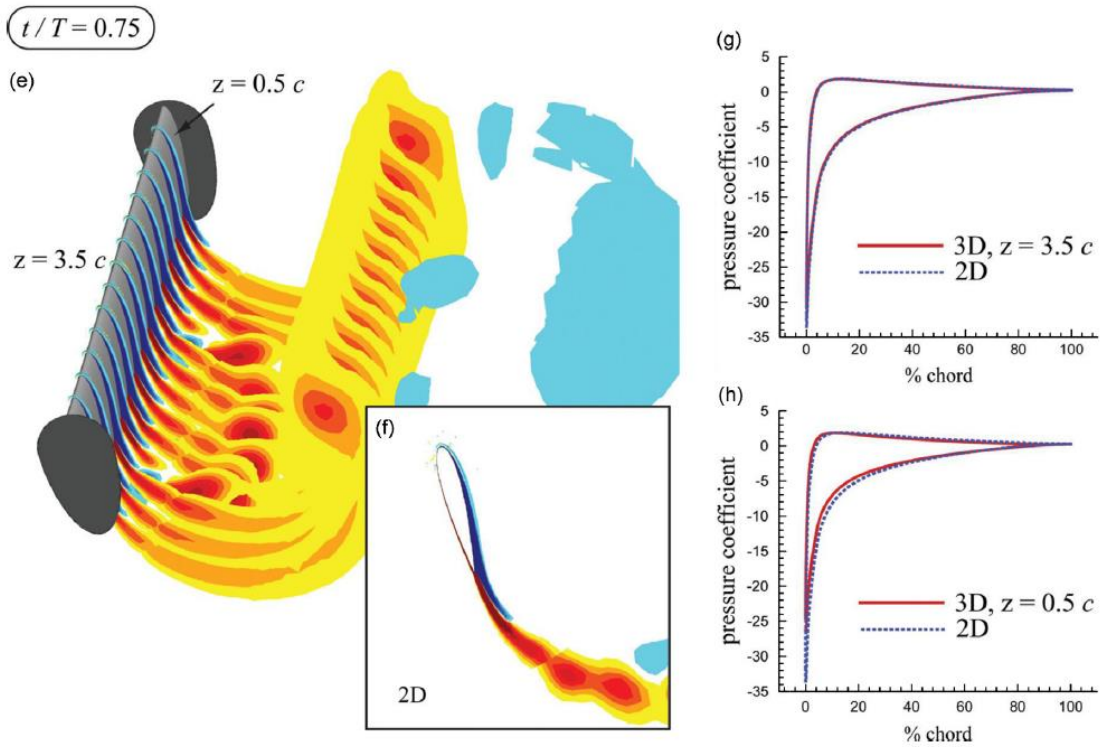
Με δοκιμές σε δεξαμενή νερού και μέτρηση δύναμης / φορτίου για ένα πτερύγιο NACA0012 σε τρεις διαφορετικές αναλογίες ( $AR = 4.1, 5.9$  και  $7.9$ ), τα αποτελέσματα από τους Simpson et al. (2008a, β [80],[81]) δείχνουν σαφή μείωση της αποτελεσματικότητας καθώς μειώνεται η  $AR$ . Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη, η υψηλή απόδοση γύρω στο 40%, είναι παρούσα μόνο στο πτερύγιο με μεγάλες αναλογίες διαστάσεων. Αυτό θυμίζει την απόδοση των πτερυγίων που χρησιμοποιούνται για πρόωση, που δείχνει την ίδια τάση. Μια μέγιστη απόδοση 43% βρέθηκε στην αναλογία διαστάσεων 7,9, ο Strouhal αριθμός 0,4, η μέγιστη γωνία προσβολής  $34,371^\circ$ , και η διαφορά φάσης μεταξύ βήματος και γωνίας της τάξης των  $90^\circ$ .

Μια αριθμητική μελέτη για την επίδραση της τρισδιάστατης γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε από τους Kinsey και Dumas (2012c [66]) για δύο λόγους αναλογίας, 5,0 και 7,0. Παρόμοια με το πειραματικό έργο των Simpson et al. (2008a, b [80],[81]), οι προσομοιώσεις τους έδειξαν ότι η μέγιστη μέση ισχύς του κύκλου των πεπερασμένων πτερυγίων  $AR$  είναι χαμηλότερη από αυτή μιας δισδιάστατης πτέρυγας. Λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες ροής και ταλάντωσης του Reynolds (αριθμός  $Re = 500000$ , μειωμένη συχνότητα πτερυγισμού  $f^* = 0,14$ , πλάτος ανύψωσης  $\theta^\circ = 75^\circ$  και εύρος κλίσης  $h_0 = c$ ) η μέγιστη απόδοση δέσμευσης ενέργειας είναι 28% για  $AR = 7,0$  και μειώνεται στο 21% για  $AR = 5,0$ .

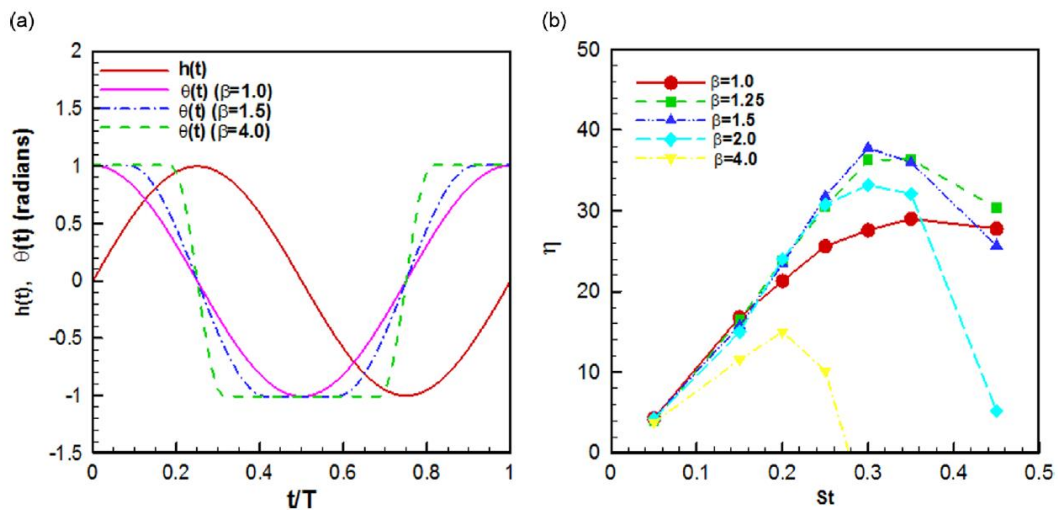
Λεπτομερής εξέταση του πεδίου στροβιλισμού κατά μήκος του 3D πτερυγίου στην διάρκεια ενός πλήρους κύκλου υποδεικνύει μια αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των 2D και 3D πτερυγίων σε εκείνες τις στιγμές που εμφανίζεται έντονο φαινόμενο στροβιλισμού. Παρόμοια με την περίπτωση μιας 2-D πτέρυγας, μια διευρυμένη δίνη εξελίσσεται στο μέσο μιας τρισδιάστατης πτέρυγας (Εικ. 24), η οποία οδηγεί σε σημαντική διαφορά μεταξύ των κατανομών πίεσης στις επάνω και κάτω επιφάνειες του πτερυγίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη στιγμιαία δύναμη ανύψωσης και την αύξηση της ροπής και βελτιώνει την αποδοτικότητα της δέσμευσης της







**Εικ. 24.** Σύγκριση μεταξύ προβλέψεων 2D και 3D ( $AR = 7$ ) σε δύο χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της κίνησης του πτερυγίου. (Με το χρώμα μπλε παρουσιάζεται ο αρνητικός στροβιλισμός και με κόκκινο ο θετικός) (Kinsey and Dumas, 2012c [66]).



**Εικ. 25.** Η επίδραση των μη ημιτονοειδών προφίλ γωνιών στην αποτελεσματικότητα ισχύος των πτερυγίων ταλαντώσεων: (Xiao et al., 2012 [92]).

### 3.3.4 Επίδραση αριθμού Reynolds

Σε πραγματικές εφαρμογές, οι συσκευές συλλογής ενέργειας συνήθως λειτουργούν σε αριθμούς Reynolds πολύ υψηλότερους από εκείνους που εξετάζονται σε αριθμητικές προσομοιώσεις και εργαστηριακά πειράματα. Οι μελέτες σχετικά με την επίδραση του αριθμού Reynolds είναι επομένως κρίσιμες για τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ υφιστάμενων μελετών και μελλοντικών εφαρμογών. Στις αρχικές έρευνες, οι Lindsey (2002) [71] και Jones et al. (2003) [59] πραγματοποίησαν προσομοιώσεις επιλύοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes για να προβλέψουν την επίδραση του αριθμού Reynolds. Σημαντικά υψηλότερη αποδοτικότητα ισχύος παρατηρήθηκε σε μία περιοχή μειωμένης συχνότητας μεταξύ 0,2 και 1,2 όταν ο αριθμός Reynolds αυξήθηκε από  $2 \times 10^{-4}$  έως  $10^6$ . Αυτό υποδηλώνει ότι η παρουσία μεγάλου διαχωρισμού ροής λόγω δυναμικού stalling σε υψηλό Re είναι ευεργετική για την δέσμευση ενέργειας. Μια λεπτομερέστερη έρευνα σε αυτή την πτυχή έγινε από τους Dumas και Kinsey (2006) [51] και τους Kinsey και Dumas (2008) [63]. Υποθέτοντας κατάσταση στρωτής ροής, η προκαταρκτική μελέτη από τους Dumas και Kinsey (2006) [51] επικεντρώθηκε σε δύο αριθμούς Reynolds ( $Re = 500$  και  $2400$ ). Διαπίστωσαν ότι η απόδοση αυξήθηκε ελαφρώς με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Περαιτέρω μελέτες από τους Kinsey και Dumas (2008) [63] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αποδοτικότητα της συγκομιδής ενέργειας αυξήθηκε από 32,7% σε 36,4% όταν ο Re αυξάνεται από 500 σε 10000.

### **3.4. Μηχανισμοί για την περαιτέρω ενίσχυση της ικανότητας εξαγωγής ενέργειας**

Η παραγωγή και η απόρριψη των δινών στα άκρα των πτερυγίων (Leading edge vortex - LEV) εκτιμάται ότι διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας. Συγκεκριμένα, ο χρονισμός της απόρριψης των LEV είναι κρίσιμος για τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της δέσμευσης ισχύος μέσω της μεταβολής της τοπικής κατανομής της πίεσης στην επιφάνεια (Kinsey and Dumas, 2008 [63], Zhu and Peng, 2009 [76]). Αναφερόμενοι στον ορισμό του συντελεστή ισχύος στις εξισώσεις (1) και (2), υπάρχουν τέσσερις κύριες πτυχές που επηρεάζουν το επίπεδο δέσμευσης ισχύος:

(α) Το μέγεθος της κατακόρυφης δύναμης  $Y(t)$

(β) Το μέγεθος της ταχύτητας ανέμου  $h(t)$

(γ) Ο συγχρονισμός μεταξύ  $Y(t)$  και  $h(t)$  και ο συγχρονισμός της ροπής βήματος  $M(t)$  και της ταχύτητας βήματος  $\theta(t)$ , και

(δ) η σχετική συνεισφορά της γωνίας ( $M(t)\theta(t)$ ) και της ανύψωσης ( $Y(t)h(t)$ ) σε έναν κύκλο ταλάντωσης.

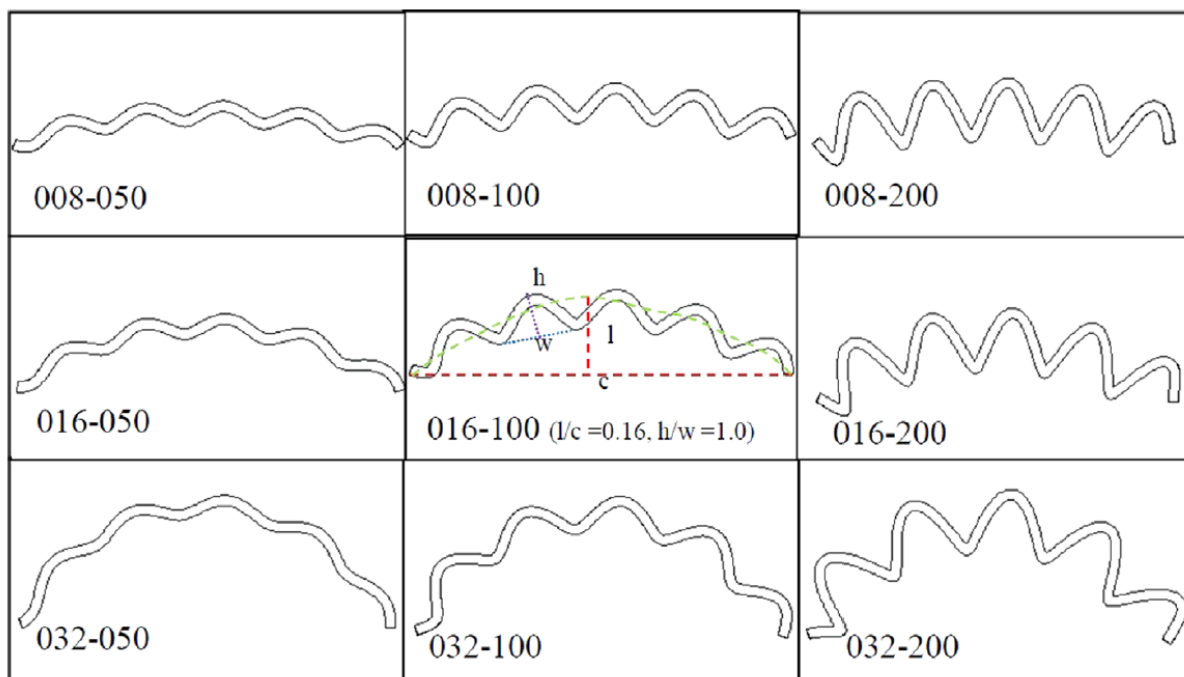
Για να επιτευχθούν οι μέγιστες επιδόσεις, εκτός από ένα υψηλότερο εύρος κλίσης, τα  $Y(t)$  και  $h(t)$  (καθώς και τα  $M(t)$  και  $\theta(t)$ ) πρέπει να έχουν το ίδιο πρόσημο στο μεγαλύτερο μέρος του κύκλου για να αποφεύγεται η εμφάνιση αρνητικής ισχύος. Επιπλέον, έχουν διερευνηθεί οι ακόλουθοι μηχανισμοί για την ενίσχυση της απόδοσης της συγκομιδής ενέργειας.

### 3.4.1. Μη-ημιτονοειδής κίνηση

Οι περισσότερες έρευνες σχετικά με τις επιδράσεις των κινηματικών παραμέτρων στην αποτελεσματικότητα της συγκομιδής ενέργειας βασίζονται σε ημιτονοειδείς κινήσεις, οι οποίες είναι το πιο θεμελιώδες αρμονικό προφίλ για μια κίνηση πτερυγισμού. Ωστόσο, στη φύση, η υψηλή απόδοση προωθήσεως των ιπτάμενων και των θαλάσσιων ζώων μπορεί να επιτευχθεί με μη-ημιτονοειδή τροχιές κίνησης (βλ. Π.χ. Licht et al., 2010 [70]). Εμπνευσμένες από αυτόν τον βιολογικό μηχανισμό, έχουν γίνει μελέτες για την επίδραση κινήσεων μη ημιτονοειδούς ταλάντωσης (Platzer et al., 2010 [78], Ashraf et al. [46], 2011, Xiao et al., 2012 [92]). Οι Platzer et al. (2010) [78] και Ashraf et al. (2011) [46] διερεύνησαν μια σειρά μη-ημιτονοειδών κινήσεων με σταθερή συχνότητα  $f^* = 0,8$ , ύψος ανύψωσης  $1,05c$  και εύρος γωνίας  $73^\circ$ . Για ένα απλό πτερύγιο NACA 0014 που υποβλήθηκε σε κίνηση μη ημιτονοειδούς βήματος, τα αποτελέσματά τους δείχνουν αύξηση κατά 17% περίπου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αύξηση της αποδοτικότητας κατά 15% σε σχέση με εκείνες με ημιτονοειδή κίνηση.

### 3.4.2. Κυματοειδή πτερύγια

Οι βιο-μηχανολογικές μελέτες σχετικά με το σχέδιο επιφάνειας ενός φτερού ληβελούλας υποδεικνύουν ότι μια κυματοειδής δομή με διάφορα «μοτίβα» σε αυτήν μπορεί να ενισχύσει την αεροδυναμική απόδοση μέσω αυξημένης ανύψωσης και μειωμένης οπισθέλκουσας (βλ. Π.χ. Kesel, 2000 [62]). Οι ασταθείς δίνες που παράγονται μέσα στους σχηματισμούς, ελέγχουν αποτελεσματικά το μέγεθος διαχωρισμού ροής αλλάζοντας το στρωτό οριακό στρώμα σε ένα στροβιλώδες. Παρόμοια σχέδια βρίσκονται και σε άλλα ζωντανά συστήματα (π.χ. κελύφη οστράκων). Εμπνευσμένα από αυτή τη βιολογική έννοια, έχουν προταθεί νέα μοντέλα με κυματοειδή πτερύγια (Εικόνα 26) (Le et al., 2013 [68]). Οι αριθμητικές προσομοιώσεις τους έδειξαν ότι το λεπτομερές προφίλ του πτερυγίου έπαιξε ρόλο στον έλεγχο της θέσης, του χρονισμού και της ταχύτητας της παραγωγής δινών και της απόδοσής στην παραγωγή ενέργειας. Ένα βελτιστοποιημένο σχήμα πτερυγίου με αυλακώσεις και καμπύλες βρέθηκε να βελτιώνει την απόδοση κατά περίπου 6% σε σύγκριση με το προφίλ NACA0012. Μία περαιτέρω βελτίωση έως και 17% είναι εφικτή εάν η κυρτή επιφάνεια συναντήσει μια ελεύθερη ροή κατά τη διάρκειά τόσο της ανόδου όσο και τις καθόδου.

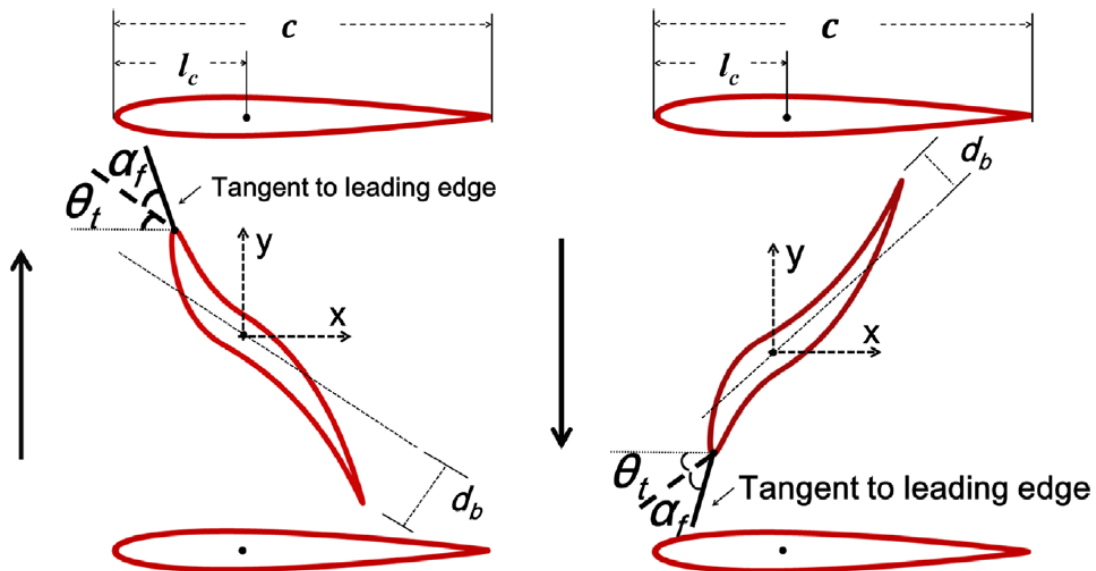


**Εικ. 26.** Ένα σχήμα βιο-μιμητικής μεμβράνης που μοιάζει με κέλυφος χτενιού (Le et al., 2013 [68]). Ο αριθμός που αποτελεί το όνομα του μοντέλου αναφέρεται στο ποσοστό της καμπύλωσης και της αυλάκωσης.

### 3.4.3 Δομική ευελιξία

Η δομική ευκαμψία είναι γνωστό ότι έχει ευεργετικές επιδράσεις στην απόδοση των πτερυγίων παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, προηγούμενες μελέτες σχετικά με τα πτερύγια των εντόμων και τα πτερύγια ψαριών υποδεικνύουν ότι ένας ορισμένος βαθμός ευκαμψίας μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία υψηλότερων δυνάμεων ωθήσεως ή ανώσεως. Αυτό οφείλεται στον δομικό συντονισμό, στον χειρισμό της δημιουργίας LEV και στην επίδραση αναπροσανατολισμού της δύναμης που συνδέεται με τις παραμορφώσεις (Katz και Weihs, 1978 [60], Zhu, 2007 [95], Michelin et al., 2009 [75], Yin and Luo, 2010 [93], Massoud and Alexeev, 2010 [73], Thiria και Godoy-Diana, 2010 [84] · Ramananarivo et al., 2011 [79] · Shoele and Zhu, 2013 [83]). Από την άλλη πλευρά, δεν είναι πλήρως κατανοητή η επίδραση της δομικής ευκαμψίας στην απόδοση των συσκευών συγκομιδής ενέργειας πτερύγιου. Προκειμένου να μελετηθεί ο ρόλος της δομικής ευκαμψίας στην υδροδυναμική των πτερυγίων, οι Liu et al. (2013) [72] υπολογιστικά δημιούργησαν και μελέτησαν δισδιάστατα εύκαμπτα πτερύγια που λειτουργούν στο πλαίσιο του καθεστώτος παραγωγής ενέργειας. Αντί για την απευθείας επίλυση του προβλήματος αλληλεπίδρασης ρευστού-δομής, η ευέλικτη κίνηση προκαθορίζεται με βάση τα δομικά αποτελέσματα. Τέσσερα διαφορετικά μοντέλα διερευνώνται με συγκεντρωμένες παραμορφώσεις κοντά στις εμπρόσθιες και τις πίσω άκρες, όπως φαίνεται στο (Εικόνα 27). Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι η ευελιξία μιας πτέρυγας είναι δυνητικά επωφελής για τη συγκομιδή ενέργειας αυξάνοντας την μέγιστη δύναμη ανύψωσης σε έναν κύκλο και συντονίζοντας τη μετατόπιση φάσης μεταξύ δύναμης

και ταχύτητας προς μια ευνοϊκή τάση. Η επίδραση της ευελιξίας των πτερυγίων στην αποτελεσματικότητα είναι πιο εμφανής σε χαμηλές ονομαστικές αποτελεσματικές γωνίες προσβολής. Σε μια τυπική συχνότητα πτερυγισμού  $f^* = 0,15$  και ονομαστική αποτελεσματική ΑοΑ  $10^\circ$ , ένα εύκαμπτο πτερύγιο προσφέρει απόδοση 7,68% υψηλότερη από μια άκαμπτη πτέρυγα..



Εικ. 27. Εύκαμπτο ταλαντευόμενο πτερύγιο (Liu et al., 2013 [72]).

### 3.4.4. Διαμορφώσεις πολλαπλών πτερυγίων

Στη φύση, τα ψάρια κολυμπούν σε ομάδες και τα πουλιά πετούν σε κοπάδια για να εξοικονομήσουν ενέργεια μέσω γειτονικών αλληλεπιδράσεων (βλ. Π.χ. Belyayev και Zuyev, 1969 [48]). Προηγούμενες μελέτες σε ψάρια ή παράλληλες ταλαντευόμενες πτέρυγες για πρόωση έχουν αποδείξει ότι με την κατάλληλη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών πτερυγίων η ενέργεια των προηγούμενων αποκομμένων δινών μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την αύξηση της ώθησης (π.χ., Zhu et al., 2002 [94], Deng et al., 2007 [50]). Στην πράξη, μια παρόμοια αρχή υιοθετείται από εμπορικούς αιολικούς σταθμούς στους οποίους συχνά χρησιμοποιούνται πολλαπλές ανεμογεννήτριες είτε σε σειρά είτε σε παράλληλες διαμορφώσεις. Είναι επομένως φυσικό να διερευνάται η εφαρμογή διατάξεων πολλαπλών πτερυγίων στην συγκομιδή ενέργειας. Σε ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πρόσθετες παράμετροι όπως οι αποστάσεις και οι διαφορές φάσης μεταξύ γειτονικών πτερυγίων. Τα προηγούμενα πειράματα του Lindsey (2002) [71], Jones et al. (2003) [59] και Platzer et al. (2010) [78] πρότειναν ότι η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να αυξηθεί με τη χρήση δύο πτερυγίων που ταλαντώνονται σε μια διαδοχική τοποθέτηση.

Αυτό βασίζεται σε πειραματικές δοκιμές σε σήραγγες νερού. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο πτερυγίων με ρεύμα είναι  $X = 9.6c$  και η υστέρηση φάσης  $\varphi_{1-2}$  είναι  $90^\circ$ . Μια πιο λεπτομερής αριθμητική έρευνα διεξήχθη από τους Ashraf et al. (2011) [46] για να εξετάσει την επίπτωση της διακύμανσης της απόστασης και της διαφοράς φάσης μεταξύ δύο πτερυγίων NACA0014 που ταλαντεύονται σε απόσταση  $1/2$  χορδών, σε αριθμό Reynolds της τάξης των 20.000, μειωμένη ταλαντευόμενη συχνότητα 0,8, πλάτος ανύψωσης 1,05c και γωνία κλίσης  $73^\circ$ . Η μελέτη τους καλύπτει τρεις αποστάσεις ( $X = 2.0c, 4.0c,$  και  $6.0c$ ) και τρεις φάσεις υστέρησης ( $\varphi_{1-2} = 0^\circ, 90^\circ,$  και  $180^\circ$ ). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τόσο η υστέρηση φάσης όσο και η απόσταση έχουν μεγάλη επίπτωση στην ικανότητα συλλογής ενέργειας και στην αποδοτικότητα. Για να επιτευχθεί μια ενισχυμένη ισχύς εξόδου, η πτέρυγα που κινείται προς τα κάτω πρέπει να τοποθετηθεί σε μια βέλτιστη θέση στο πέρασμα της δίνης του ανερχόμενου πτερυγίου. Μια τέτοια βέλτιστη απόσταση ποικίλει ανάλογα με τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο πτερυγίων καθώς και την ταχύτητα ροής. Εντός της περιοχής παραμέτρων που κάλυψαν, διαπιστώθηκε ότι στην παράλληλη διάταξη τόσο η μέση ισχύς εξόδου όσο και η αποδοτικότητα ανά πτερύγιο μειώνονται κατά περίπου 20% σε σύγκριση με ένα μόνο πτερύγιο. Ωστόσο, η συνολική αποτελεσματικότητα της διαδοχικής διάταξης αυξάνεται έως και κατά 59% σε σύγκριση με εκείνη ενός μόνο πτερυγίου. Με τον τρόπο αυτό η συνολική απόδοση ενός συστήματος πολλαπλών πτερυγίων ορίζεται με την εξίσωση (3), στην οποία υπολογίζεται η μέση χρονική ισχύς,  $\bar{P}$  ως  $\bar{P} = \sum_i \bar{P}_i$ , όπου  $P_i$  είναι η μέση ισχύς κάθε μεμονωμένου πτερυγίου.

Σε μια διαμόρφωση σε σειρά, η συνολική περιοχή σάρωσης του συστήματος είναι ίδια με αυτή ενός μεμονωμένου πτερυγίου, ενώ η περιοχή σάρωσης μιας παράλληλης διαμόρφωσης αντιπροσωπεύει την περιοχή που σαρώνεται από ολόκληρο το σύστημα, η οποία είναι διαφορετική από αυτή ενός μόνο πτερυγίου.

Ο Lefrancois (2008) [69] διερεύνησε την απόδοση παραγωγής ισχύος ενός διπλού πτερυγίου τόσο σε παράλληλες όσο και σε σειρά διαμορφώσεις. Διαπιστώθηκε ότι σε διαδοχική διάταξη, επιτυγχάνεται απόδοση εξόδου ισχύος 41% από δύο ταλαντευόμενες επίπεδες πλάκες (πάχος 0,15c) με έξι μήκη χορδών απόσταση το ένα από το άλλο και μια φάση υστέρησης  $180^\circ$  με μειωμένη συχνότητα 0,12. Για μια καθαρά παράλληλη διαμόρφωση, η μέγιστη απόδοση είναι 31%.

Μια πρόσφατη μελέτη από τους Kinsey και Dumas (2012a, b, c [64],[65],[66]) κατέδειξε και πάλι ότι η σχετική τοποθέτηση του μεταγενέστερου πτερυγίου που ταλαντεύεται στο ρεύμα από το ανάντη πτερύγιο είναι κρίσιμο για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της συσκευής. Εντός του εύρους παραμέτρων που δοκιμάστηκε, τόσο το ανάντη όσο και το μεταγενέστερο πτερύγιο πέτυχαν υψηλότερη απόδοση από ένα μονό πτερύγιο. Η συμβολή του κατάντη πτερυγίου στη συνολική παραγωγή ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ανάντη και κατάντη πτερυγίων. Μία δυσμενή αλληλεπίδραση μπορεί ακόμη και να κάνει το πτερύγιο που κινείται προς τα κάτω να συμβάλει αρνητικά, στην ενεργειακή παραγωγή.

Εκτός από τα παραπάνω ευρήματα, εισήχθη μια γενική παράμετρος μετατόπισης φάσης για τον καλύτερο χαρακτηρισμό της διαδοχικής διαμόρφωσης. Αυτή η παράμετρος ( $\Phi_{1-2}$ ) συνδυάζει την απόσταση ( $Lx$ ) και την υστέρηση φάσης ( $\varphi_{1-2}$ ) ως εξής:



$$\Phi_{1-2} = 2\pi(L_x / U_\infty T) + \Phi_{1-2}$$

όπου  $T$  είναι η χρονική περίοδος ταλάντωσης.

Μια έρευνα από τους Liu et al. (2013) [72] σε παράλληλη διάταξη διπλού πτερυγίου για διάφορες ονομαστικές αποτελεσματικές τιμές AoA δείχνει πολύ υψηλότερη παραγωγή ενέργειας από ένα μόνο πτερύγιο. Αυτό οφείλεται σε ένα σχετικά μικρό χάσμα μεταξύ των δύο πτερυγίων, το οποίο εμπλουτίζει τις αλληλεπιδράσεις των δινών και βελτιώνει την ικανότητα παραγωγής ενέργειας.

### 3.5 Ανασκόπηση των ημι-ενεργοποιημένων συστημάτων

Σε σύγκριση με τις εξαναγκασμένες ταλαντευόμενες κινήσεις που συζητήσαμε παραπάνω, τα ημι-ενεργοποιημένα συστήματα υπόσχονται μια πιο εφαρμόσιμη εφαρμογή στην πράξη. Αυτές οι συσκευές συνήθως χαρακτηρίζονται από προκαθορισμένη κλίση αλλά με ελεύθερη κίνηση ανώσεως.

Συγκεκριμένα, σε αυτό το σχέδιο, η κίνηση ανύψωσης ενεργοποιείται έτσι ώστε η γωνία προσβολής να μεταβάλλεται περιοδικά. Η προκύπτουσα ταλάντωση λόγω της ανυψωτικής δύναμης παράγει μια περιοδική κίνηση, από την οποία μπορεί να επιτευχθεί παραγωγή ενέργειας. Για λόγους απλούστευσης, στο μαθηματικό μοντέλο η ηλεκτρική γεννήτρια συχνά εξιδανικεύεται ως γραμμικός αποσβεστήρας προσαρμοσμένος στην ανυψωτική κίνηση. Ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί μια συσκευή ενεργοποίησης / ελέγχου και την επακόλουθη είσοδο ισχύος για να δημιουργήσει την κίνηση κλίσης. Η θετική παραγωγή ενέργειας επιτυγχάνεται εάν η μέση ισχύς εξόδου από την κίνηση ανόδου είναι υψηλότερη από την ενεργειακή δαπάνη για την ενεργοποίηση. Στην πραγματικότητα, αυτή είναι η αρχή που υιοθετήθηκε από μια αρχική πλήρους μεγέθους πειραματική συσκευή, ένα σύστημα 150 kW που ονομάζεται «Stingray» που αναπτύχθηκε από την Engineering Business Ltd. στο Ηνωμένο Βασίλειο. Αυτή η συσκευή περιλαμβάνει ένα ενιαίο πτερύγιο με μήκος 15,5 μ. και χορδή 3 μέτρων εγκατεστημένο στα νησιά Shetland, στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η απόδοση ενεργειακής παραγωγής του συστήματος, ωστόσο, παραμένει πολύ κάτω από τις θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές με βάση τις προκαθορισμένες κινήσεις ανύψωσης / γωνίας.

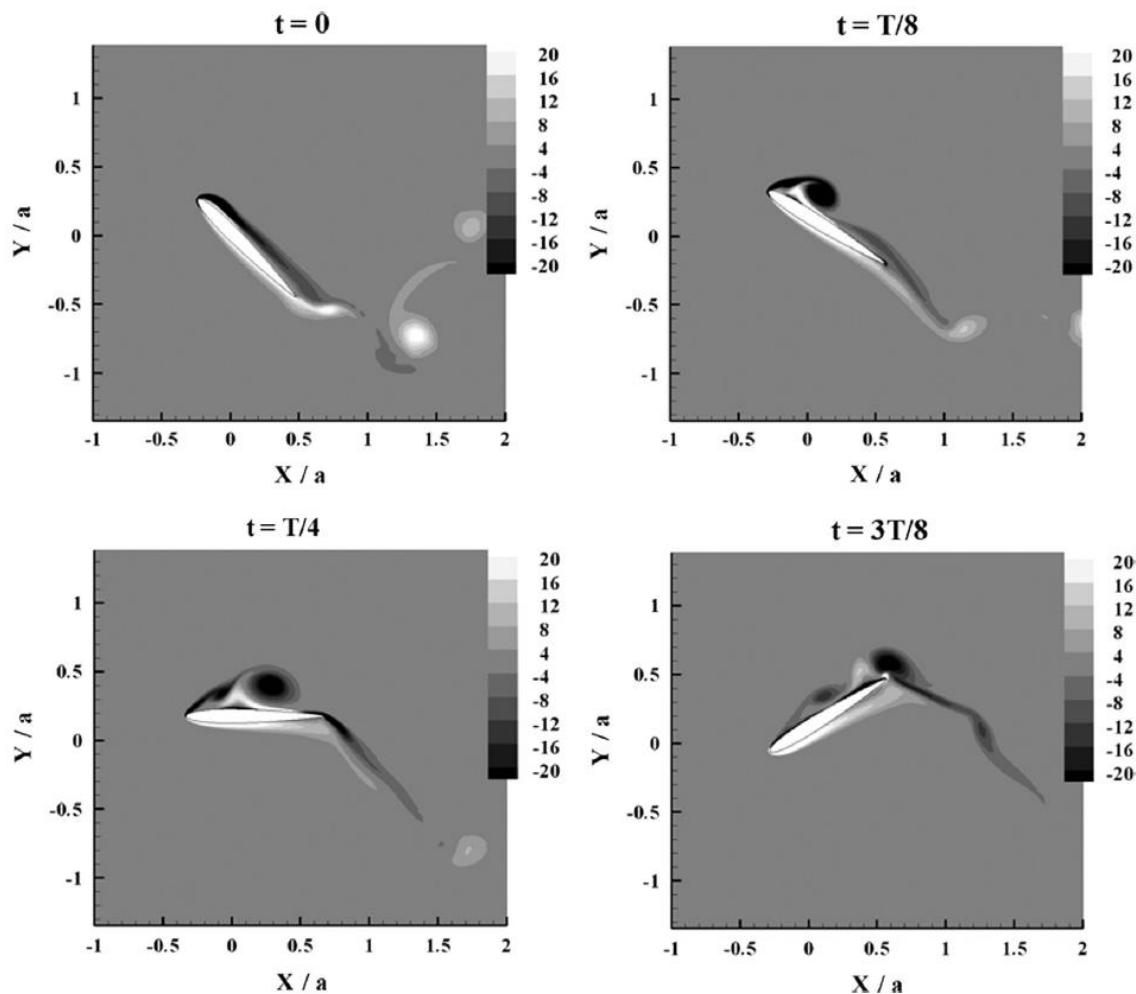
Για να διερευνηθεί η απόδοση ενός ημι-ενεργοποιημένου συστήματος σε διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων, έχουν αναπτυχθεί αρκετά αριθμητικά μοντέλα για να μελετηθούν οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ρευστού-δομής. Υποθέτοντας ότι η προκύπτουσα κίνηση είναι ημιτονοειδής, οι Shimizu et al. (2008) [82] χρησιμοποίησαν αλγόριθμους βελτιστοποίησης που βασίστηκαν σε δισδιάστατες λύσεις Navier-Stokes και έδειξαν ότι οι κινήσεις χαμηλής συχνότητας μεγάλου εύρους δημιουργούν μεγάλη εξαγωγή ενέργειας, ενώ οι κινήσεις μικρού πλάτους υψηλής συχνότητας οδηγούν σε υψηλή απόδοση.

Μελέτες για την αλληλεπίδραση του ρευστού σε σχέση με την δομή του πτερυγίου έχουν επίσης διεξαχθεί χρησιμοποιώντας ένα δισδιάστατο μοντέλο λεπτών πλακών και ένα τρισδιάστατο μοντέλο στοιχείων (Zhu et al., 2009 [76]). Αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε ένα



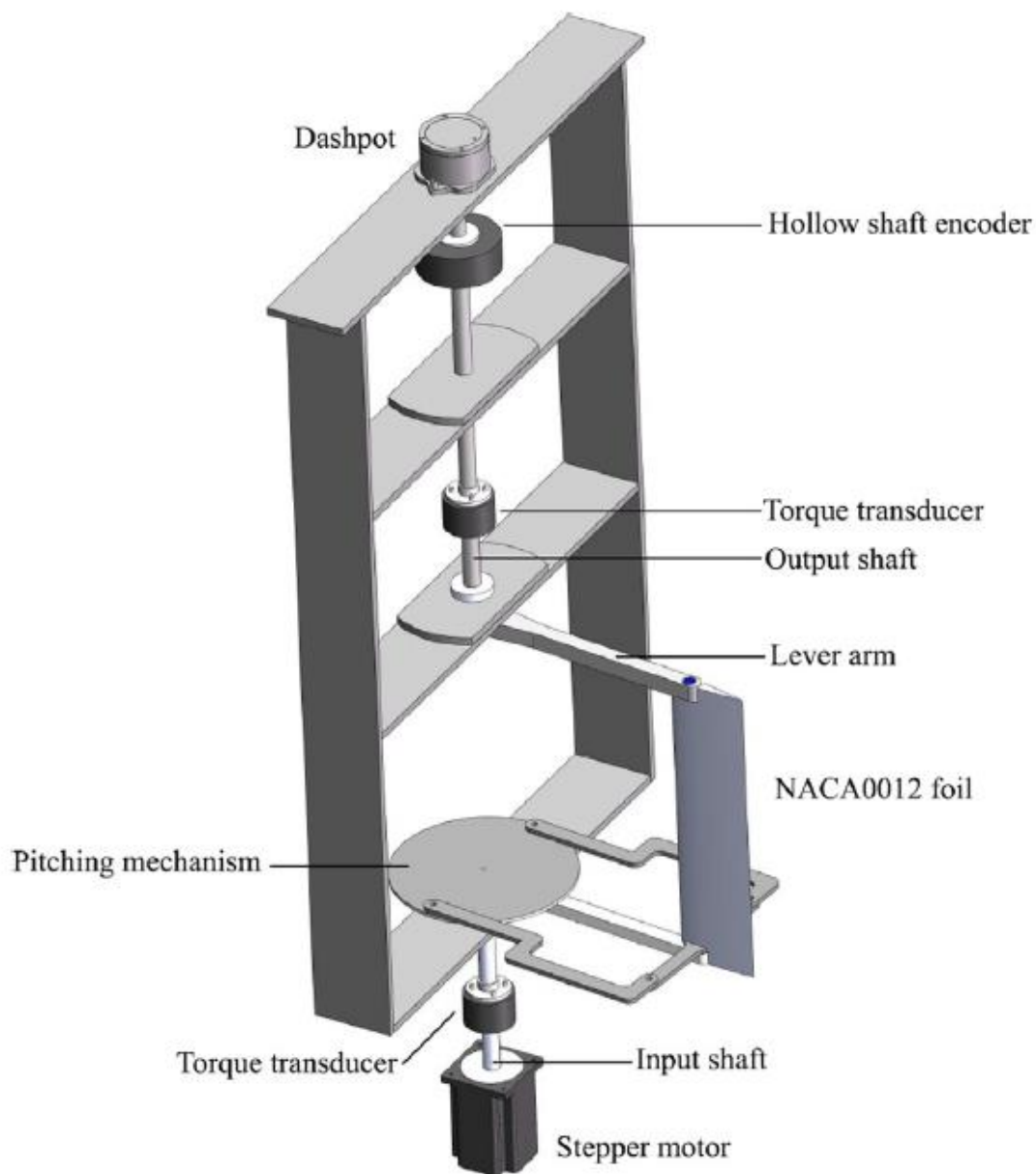
πλαίσιο δυναμικής ροής, το οποίο περιορίζεται σε μικρές αποτελεσματικές γωνίες προσβολής, αφού δεν συμπεριλαμβάνεται η επίδραση των LEV. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, με κινήσεις ημιτονοειδούς ταλάντωσης, η μέγιστη παραγωγή ισχύος υπολογίζεται θεωρητικά ως  $(\pi/8)\rho c s U_{\infty}^3 \theta_0^2$ . Σε αυτή τη μελέτες, απεδείχθη επίσης ότι η τρισδιάστατη επίδραση που σχετίζεται με μικρές αναλογίες μήκους χορδής θα μείωνε την απόδοση της συλλογής ενέργειας.

Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση των LEV (ειδικά των μηχανισμών ελέγχου του στροβιλισμού που μπορεί να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος), αυτό το πρόβλημα αλληλεπίδρασης ρευστού-πτερυγίου επανεξετάζεται χρησιμοποιώντας ένα δισδιάστατο μοντέλο Navier-Stokes (Zhu and Peng, 2009 [76]). Σε σύγκριση με τα μη ιξώδη μοντέλα, στις προσομοιώσεις CFD, η περιοχή χαμηλής πίεσης που παράγεται από τα LEV μπορεί να αυξήσει τη δύναμη ανύψωσης και να ενισχύσει την ικανότητα παραγωγής ενέργειας, ενώ η ιξώδης απόσβεση μπορεί να την μειώσει. Επιπροσθέτως, μέσω των αλληλεπιδράσεων δίνης-πτερυγίου η ενέργεια των στροβίλων στο άκρο του μπορεί να ανακτηθεί εν μέρει κοντά στην οπίσθια ακμή του πτερυγίου, υπό την προϋπόθεση ότι ο διαχωρισμός της πρόσθιας ακμής και η κίνηση του πτερυγίου είναι σωστά συγχρονισμένα (Εικ. 28).



**Εικ. 28.** Ένας μηχανισμός ελέγχου δινών που μπορεί να ενισχύσει τη συγκομιδή της ενέργειας. (Zhu and Peng, 2009 [76]).

Ένα εργαστηριακό πείραμα διεξήχθη πρόσφατα σε μια σήραγγα νερού στο Πανεπιστήμιο του Σίδνεϋ χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο μικρής κλίμακας του οποίου το μήκος χορδών είναι 0,1 m (Huxham, 2012 [54] · Huxham et al., 2012 [55]). Παρόμοια με το Stingray, σε αυτό το σχέδιο η συσκευή δεν υφίσταται γραμμική ανύψωση, αλλά κίνηση γωνιακής ανύψωσης (Εικ. 29). Μέσω συστηματικών δοκιμών, έχει αποδειχθεί ότι η μέγιστη απόδοση παραγωγής ενέργειας είναι περίπου 27%, που συμβαίνει στο πλάτος κλίσης των  $62^\circ$  και μια μειωμένη ταλαντευόμενη συχνότητα 0,1. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω του μηχανικού περιορισμού, το μέγιστο εύρος κλίσης σε αυτές τις δοκιμές συμβαίνει να είναι  $62^\circ$ . Η απόδοση του συστήματος πέρα από αυτό το σημείο δεν έχει μελετηθεί.



**Εικ. 29.** Ένα μοντέλο εργαστηριακής κλίμακας μιας ημι-ενεργοποιημένης συσκευής συγκομιδής ενέργειας ροής (Huxham, 2012 [54]).

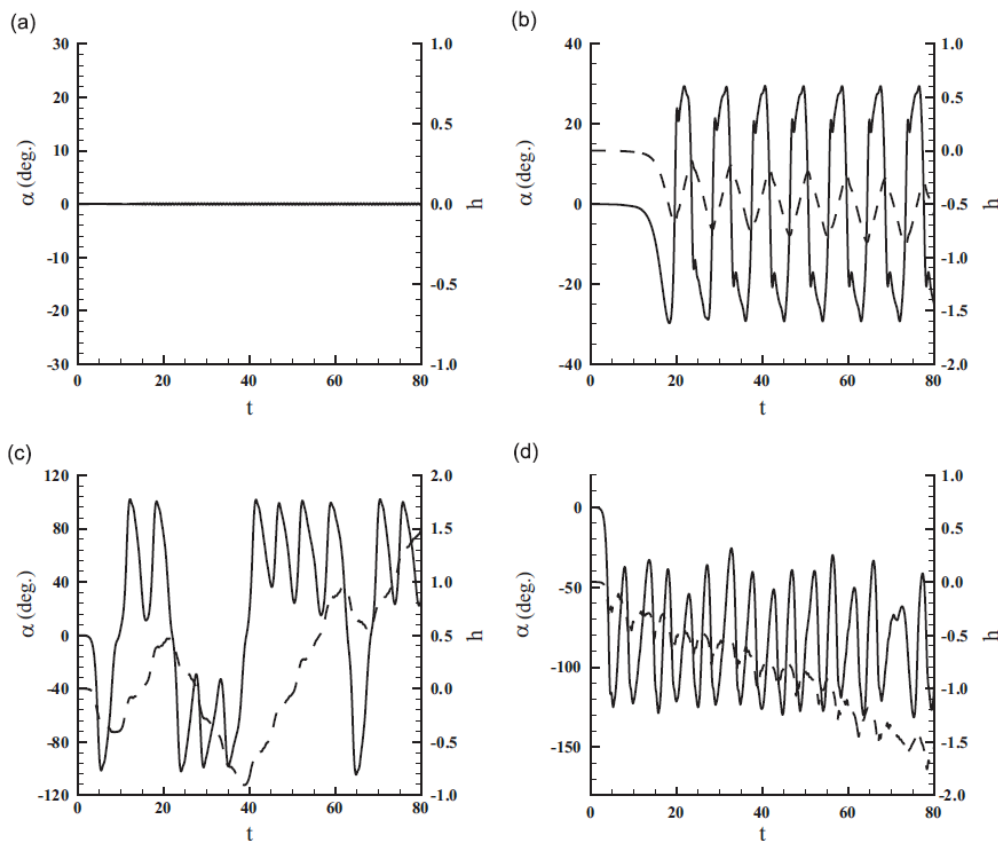
### 3.6 Ανασκόπηση των αυτοσυντηρούμενων συστημάτων

Χωρίς τα συστήματα ελέγχου και ενεργοποίησης για τη δημιουργία της γωνιακής κίνησης, ένα αυτοσυντηρούμενο σύστημα παρέχει μια μηχανικά απλούστερη εναλλακτική λύση. Σε ένα τέτοιο σχέδιο το πτερύγιο είναι ελεύθερο να αποκρίνεται στην εισερχόμενη ροή τόσο στην γωνιακή κατεύθυνση όσο και προς την κατεύθυνση άνωσης. Δεδομένου ότι το πτερύγιο είναι ουσιαστικά ελεύθερο, είναι κρίσιμο να προβλέψουμε την κίνησή του για ασφαλή και αποδοτική παραγωγή ενέργειας. Πράγματι, στις κινήσεις πτερυγισμού έχουν αναφερθεί τόσο περιοδικές

όσο και χαοτικές αποκρίσεις (Patil κ.ά., 2001 [114]). Η χαοτική απόκριση δεν είναι προβλέψιμη και ελέγξιμη και επομένως δεν είναι επιθυμητή σε μια μηχανή παραγωγή ενέργειας.

Για να διερευνηθούν οι πιθανότητες και οι απαιτήσεις για την επίτευξη περιοδικών αυτοσυντηρούμενων πτερυγίων για συγκομιδή ενέργειας υψηλής απόδοσης, πραγματοποιήθηκε αριθμητική μελέτη χρησιμοποιώντας ένα πλήρως συζευγμένο μοντέλο αλληλεπίδρασης ρευστού με βάση μια δισδιάστατη επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes (Peng and Zhu, 2009 [76]). Αυτή η μελέτη επικεντρώθηκε σε ένα απλό σχέδιο στο οποίο το πτερύγιο είναι τοποθετημένο σε μια βάση αποτελούμενη από ένα στρεπτικό ελατήριο για την κλίση και ένα γραμμικό αποσβεστήρα για την άνωση. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι η θέση του άξονα του pitch διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στον προσδιορισμό της δυναμικής του συστήματος. Συγκεκριμένα, ανάλογα με αυτόν τον παράγοντα καθώς και την αντοχή του στρεπτικού ελατηρίου έχουν εντοπιστεί τέσσερις διαφορετικές δυναμικές συμπεριφορές .

- Συμπεριφορά I: Η στατική απόκριση, η οποία συμβαίνει όταν ο άξονας περιστροφής είναι κοντά στην πρόσθια άκρη ή το περιστροφικό ελατήριο είναι επαρκώς ισχυρό έτσι ώστε το πτερύγιο να παραμείνει ακίνητο.
- Συμπεριφορά II. Περιοδικές κινήσεις γωνίας και ανύψωσης.
- Συμπεριφορά III. Χαοτικές αποκρίσεις κατά τις οποίες το πτερύγιο μεταβαίνει μεταξύ δύο σχεδόν περιοδικών τρόπων λειτουργίας.
- Συμπεριφορά IV. Ανατροπή του πτερυγίου, η οποία συμβαίνει όταν ο άξονας περιστροφής είναι κοντά στην πίσω άκρη.



**Εικ. 30.** Οι τέσσερις δυναμικές αποκρίσεις ενός πτερυγίου με ελεύθερες κινήσεις γωνίας και ανύψωσης: (α) Στατικό, (β) Περιοδική γωνία και ανύψωση, (γ) Χαοτικό με εναλλαγή τρόπου λειτουργίας και (δ) Ανατροπή του πτερυγίου.

Μεταξύ αυτών των τρόπων απόκρισης, η απόκριση II είναι η πλέον επιθυμητή για τη συγκομιδή ενέργειας λόγω της προβλεψιμότητας και της δυνατότητας ελέγχου της. Έχουν διεξαχθεί περαιτέρω μελέτες για την εξέταση της ενεργειακής απόδοσης αυτού του συστήματος στην απόκριση II. Βρέθηκε ότι σε ορισμένους συνδυασμούς στρεπτικής δυσκαμψίας ελατηρίου και θέσης άξονα περιστροφής, η κυρίαρχη συχνότητα απόκρισης (η μειωμένη συχνότητα) πλησιάζει το 0,12-0,15, που είναι και η βέλτιστη συχνότητα για τη συγκομιδή ενέργειας. Η αντίστοιχη μέγιστη τιμή απόδοσης παραγωγής ενέργειας είναι περίπου 20% (σε αριθμό Reynolds της τάξης των 1000).

Ένας σημαντικός περιορισμός των υφιστάμενων μελετών σχετικά με τα συστήματα παραγωγής ενέργειας με ταλαντευόμενα πτερύγια είναι ότι όλοι υποθέτουν ότι η εισερχόμενη ροή είναι ομοιόμορφη και σταθερή, κάτι που πιθανόν να μην υφίσταται. Πραγματικά πεδία ροής, π.χ. ποτάμια ή παλιρροιακά ρεύματα είναι συχνά μη ομοιόμορφα και μερικές φορές ασταθή. Αν και αυτές οι επιδράσεις μπορεί να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην παραγωγή ισχύος των ημι-ενεργοποιημένων συστημάτων, η επίδραση στα αυτοσυντηρούμενα συστήματα μπορεί να είναι πολύ πιο έντονη, καθώς τα πρότυπα απόκρισης μπορεί να αλλάξουν. Για να μελετηθούν αυτά τα αποτελέσματα, σε μια πρόσφατη μελέτη, διερευνήθηκε η δυναμική ενός αυτοσυντηρούμενου συστήματος παρόμοιου με το προαναφερθέν σε μια γραμμική ροή (Zhu, 2012 [97]). Τρεις από τους προηγούμενους τρόπους απόκρισης, οι συμπεριφορές II, III και IV, παραμένουν αμετάβλητες. Δύο επιπλέον συμπεριφορές έχουν επίσης ανακαλυφθεί. Η μια από

αυτές είναι μια κίνηση κύλισης στην οποία το πτερύγιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Το άλλο είναι μια ακανόνιστη κίνηση χωρίς εμφανές μοτίβο λειτουργίας.

### 3.7 Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη διατάξεων ταλαντευόμενων πτερυγίων έχει προκαλέσει ενδιαφέρον για τη βελτίωση της κατανόησης των υποκείμενων φυσικών μηχανισμών τους που συνδέονται με τη μηχανική των ρευστών και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ρευστών και πτερυγίων. Η ροή γύρω από τα ταλαντευόμενα πτερύγια περιλαμβάνει την τρισδιάστατη μετάβαση σε στροβιλισμό και τον διαχωρισμό ροής που συνδέεται με δομή μεγάλης κλίμακας δινών λόγω αστάθειας κινήσεων. Αυτές οι περίπλοκες ροές είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν με υπολογιστικές και πειραματικές μεθόδους. Λόγω των περιορισμένων γνώσεων σχετικά με αυτό το πολύπλοκο πρόβλημα, οι τρέχουσες προσεγγίσεις μηχανικής σχεδίασης χρησιμοποιούν γενικά σχεδόν σταθερή ανάλυση βασισμένη σε μοντέλα μειωμένης δυναμικής ρευστότητας. Κατά συνέπεια, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με τα ασταθή φορτία στα πτερύγια, ιδιαίτερα σε μεγάλες γωνίες προσβολής. Αυτό σημαίνει ότι τα τρέχοντα σχέδια πρέπει να σχεδιαστούν με συντηρητικά περιθώρια ασφαλείας, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος, ενώ οι στρατηγικές ελέγχου είναι κοστοβόρες, με αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής παραγωγής.

Από την άλλη πλευρά, η έρευνα σχετικά με τη δυναμική συμπεριφορά των συσκευών παραγωγής ενέργειας που αναλύθηκε παραπάνω είναι ακόμα σε βρεφικό στάδιο. Η πλειοψηφία των μελετών επικεντρώνονται σε συσκευές απλής πτέρυγας με χαμηλό αριθμό Reynolds. Οι περισσότερες προσομοιώσεις περιορίζονται επίσης σε δισδιάστατες ροές λόγω της πολυπλοκότητας της τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Αυτό διαφέρει σημαντικά από τις εμπορικές εφαρμογές οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιούν πολλαπλές πτέρυγες για καλύτερη απόδοση, χρησιμοποιούν πτερύγια με λόγο διαστάσεων σχετικά μικρό και λειτουργούν σε καθεστώς στροβιλισμού. Επιπλέον, οι υπάρχουσες μελέτες αφορούν κυρίως συστήματα με προδιαγεγραμμένες κινήσεις άνωσης. Τα ημι-ενεργοποιημένα συστήματα και τα αυτοσυντηρούμενα συστήματα δεν έχουν διερευνηθεί εκτενώς. Οι υπάρχουσες έρευνες αφορούν κυρίως τη φυσική γύρω από αυτά τα συστήματα, ενώ απαιτούνται περαιτέρω παραμετρικές μελέτες.

Από την άποψη της αποδοτικότητας της συλλογής ενέργειας, οι υπάρχουσες μελέτες έχουν δείξει ότι με τις προδιαγεγραμμένες ημιτονοειδείς κινήσεις αυτά τα ταλαντευόμενα συστήματα παραγωγής ενέργειας μπορούν να επιτύχουν μέγιστη απόδοση περίπου 30% σε μικρούς έως μέσους αριθμούς Reynolds (περίπου 1000). Με την προδιαγεγραμμένη μη ημιτονοειδή ταλάντωση, επιτυγχάνεται αυξημένη απόδοση έως και 40-50%. Άλλα μέτρα βελτίωσης της αποτελεσματικότητας περιλαμβάνουν τις αυλακώσεις στην επιφάνεια των πτερυγίων, τη δομική ευκαμψία και τα συστήματα πολλαπλών πτερυγίων. Με ημι-ενεργοποιημένα ή αυτοσυντηρούμενα συστήματα, η μέγιστη απόδοση είναι ελαφρώς χαμηλότερη (περίπου 20%). Μια ενδιαφέρουσα τάση είναι η εξάρτηση της αποδοτικότητας της παραγωγής ενέργειας από τον αριθμό Reynolds. Έχει αποδειχθεί ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds, η

αποτελεσματικότητα μπορεί επίσης να αυξηθεί. Η επίπτωση είναι ότι σε πραγματικές εφαρμογές η επιτεύξιμη αποτελεσματικότητα μπορεί να είναι ακόμη υψηλότερη από τις προβλέψεις με αριθμητικές προσομοιώσεις και πειράματα εργαστηριακής κλίμακας λόγω υψηλών αριθμών Reynolds.

Για να προετοιμαστεί ο δρόμος για την ανάπτυξη συστημάτων υψηλής απόδοσης με εμπορικές εφαρμογές, στο εγγύς μέλλον θα πρέπει να εξεταστούν οι ακόλουθες καίριες κατευθύνσεις για πειραματικές και αριθμητικές μελέτες:

(1) Διερεύνηση σε βάθος των επιδράσεων που έχει η τρισδιάστατη μορφή των πτερυγίων και η επίδραση του αριθμού Reynolds.

(2) Εκπόνηση μελετών αλληλεπίδρασης πλήρους συζεύξεως ρευστού-πτερυγίου για τη διερεύνηση όχι μόνο των ημι-ενεργοποιημένων και αυτοσυντηρούμενων συστημάτων αλλά και της επίδρασης της δομικής παραμορφώσεως του ίδιου του πτερυγίου.

(3) Συστηματικές μελέτες της συζευγμένης δυναμικής, συμπεριλαμβανομένης της φόρτισης ρευστού, της δομικής απόκρισης και ενός ολοκληρωμένου μοντέλου της γεννήτριας παραγωγής ενέργειας (και όχι των ιδανικών γραμμικών αποσβεστήρων που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες υπάρχουσες εργασίες). Συγκεκριμένα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αποτελεσματικότητα του μηχανικού συστήματος και του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας.

## ***Παράρτημα Α***

Κάτωθι παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας του συνόλου των υπολογιστικών και πειραματικών μελετών που έχουν γίνει και αφορούν τα ταλαντευόμενα πτερύγια [115]

Investigators	Analysis type	Foil number	Foil cross-section	Operation configuration	AR	Re	$f^*$	Plunging motion profile	$\phi_{1-2}$ (deg)	$X/c$	$\varphi$ (deg)	$h_0/c$	$\theta_0/\alpha_0$ (deg)	Pivot location	Efficiency
Ashraf et al. (2011)	CFD	1	NACA 0014	-	2D	20 000	0.8	Sinusoidal and non-sinusoidal	-	-	70-130	1.05	$\theta_0=70-130$	1/2	Max $\eta=34\%$ at non-sinusoidal; $\varphi=90^\circ$
Abiru and Yoshitake (2011)	Experiment	1	NACA 0015	Tandem	3	60 000-120 000	0.3	Induced	0-180	2, 4 and 6	110 and 90	0.19-0.7	$\theta_0=30, 45$ and $50$	1/2	20% Efficiency reduction but a better self-starting and self-driving ability $\eta=32-37\%$ at $U_\infty=1$ m/s
Campobasso and Profelnik (2012)	CFD	1	NACA 0015	-	2D	1100	0.14 and 0.18	Sinusoidal	-	-	90	1	$\theta_0=60$ and $76.33$	1/3	Max $\eta=35\%$
Dumas and Kinsey (2006)	CFD	1	NACA 0015	-	2D	500, 1100, 2400	0.12-0.18	Sinusoidal	-	-	90	1.0, 1.5	$\theta_0=70-80$	1/3	
Davids (1999)	Numerical simulation	1	NACA0012	-	2D	28 000-46 000	0.25-2.5	Sinusoidal	-	-	60-130	0.1-2.0	$\theta_0=7.71-76.31$	-0.3-1.3	$\eta=30.03\%$ at $f=1.975$ , $h_0/c=0.625$ , pivot location $=0.55$ , $\theta_0=94$
Huxham et al. (2012)	Experiment	1	NACA 0012	-	5.6	45 000	0.115-1.187	Induced	-	-	69.43-105.43	0.5264-0.8439	$\theta_0=35.5-105.43$	0.41 and 0.51	Max $\eta=23.8\%$ at $\alpha_0=58$ ; $f=0.1$
Jones and Platzer (1997)	Experiment	1	NACA 0012	-	3.4	45 000	0.025-0.2	Induced	-	-	Up to 1	Up to 1	$\theta_0=4-62$	1/4	
Jones et al. (1999)	Numerical simulation	1	NACA0012	-	2D	$\infty$	0.1-20	Sinusoidal	-	-	70-160	0.2	$\theta_0=0-15$	1/4	
Jones et al. (2003)	Numerical simulation	2	Helicopter rotor blade	Tandem	5.6	Up to 30 000	1.5-2.5	Sinusoidal	-	-	90	0.3	$\theta_0=25$ and $30$	1/2	Max $\eta=0.26$ at $\alpha_0=15$ , $f=1.6$ , $h_0/c=0.95$
Kinsey and Dumas (2008)	Experiment	1	NACA0014	Tandem	CFD 2D; exp 5.4	20 000 (laminar); 1 000 000 (turbulent) and 22 000	0.2-1.2; 0.65-0.98	Sinusoidal	9.6	9.6	80, 90, 100 and 110	1.3 and 1.4	$\theta_0=73$	1/4	
Kinsey et al. (2011)	Exp and simulation	1	NACA0015	-	2D	1100	0.06-0.2	Sinusoidal	-	-	90	0-1.5	$\theta_0=20-80$	1/3	Max $\eta$ at $f=0.75-1.1$ , $\alpha_0=70-80$
Kinsey and Dumas (2012a)	Experiment	2	NACA 0015	Tandem	7	480 000	0.12	Sinusoidal	180	5.4	90	1	$\theta_0=75$	1/3	Max $\eta=40\%$
Kinsey and Dumas (2012b)	CFD	1	NACA0015	-	7.0 (for 3D)	500 000	0.04-0.2	Sinusoidal	-	-	90	1	$\theta_0=75$	1/3	Max $\eta=40\%$ at $f=0.16$
Kinsey and Dumas (2012c)	CFD	2	NACA0015	Tandem	2D	500 000	0.04-0.2	Sinusoidal	180	5.4	90	0.75 and 1	$\theta_0=62-75$	1/3	Max $\eta=65\%$
Kinsey and Dumas (2012c)	CFD	1	NACA0015	-	5-10	500 000	0.14	Sinusoidal	-	-	90	1	$\theta_0=75$	1/3	



Investigators	Analysis type	Foil number	Foil cross-section	Operation configuration	AR	Re	$f^*$	Plunging motion profile	$\phi_{1-2}$ (deg)	$X/c$	$\varphi$ (deg)	$h_0/c$	$\theta_0/\alpha_0$ (deg)	Pivot location	Efficiency
Lindsey (2002)	Experiments	2	NACA0010; NACA0014 and NACA0018	Tandem	5.4	1 000 000 and 20 000	0.8, 1.0 and 1.3	Sinusoidal	90	4.8	80–110	1, 1.3, 2 and 2.1	$\alpha_0 = 10$ – $20$	12.5–80%	Max $\eta$ at $\phi_{1-2} = 90$ ; $\alpha_0 = 20$
Le et al. (2013)	Numerical simulation CFD	1	NACA 0008; NACA 0012 and scallop shell shape foil	-	2D	90 000	0.1–0.15	Sinusoidal	-	-	90	0.667–1.1	$\theta_0 = 55$ – $65$	1/3	
Liu et al. (2013)	CFD	1	NACA 0012	-	2D	1 000 000	0.05–0.25	Sinusoidal	-	-	90	0.5 and 1.0	$\alpha_0 = 0.5$ and 10	1/3	7.68% efficiency increase
McKinney and DeLaurier (1981)	Analytical and wind tunnel test	2	NACA0012	Parallel	-	85 000–110 000	0.39–0.71	-	180 and 3	-	-	0.3	$\theta_0 = 25$ – $30$	1/2	
Platzer and Bradley (2009)	Experiment	1	-	-	-	-	-	-	-	-	90	-	$\theta_0 = 50$ – $80$	1/2	
Platzer et al. (2010)	Experiment	1	NACA 0014	-	2.133	20 000	0.8	Sinusoidal	-	-	90	1.05	$\theta_0 = 73$	1/2	Max $\eta = 33\%$
Simpson et al. (2008a)	Experiment	1	NACA 0012	-	4.1, 5.9 and 7.9	13 800	0.2–0.6	Sinusoidal	-	-	90	1.23	$\theta_0 = 11$ – $57$	1/4	Max $\eta = 57\%$
Simpson et al. (2008b)	Experiment	1	NACA 0012	-	4.1, 5.9 and 7.9	13 800	0.2–0.6	Sinusoidal	-	-	90	1.23	$\theta_0 = 11$ – $57$	1/4	Max $\eta = 57\%$
Usoh et al. (2012)	CFD	1	NACA 0012 & non-profiled plate	-	2D	1100	0.6–1.2	Sinusoidal	-	-	90	1	$\theta_0 = 50$ – $90$	1/3	Max $\eta = 34.23\%$ at $f^* = 0.80$ and $\theta_0 = 75$
Xiao et al. (2012)	CFD	1	NACA0012	-	2D	10 000	0.05–0.45	Sinusoidal & Non-sinusoidal	-	-	90	0.5, 1.0	$\alpha_0 = 10, 20$	1/3	Max $\eta = 50\%$
Zhu (2011)	Numerical simulation	1	Joukowski foil	-	-	100–1000	0.06–0.2	Sinusoidal	-	-	90	0.5–2.0	$\theta_0 = 30$ and $90$	0.35 and 0.5	Max $\eta = 20\%$
Zhu and Peng (2009)	Numerical simulation	1	Joukowski foil	-	2D	1000	-	Induced	-	-	-	-	$\theta_0 = 15$ and $45$	1/3	
Zhu et al. (2009)	Numerical Simulation	1	NACA 0005 and NACA 0025	-	2–10	$\infty$	-	Induced	-	-	-	-	$\theta_0 = 10$ – $30$	0; 0.25; 0.5; 0.75 and 1	Max $\eta$ is $\pi \rho v U^3 \beta^2 / 8$
Zhu (2012)	Numerical Simulation	1	Joukowski foil	-	2D	1000	-	Induced	-	-	-	-	-	-	

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### 4.1 Εισαγωγή

Η δέσμευση της κινητικής ενέργειας από τα κύματα και η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία η οποία όπως αναφέρθηκε και σε ανωτέρω κεφάλαια συμπληρώνει το φάσμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σήμερα [98]. Σε σύγκριση με τους στροβίλους κάθετου και οριζόντιου άξονα [99], τα ταλαντευόμενα πτερύγια είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλο που αυτή η τεχνολογία είναι λιγότερο αποδοτική από τους στροβίλους οριζόντιου άξονα (μέχρι 45% [101]), μπορεί να λειτουργήσει σε σχετικά χαμηλής ταχύτητας ρεύμα ρευστού [100]. Το πτερύγιο έχει μια ορθογώνια περιοχή σαρώσεως επομένως όσον αφορά την παλιρροϊκή ενέργεια στα ρηγά νερά, θα αποσπά περισσότερη ισχύ από ένα στρόβιλο οριζόντιου άξονα καθώς το άνοιγμα του πτερυγίου μπορεί να επεκταθεί οριζόντια. Στο πλαίσιο της μακροπρόθεσμης λειτουργίας στη θάλασσα, ο στρόβιλος πρέπει να προβλέπει τη μεταβολή της τρέχουσας ταχύτητας και των κυμάτων. η εύκολη όμως συντήρηση και η αξιοπιστία του μηχανικού συστήματος θα είναι τα ζητήματα που προκύπτουν. Απαιτείται ένας ισχυρός και αξιόπιστος μετατροπέας ενέργειας.

Η συγκομιδή της ενέργειας μέσω ταλαντευόμενων πτερυγίων διερευνήθηκε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων. Εξετάστηκαν οι βέλτιστες παράμετροι για υψηλότερη απόδοση. Καθώς το πτερύγιο εκτελεί τις κινήσεις της ανύψωσης και της περιστροφής, η αποτελεσματική γωνία προσβολής του πτερυγίου και η εισερχόμενη ροή πρέπει να είναι θετική κατά την ανύψωση και να είναι αρνητική κατά τη διάρκεια της καθόδου [102]. Για να περιγράψουμε την ημιτονοειδή κίνηση του ταλαντευόμενου πτερυγίου, εισάγουμε τον Strouhal αριθμό, το ύψος της ανύψωσης, το πλάτος του βήματος και τη διαφορά φάσης, οι οποίοι συμβολίζονται ως  $St$ ,  $h_0$ ,  $\theta_0$ ,  $\epsilon$ , για να καθορίσουμε την τροχιά. Ορισμένες έρευνες [103-108] μελέτησαν τις επιπτώσεις αυτών των παραμέτρων στην αποτελεσματικότητα. Αναμένεται ότι η αποδοτικότητα μπορεί γενικά να ενισχυθεί με την αύξηση της αποτελεσματικής γωνίας προσβολής. Εμπνευσμένο από την μη-ημιτονοειδή κίνηση για πρόωση [109], οι μη ημιτονοειδείς κινήσεις ανύψωσης και γωνίας [110-112] εισήχθησαν για να βελτιώσουν την απόδοση.

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται η μελέτη μέσω αριθμητικής προσομοίωσης η απόδοση παραγωγής ενέργειας μιας γεννήτριας με ταλαντευόμενα πτερύγια. Η κίνηση ανύψωσης και η κίνηση κλίσης του πτερυγίου ρυθμίζονται μέσω μιας δομής τύπου στροφαλοφόρου άξονα. Οι

κινήσεις ανύψωσης και γωνίας του πτερυγίου μεταφέρονται στην περιστροφική κίνηση του κύριου άξονα. Χρησιμοποιείται ένα ζευγάρι οδοντωτών τροχών για την αύξηση της γωνίας βήματος. Ένα πρωτότυπο μπορεί να κατασκευαστεί με πλάτος βήματος  $\theta_0 = 60^\circ$  και το πείραμα μπορεί να εκτελεστεί σε μια σήραγγα ύδατος. Η συνολική απόδοση του μηχανισμού αναλύεται παρακάτω.

## 4.2 Περιγραφή της γεννήτριας ταλαντευόμενου πτερυγίου

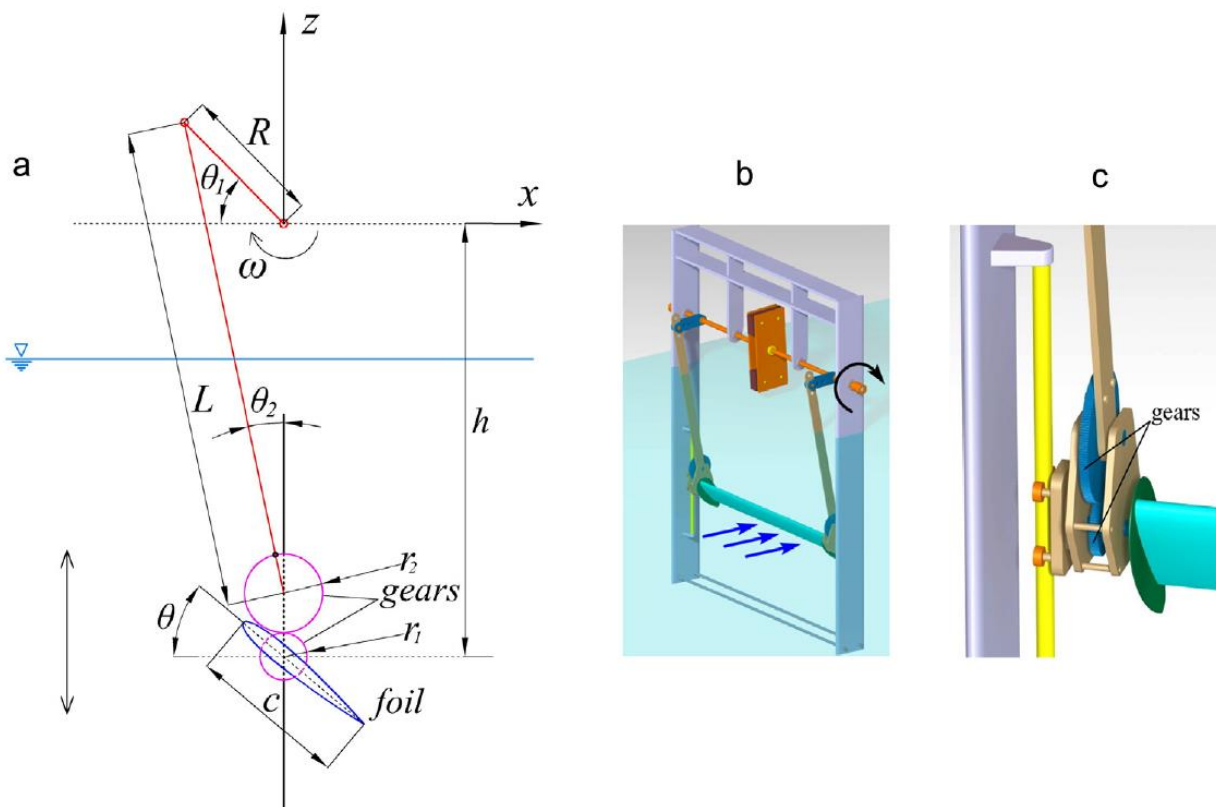
Το σχέδιο του μηχανισμού φαίνεται στην εικόνα 31. Το πτερύγιο θα ωθηθεί προς τα πάνω και προς τα κάτω κατά μήκος της τροχιάς κατακόρυφα όταν υποβληθεί σε υδατινό ρεύμα. Εδώ η κίνηση της ανύψωσης αναφέρεται στην κίνηση η οποία είναι κάθετη προς την ρεύμα. Ο στρόφαλος οδηγείται ώστε να περιστρέφεται δεξιόστροφα. Οι μάζες μόλυβδου, οι οποίες εκτελούν το ρόλο του σφονδύλου, στερεώνονται στο μέσο του άξονα. Η αδράνεια μπορεί να διατηρήσει την περιστροφική κίνηση καθώς ο βραχίονας στροφάλου περνάει από την υψηλότερη ή τη χαμηλότερη θέση. Ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 31 (γ), υιοθετείται για την αύξηση της γωνίας ανύψωσης. Ο λόγος μετάδοσης των οδοντωτών τροχών ορίζεται ως  $i = r_2 / r_1$ , όπου  $r_1$  και  $r_2$  είναι η ακτίνα αναφοράς των γραναζιών. Η κίνηση της ανύψωσης καθορίζεται από τον βραχίονα στροφάλου με μήκος  $R$  και τη συνδετική ράβδο του οποίου το μήκος είναι  $L$ . Η γωνία περιστροφής του βραχίονα στροφάλου συμβολίζεται ως  $\theta_1$ . Το σύστημα συντεταγμένων  $oxz$  είναι στο κέντρο του κύριου άξονα. Λαμβάνοντας  $\theta_1$  ως αναφορά, έχουμε την κίνηση ανύψωσης και την περιστροφική κίνηση του πτερυγίου.

$$\begin{aligned} \triangleright h(t) &= R \sin(\theta_1) - L \cos(\theta_2) - r_1 - r_2 = \\ &= R \sin(\theta_1) - L \cos \left[ \arcsin \left( \frac{-R \cos \theta_1}{L} \right) \right] - r_1 - r_2 \end{aligned}$$

$$\triangleright \theta(t) = -i\theta_2 = i \arcsin \frac{R \cos \theta_1}{L}$$

Ένα πρωτότυπο μπορεί να κατασκευαστεί όπως απεικονίζεται στην εικόνα 31. Ορισμένα μέρη μπορούν να κατασκευαστούν από ανοξείδωτο χάλυβα ή πλάκα βακελίτη. Ένα πτερύγιο NACA0015 με μήκος χορδής  $C = 8,0$  cm υιοθετείται. Το άνοιγμα του πτερυγίου είναι  $S = 64,0$  cm. Δύο ακραίες πλάκες στερεώνονται στα άκρα του πτερυγίου για να μειωθούν τα φαινόμενα

3D. Ο βραχίονας στροφαλοφόρου είναι  $R = 8,0 \text{ cm}$  και το μήκος της συνδετικής ράβδου είναι  $L = 43,9 \text{ cm}$ . Ο λόγος μετάδοσης των οδοντωτών τροχών είναι  $i = 5.714$ . Ως εκ τούτου, έχουμε το ονομαστικό πλάτος κίνησης  $\text{pitch } \theta_0 = 60^\circ$  όταν  $\theta_1 = 0$ . Δύο μάζες μόλυβδου με  $6,8 \text{ kg}$  είναι στερεωμένες στον κύριο άξονα. Ο μηχανισμός μπορεί να περιστρέφεται ομαλά καθώς εκκινείται από μια εξωτερική δύναμη. Ο άξονας συνδέεται με τον μετρητή ροπής και τη γεννήτρια. Ένας ροοστάτης ολίσθησης, με τη μέγιστη ηλεκτρική αντίσταση  $24$ , συνδέεται στο κύκλωμα της γεννήτριας. Οι γενικές παράμετροι του πτερυγίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.



**Εικ. 31.** Το σχέδιο της γεννήτριας ταλαντευόμενων πτερυγίων, (α) απεικόνιση του μηχανισμού (β) επισκόπηση (γ) Οι οδοντωτοί τροχοί και το σύστημα μετάδοσης.

**Πίνακας 4** Παράμετροι της γεννήτριας ταλαντευόμενων πτερυγίων.

Πτερύγιο	NACA 0015
Μήκος χορδής (C)	8.0 cm
Έκταση (S)	64.0 cm

Σημείο pivot (lc)	2.67 cm
Εύρος ανύψωσης (h <sub>0</sub> )	8.0 cm
Εύρος γωνίας (θ <sub>0</sub> )	60°

Το ρεύμα στη σήραγγα παράγεται από την κύρια πτερωτή που κινείται από έναν ηλεκτροκινητήρα ισχύος 40 KW. Πτερύγια οδηγοί και πλέγματα χρησιμοποιούνται για να παράγουν ένα ομοιόμορφο ρεύμα. Η τρέχουσα ταχύτητα U κυμαίνεται από 0 έως 2,0 m / s. Το μήκος της επιφάνειας εργασίας είναι περίπου 7 μέτρα. Ο χώρος εργασίας έχει ορθογώνια διατομή 1,70 m × 1,50 m (πλάτος × βάθος). Η γεννήτρια ταλαντευόμενου πτερυγίου είναι στερεωμένη στη μέση της περιοχής εργασίας της σήραγγας . Το όργανο μέτρησης της ροπής και η γεννήτρια συνδέονται με τον στροφαλοφόρο άξονα μέσω των συνδέσμων σταυροειδούς κεφαλής. Ο μετρητής ροπής έχει ελεγχθεί και ρυθμιστεί πριν από το πείραμα. Το σήμα εξόδου του μετρητή ροπής περιλαμβάνει τόσο τη ροπή όσο και τη γωνιακή ταχύτητα. Το σήμα καταλήγει στην κάρτα συλλογής δεδομένων. Το σφάλμα της στιγμιαίας ροπής είναι εντός του 0,02% και το σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας είναι εντός του 0,05%. Όταν το πτερύγιο βρίσκεται στην κορυφή του, η απόσταση του κέντρου της χορδής από την επιφάνεια του νερού είναι 19 cm, δηλαδή περίπου 2,4 φορές το μήκος της χορδής.

### 4.3. Πείραμα και ανάλυση δεδομένων

Το πείραμα μπορεί να εκτελεστεί με διάφορες τρέχουσες ταχύτητες. Η στιγμιαία περιστρεφόμενη ταχύτητα του άξονα  $r(t)$  και η αντίστοιχη ροπή  $M(t)$  καταγράφονται. Η μέση συχνότητα του άξονα  $f(t)$  σε περιόδους  $N$  ταλαντώσεων εκτιμάται ως εξής:

$$f_a = \frac{1}{NT} \int_t^{t+NT} f(t)dt = \frac{1}{60NT} \int_t^{t+NT} r(t)dt$$

Ο ονομαστικός αριθμός Strouhal ορίζεται ως:

$$St_a = \frac{2f_a R}{U}$$

Η μέση ισχύς του μηχανισμού σε περιόδους  $N$  ταλαντώσεων λαμβάνεται από την κάτωθι σχέση:

$$P_{test} = \frac{1}{NT} \int_t^{t+NT} M(t)\theta(t) dt = \frac{\pi}{30NT} \int_t^{t+NT} M(t)f(t) dt$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική μηχανική τριβή, πρέπει να αποκλειστούν οι μηχανικές απώλειες του συστήματος. Η ισχύς που υπολογίζεται από την ανωτέρω εξίσωση ( $P_{test}$ ) ισούται με τη συνολική ισχύ που δεσμεύεται από το ρεύμα του ρευστού μείον τις μηχανικές απώλειες  $P_{ML}$ . Για να εκτιμηθεί αυτές οι μηχανικές απώλειες, η ισχύς που απαιτείται για την κίνηση της γεννήτριας χωρίς το πτερόγιο σε διαφορετικές γωνιακές συχνότητες λαμβάνεται ως το σύνολο των μηχανικών απωλειών. Για την προσέγγιση των μηχανικών απωλειών χρησιμοποιείται πολυωνυμική προσαρμογή τρίτης τάξης. Έτσι έχουμε ότι:

$$P_{ML} = 0.000752 + 0.00272r - 0.00004173r^2 + 0.000000305r^3$$

Συγκρίνοντας τη δοκιμή με υδροπτέρυγα στη σήραγγα, οι δοκιμασμένες μηχανικές απώλειες των ρουλεμάν και των γραναζιών στον αέρα χωρίς υδροπτέρυγα θα είναι ελάχιστες. Το εκτιμώμενο  $P_{ML}$  θεωρείται ως ένα ελάχιστο όριο για τις πραγματικές μηχανικές απώλειες. Η αντίστοιχη ισχύς και αποδοτικότητα μπορούν να υπολογιστούν ως εξής

$$P_{exp} = P_{test} + P_{ML}$$

$$n_{exp} = \frac{P_{exp}}{0.5\rho dU^3}$$

όπου  $d$  είναι η μέγιστη κατακόρυφη έκταση του ταλαντευόμενου πτερυγίου.

Δοκιμές με διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες πραγματοποιούνται καθώς αλλάζουμε την ηλεκτρική αντίσταση του ροοστάτη. Σε χαμηλότερη περιστροφική ταχύτητα ή μικρότερο αριθμό  $Sta$ , η ισχύς του πρωτοτύπου αυξάνεται. φτάνοντας στο ανώτατο όριο του όταν ο  $Sta$  είναι περίπου 0,2 και μειώνεται καθώς ο  $Sta$  συνεχίζει να αυξάνεται. Όταν ληφθεί υπόψη ο ίδιος  $Sta$ , η ισχύς αυξάνεται αναλόγως με την ταχύτητα του ρεύματος. Ωστόσο, οι καμπύλες απόδοσης σε διαφορετικές ταχύτητες διέλευσης είναι πολύ κοντά. Μπορεί να φανεί ότι οι επιδράσεις της ταχύτητας του ρεύματος επηρεάζουν λιγότερο την απόδοση της γεννήτριας. Η κλίμακα των απωλειών θα αυξηθεί καθώς αυξάνει η  $P_{ML}$  και η εξερχόμενη ισχύς θα μειωθεί

όσο η ταχύτητα περιστροφής συνεχίζει να αυξάνεται. Η αναλογία της  $P_{ML}$  πάνω από τη μέγιστη ισχύ  $P_{max}$  λαμβάνεται ως ονομαστική κλίμακα των μηχανικών απωλειών.

#### 4.4 Αριθμητικές προσομοιώσεις και ανάλυση απόδοσης της γεννήτριας ταλαντευόμενων πτερυγίων

Το προτεινόμενο μηχανικό σύστημα αποτελείται από στροφαλοφόρους άξονες, γρανάζια και το πτερύγιο. Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι το συνολικό σύστημα λειτουργεί σε σχετικά σταθερή κατάσταση. Η γωνιακή ταχύτητα και η ροπή στρέψης του άξονα κυμαίνονται γύρω από τη μέση τιμή τους λόγω των δυναμικών συζεύξεων. Για να εκτελεστεί η αριθμητική προσομοίωση του πτερυγίου στο ρεύμα του ρευστού, θα υιοθετηθεί η μέση γωνιακή ταχύτητα του άξονα για να περιγράψουμε την κίνηση του άξονα. Στην αριθμητική προσομοίωση, η γωνιακή ταχύτητα του στροφαλοφόρου άξονα είναι σταθερή (ή  $\theta_1 = \omega t$ ). Η γωνιακή κίνηση της ράβδου σύνδεσης μπορεί να γραφτεί ως

$$\theta_2(t) = \arcsin \frac{-R \cos(\omega t)}{L}$$

$$\dot{\theta}_2(t) = \frac{R \omega \sin(\omega t)}{\sqrt{L^2 - R^2 (\cos \omega t)^2}}$$

Η κίνηση ανύψωσης του πτερυγίου γίνεται:

$$h(t) = R \sin \omega t - L \cos \left( \arcsin \frac{-R \cos \omega t}{L} \right) - r_1 - r_2$$

$$\dot{h}(t) = \omega R \cos \omega t - \frac{\omega R^2 \sin 2\omega t}{2\sqrt{L^2 - R^2 (\cos \omega t)^2}}$$

Η αντίστοιχη γωνιακή κίνηση του πτερυγίου μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\theta(t) = -i\theta_2 = i \arcsin \frac{R \cos \omega t}{L}$$

$$\dot{\theta}(t) = -i\dot{\theta}_2(t) = \frac{-i\omega R \sin \omega t}{\sqrt{L^2 - R^2 (\cos \omega t)^2}}$$

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις λαμβάνονται μέσω της ολοκλήρωσης της πίεσης. Η μέση ισχύς υπολογίζεται ως:

$$P_{cal} = P_L + P_M$$

και

$$c_p = \frac{P_{cal}}{0.5 \rho C U^3}$$

Όπου

$$P_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_3(\tau) \dot{h}(\tau) d\tau$$

και

$$P_M = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_5(\tau) \dot{\theta}(\tau) d\tau$$

είναι η μέση ισχύς που οφείλεται στην κατακόρυφη δύναμη και στη ροπή αντίστοιχα.

Η απόδοση βασισμένη σε αριθμητική προσομοίωση μπορεί να υπολογιστεί ως:

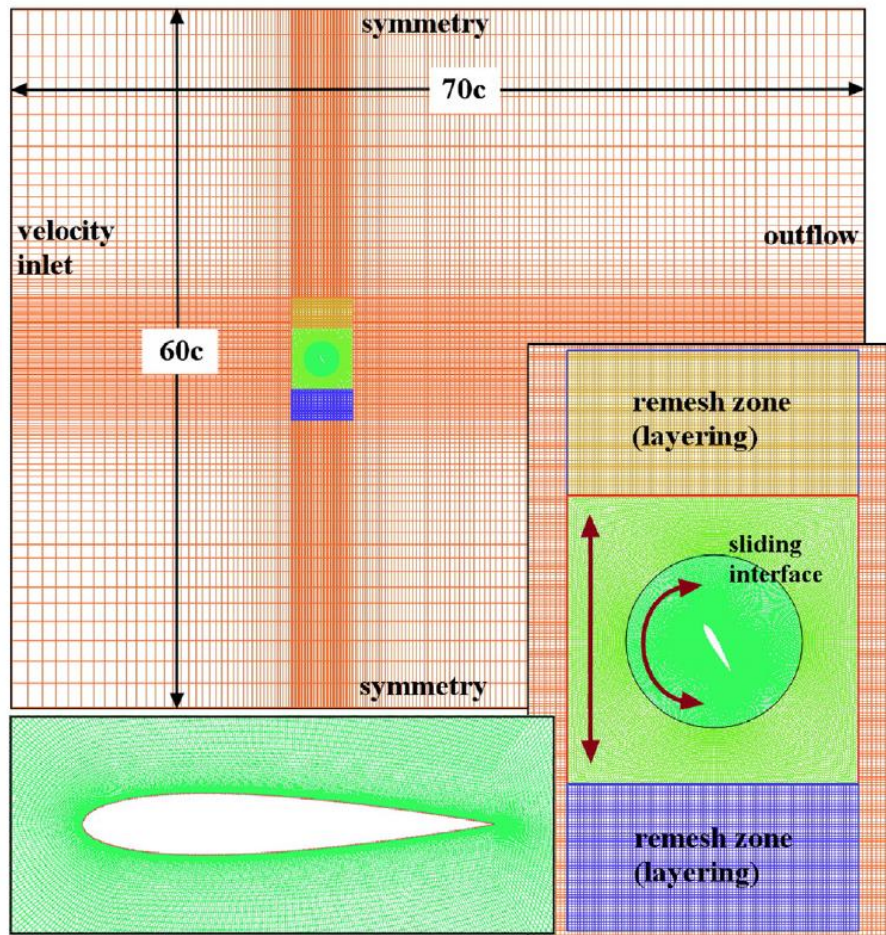
$$n_{cal} = \frac{P_{cal}}{0.5 \rho U^3 d}$$

Από την άποψη εξοικονόμησης ενέργειας, ο συντελεστής ισχύος και η απόδοση του πτερυγίου που λαμβάνεται μέσω των εξισώσεων θα είναι ίδια με τα αποτελέσματα που δοκιμάστηκαν στον άξονα. Οι προσομοιώσεις διεξάγονται χρησιμοποιώντας το εμπορικό πρόγραμμα CFD Fluent (έκδοση 14.5). Οι τεχνικές dynamic meshes και sliding meshes χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ταλαντευόμενης κίνησης του πτερυγίου. Η εικόνα 32 δείχνει τον υπολογιστικό τομέα και τις λεπτομέρειες του πλέγματος. Η κατάσταση μη ολίσθησης υιοθετείται στην επιφάνεια του πτερυγίου. Η ανάλυση του κοντινού σώματος στην επιφάνεια



του πτερυγίου ικανοποιεί το  $y^+ \approx 1$ . Οι παρούσες προσομοιώσεις χρησιμοποιούν μια προσέγγιση δισδιάστατων URANS (ασταθής Reynolds-μέση Navier-Stokes) με το μοντέλο στροβιλισμού Spalart - Allmaras μονής εξίσωση (παραγωγή με βάση το στέλεχος / στροβιλισμό).

Ο αλγόριθμος PISO επιλέγεται για τη σύζευξη πίεσης-ταχύτητας. Εξισώσεις δεύτερης τάξης χρησιμοποιούνται για την διακριτοποίηση της ορμής και του στροβιλώδους ιξώδους. Το μοντέλο PRESTO! χρησιμοποιείται για διακριτοποίηση πίεσης. Αρχικά μπορούν να εκτελεστούν δοκιμές του μεγέθους του πλέγματος και της χρονικής ανεξαρτησίας. Η κίνηση ημιτονοειδούς ανύψωσης μπορεί να ληφθεί ως  $h(t) = h_0 \sin \omega t$  και η γωνιακή κλίση ως  $\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \pi/2)$  με  $St = 0.28$ ,  $\theta_0 = 75^\circ$ ,  $h_0 = 1.0$ . Το μήκος της χορδής είναι  $C = 24$  cm και η ταχύτητα ροής του ρεύματος εισόδου είναι  $U = 2,08$  m / s. Δύο πυκνότητες πλεγμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Το πλέγμα χαμηλής πυκνότητας (πλέγμα α) μπορεί να έχει 75000 κελιά με 280 πλέγματα στην επιφάνεια του πτερυγίου και το πλέγμα υψηλής πυκνότητας (πλέγμα β) 140000 κελιά με 380 πλέγματα στην επιφάνεια του πτερυγίου. Επιλέγονται δύο χρονικές αναλύσεις ως  $t1 = T / 1000$  και  $t2 = T / 2000$ .



**Εικ. 32.** Υπολογισμός και λεπτομέρειες πλέγματος της προσομοίωσης του ταλαντευόμενου πτερυγίου.

#### 4.5. Τελικές παρατηρήσεις- Συμπεράσματα

Στο ανωτέρω κεφάλαιο έγινε αριθμητική διερεύνηση της απόδοσης μιας πρακτικής γεννήτριας ταλαντευόμενων πτερυγίων. Οι κινήσεις ανύψωσης και γωνίας του πτερυγίου μετατρέπονται σε περιστροφική κίνηση του άξονα διαμέσου δομών στροφαλοφόρου άξονα. Αν και η τροχιά του πτερυγίου περιορίζεται από τον στροφαλοφόρο άξονα και τα γρανάζια, ο προτεινόμενος σχεδιασμός έχει χαμηλές μηχανικές απώλειες.

Έτσι λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω στοιχεία και τις εξισώσεις που αναφέρονται, είναι δυνατόν σε επόμενη μελέτη να προσδιορίσουμε μέσω υπολογιστικού προγράμματος τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν την απόδοση του συστήματος και εν συνεχεία με

κατασκευή αντίστοιχης πειραματικής διάταξης να γίνει σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. [http://www.cronossecurity.com/?page\\_id=15](http://www.cronossecurity.com/?page_id=15)
- [2]. <http://taedexcelphoto.blogspot.gr/2014/02/how-to-photograph-wind.html>
- [3]. <http://www.kathimerini.gr/553811/article/epikairothta/perivallon/polla-gew8ermika-pedia-sthn-ellada-paramenoyn-anekmatalleyta>
- [4]. <http://iliessa.gr/>
- [5]. <http://blogs.sch.gr/9gymkall/2013/02/01/%CF%85%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CF%86%CF%81%CE%AC%CE%B3%CE%BC%CE%B1-%CF%84%CE%BF%CF%85-itaipu/>
- [6]. Ross, D. *Power from the waves*, 1995 (Oxford University Press, Oxford, UK).
- [7]. Salter, S. H. Wave power. *Nature*, 1974, 249(5459), 720–724.
- [8]. Thorpe, T. W. A brief review of wave energy, Technical reportno. R120, EnergyTechnology SupportUnit (ETSU), A report produced for the UK Department of Trade and Industry, 1999.
- [9]. Duckers, L. Wave energy. In *Renewable energy* (Ed. G. Boyle), 2nd edition, 2004, ch. 8 Oxford University Press, Oxford, UK).
- [10]. Callaghan, J. and Boud, R. *Future marine energy: results of the marine energy challenge: cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy*, Technical report, The Carbon Trust, January 2006.
- [11]. Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M.-T., Schild, B.-O., Sjöström, P., Sørensen, H. C., and Thorpe, T. *Wave energy in Europe: current status and perspectives*. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2002, 6(5), 405–431.
- [12]. Previsic, M. *Offshore wave energy conversion devices*, Technical report E21 EPRI WP-004-US-Rev 1, Electrical Power Research Institute, 2004.
- [13]. Wavegen. Available from [http://www.wavegen.co.uk/what\\_we\\_offer\\_limpet.htm](http://www.wavegen.co.uk/what_we_offer_limpet.htm) (access date 24 June 2008).
- [14]. Falnes, J. A review of wave-energy extraction. *Mar. Struct.*, 2007, 20, 185–201.
- [15]. Pelc, R. and Fujita, R. M. Renewable energy from the ocean. *Mar. Policy*, 2002, 26(6), 471–479.
- [16]. Power buoys. *The Economist*, 19 May 2001.
- [17]. Polinder, H. and Scutto, M. Wave energy converters and their impact on power systems. In *Proceedings of the 2005 International Conference on Future power systems*, 2005, pp. 1–9.
- [18]. Leijon, M., Danielsson, O., Eriksson, M., Thorburn, K., Bernhoff, H., Isberg, J., Sundberg, J., Ivanova, I., Sjöstedt, E., Ågren, O., Karlsson, K. E., and Wolfbrandt, A. An electrical approach to wave energy conversion. *Renew. Energy*, 2006, 31, 1309–1319.
- [19]. PelamisWave. Available from <http://www.pelamiswave.com> (access date 27 June 2008).
- [20]. OPT — Ocean Power Technology. Available from <http://www.oceanpowertechnologies.com/> (access date 1 July 2008).
- [21]. Pelamis. Available from <http://tinyurl.com/pelamis/> (access date 2 July 2008).

- [22]. *OPT Powerbuoy*. Available from <http://tinyurl.com/oceanpt/> (access date 2 July 2008).
- [23]. *Salter's Duck*. Available from <http://tinyurl.com/saltersduck> (access date 31 May 2009).
- [24]. Baker, N. J. and Mueller, M. A. *Direct drive wave energy converters (in French)*. *Revue des Energies Renouvelables*, 2001, 4(2), 1–7.
- [25]. *Archimedes Wave Swing*. Available from <http://tinyurl.com/archws1/> (accessed 2 July 2008).
- [26]. *Aquamarine Power*. Available from <http://www.aquamarinepower.com/> (access date 1 July 2008).
- [27]. *Aquamarine Power Oyster*. Available from <http://tinyurl.com/cn9k4k/> (access date 2 July 2008).
- [28]. *Oceanlinx*. Available from <http://www.oceanlinx.com/> (access date 4 September 2008).
- [29]. *Oscillating Water Column*. Available from <http://wavegen.co.uk/images/owc.jpg/> (access date 2 July 2008).
- [30]. *Wave Dragon*. Available from <http://tinyurl.com/wavegen1/> (access date 2 July 2008).
- [31]. *Wave Dragon schematic*. Available from <http://tinyurl.com/wavegen2/> (access date 2 July 2008).
- [32]. Mueller, M. A. *Electrical generators for direct drive wave energy converters*. *IEE Proc. Gener. Trans. Distrib.*, 2002, 149(4), 446–456.
- [33]. O'Sullivan, D. L. and Lewis, T. *Electrical machine options in offshore floating wave energy converter turbogenerators*. In *Proceedings of the Tenth World Renewable Energy Congress (WREC X)*, 2008, pp. 1102–1107.
- [34]. Tapia, A., Tapia, G., Ostolaza, J. X., and Saenz, J. R. *Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator*. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2003, 18(2), 194–204.
- [35]. Ackermann, T. and Söder, L. *Wind energy technology and current status: a review*. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2000, 4(4), 315–374.
- [36]. Thresher, R. W. and Dodge, D. M. *Trends in the evolution of wind turbine generator configurations and systems*. *Wind Energy*, 1998, 1(s 1), 70–86.
- [37]. Curran, R. and Gato, L. M. C. *The energy conversion performance of several types of wells turbine designs*. *Proc. IMechE, Part A: J. Power and Energy*, 1997, 211(A2), 133–145. DOI: 10.1243/0957650971537051.
- [38]. Torresi, M., Camporeale, S. M., Strippoli, P. D., and Pascazio, G. *Accurate numerical simulation of a high solidity wells turbine*. *Renew. Energy*, 2008, 33(4), 735–747.
- [39]. Kim, T.-H., Takao, M., Setoguchi, T., Kaneko, K., and Inoue, M. *Performance comparison of turbines for wave power conversion*. *Int. J. Therm. Sci.*, 2001, 40(7), 681–689.
- [40]. Salter, S. H., Taylor, J. R. M., and Caldwell, N. J. *Power conversion mechanisms for wave energy*. *Proc. IMechE, Part M: J. Engineering for the Maritime Environment*, 2002, 216(M1), 1–27. DOI: 10.1243/147509002320382103.
- [41]. Henderson, R. *Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter*. *Renew. Energy*, 2006, 31(2), 271–283.
- [42]. Scarr, D., Kollek, R., and Collier, D. *Wave energy: technology transfer & generic R&D recommendations*, Technical report ETSUV/06/00187//REP, Arup Energy, Ove Arup & Partners International, Report carried out under contract as part of the Sustainable Energy Programmes, managed by ETSU on behalf of the DTI, 2001.

- [43]. *Det Norske Veritas. Guidelines on design and operation of wave energy converters, Technical report, The Carbon Trust, May 2005.*
- [44]. *Taylor, J. Ocean wave energy: current status and future perspectives, 2008 (Springer, Berlin, Germany).*
- [45]. *Falcão, A. F.O. Modelling and control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic power take-off and gas accumulator. Ocean Engng, 2007, 24, 2021–2032.*
- [46]. *Ashraf, M.A., Young, J., Lai, J.C.S., Platzler, M.F., 2011. Numerical analysis of an oscillating-wing wind and hydropower generator. AIAA Journal 49 (7), 1374–1386.*
- [47]. *Abiru, H., Yoshitake, A., 2011. Study on a flapping wing hydroelectric power generation system. Journal of Environmental Engineering 6, 178–186.*
- [48]. *Belyayev, V.V., Zuyev, G.V., 1969. Hydrodynamic hypothesis of schooling in fish. Journal of Ichthyology 9, 578–584.*
- [49]. *Campobasso, M.S., Drofelnik, J., 2012. Compressible Navier–Stokes analysis of an oscillating wing in a power-extraction regime using efficient low-speed preconditioning. Computers and Fluids 67, 26–40.*
- [50]. *Deng, J., Shao, X.M., Yu, Z.S., 2007. Hydrodynamic studies of two wavy foils in tandem arrangement. Physics of Fluids 19, 113104.*
- [51]. *Dumas, G., Kinsey, T., 2006. Eulerian simulations of oscillating airfoils in power extraction regime. In: Rahman, Brebbia (Eds.), Proceedings in Advances in Fluid Mechanics VI, WIT Press, pp. 245–254.*
- [52].  *Davids, S.T., 1999. A Computational and Experimental Investigation of a Flutter Generator. Master thesis. Department of Aeronautics and Astronautics, Naval Postgraduate School.*
- [53]. *Grue, J., Mo, A., Palm, E., 1988. Propulsion of a foil moving in water waves. Journal of Fluid Mechanics 186, 393–417.*
- [54]. *Huxham, G., 2012. Experimental Investigation of an Oscillating Foil Tidal Stream Energy Converter. Master thesis. The University of Sydney.*
- [55]. *Huxham, G., Cochard, S., Patterson, J., 2012. Experimental parametric investigation of an oscillating hydrofoil tidal stream energy converter. In: Proceedings of 18th Australasian Fluid Mechanics Conference AFMC 2012. Australasian Fluid Mechanics Society, Launceston, Tasmania.*
- [56]. *Isshiki, H., Murakami, M., 1984. A theory of wave devouring propulsion. Journal of Society of Naval Architecture Japan 156, 102–114.*
- [57]. *Jones, K.D., Platzler, M.F., 1997. Numerical Computation of Flapping-wing Propulsion and Power Extraction. AIAA Paper 97-0826.*
- [58]. *Jones, K.D., Davids S.T., Platzler, M.F., 1999. Oscillating-wing power generation. In: Proceedings of 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference.*
- [59]. *Jones, K.D., Lindsey, K., Platzler, M.F., 2003. An investigation of the fluid–structure interaction in an oscillating-wing micro-hydropower generator. Fluid Structure Interaction II, vol. 2. WIT Press, Southampton, England, UK 73–82.*
- [60]. *Katz, J., Weihs, D., 1978. Hydrodynamic propulsion by large amplitude oscillation of an airfoil with chordwise flexibility. Journal of Fluid Mechanics 88 (3), 485–497.*
- [61]. *Kerr, D., 2007. Marine energy. Philosophical Transactions of the Royal Society A 365, 971–992.*

- [62]. Kesel, A.B., 2000. Aerodynamic characteristics of dragonfly wing sections compared with technical aerofoils. *Journal of Experimental Biology* 203, 3125–3135.
- [63]. Kinsey, T., Dumas, G., 2008. Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime. *AIAA Journal* 46 (6), 1318–1330.
- [64]. Kinsey, T., Dumas, G., 2012a. Computational fluid dynamics analysis of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils. *Journal of Fluids Engineering* 134 (2), 021104.
- [65]. Kinsey, T., Dumas, G., 2012b. Optimal tandem configuration for oscillating-foils hydrokinetic turbine. *Journal of Fluids Engineering* 134 (3), 031103.
- [66]. Kinsey, T., Dumas, G., 2012c. Three-dimensional effects on an oscillating-foil hydrokinetic turbine. *Journal of Fluids Engineering* 134, 071105.
- [67]. Langhamer, O., Haikonen, K., Sundberg, J., 2010. Wave power – sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1329–1335.
- [68]. Le, T.Q., Ko, J.H., Byun, D.Y., 2013. Morphological effect of a scallop shell on a flapping-type tidal stream generator. *Bioinspiration and Biomimetics* 8, 036009.
- [69]. Lefrancois, J., 2008. Optimisation de rendement d'une turbine multi-ailes a l'aide d'une methode Lagrangienner par particules vortex. M.S. thesis. Laval University, Quebec City, Canada.
- [70]. Licht, S., Wibawa, M., Hover, F.S., Triantafyllou, M.S., 2010. In-line motion causes high thrust and efficiency in flapping foils that use power downstroke. *Journal of Experimental Biology* 213, 63–71.
- [71]. Lindsey, K.A., 2002. A feasibility study of oscillating-wing power generators. M.S. thesis. Department of Aeronautics and Astronautics, Naval Postgraduate School.
- [72]. Liu, W.D., Xiao, Q., Cheng, F., 2013. A bio-inspired study on tidal energy extraction with flexible flapping wings. *Bioinspiration and Biomimetics* 8, 1–16.
- [73]. Massoud, H., Alexeev, A., 2010. Resonance of flexible flapping wings at low Reynolds number. *Physical Review E* 81, 056304.
- [74]. McKinney, W., DeLaurier, J., 1981. The wingmill: an oscillating-wing wind-mill. *Journal of Energy* 5, 109–115.
- [75]. Michelin, S., Stefan, G., Llewellyn, S., 2009. Resonance and propulsion performance of a heaving flexible wing. *Physics of Fluids* 21, 071902.
- [76]. Peng, Z., Zhu, Q., 2009. Energy harvesting through flow-induced oscillations of a foil. *Physics of Fluids* 21, 123602.
- [77]. Platzer, M.F., Bradley, R.A., 2009. Oscillating-wing power generator with flow-induced pitch-plunge phasing. IPC8 Class: AF03D900FI USPC Class: 290 55 US Patent.
- [78]. Platzer, M., Ashraf, M., Young, J., Lai, J., 2010. Extracting power in jet streams: pushing the performance of flapping wing technology. In: 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. International Council of the Aeronautical Sciences Paper 2010-2.9.1. September 19–24, 2010, Nice, France.
- [79]. Ramanarivo, S., Godoy-Diana, R., Thiria, B., 2011. Rather than resonance, flapping wing flyers may play on aerodynamics to improve performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 1017910108.

- [80]. Simpson B.J., Hover, F.S., Triantafyllou, M.S., 2008a. *Experiments in direct energy extraction through flapping foils*. In: *Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. July 6–11, 2008, Canada.
- [81]. Simpson, B.J., Licht, S., Hover, F.S., Triantafyllou, M.S., 2008b. *Energy extraction through flapping foils*. In: *Proceedings of 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE-2008-58043*.
- [82]. Shimizu, E., Isogai, K., Obayashi, S., 2008. *Multiobjective design study of a flapping wing power generator*. *Journal of Fluids Engineering* 130, 021104.
- [83]. Shoele, K., Zhu, Q., 2013. *Performance of a wing with nonuniform flexibility in hovering flight*. *Physics of Fluids* 25, 041901.
- [84]. Thiria, B., Godoy-Diana, R., 2010. *How wing compliance drives the efficiency of self-propelled flapping flyers*. *Physical Review E* 82, 015303.
- [85]. Triantafyllou, M.S., Triantafyllou, G.S., Gopalkrishnan, R., 1991. *Wake mechanics for thrust generation in oscillating foils*. *Physics of Fluids A* 3, 2835–2837.
- [86]. Triantafyllou, G.S., Triantafyllou, M.S., Grosenbaugh, M.A., 1993. *Optimal thrust development in oscillating foils with application to fish propulsion*. *Journal of Fluids and Structures* 7, 205–224.
- [87]. Triantafyllou, M.S., Techet, A.H., Hover, F.S., 2004. *Review of experimental work in biomimetic foils*. *IEEE Journal of Ocean Engineering* 29, 585–594.
- [88]. Usuh, C.O., Young, J., Lai, J.C.S., Ashraf, M.A., 2012. *Numerical analysis of a non-profiled plate for flapping wing turbines*. In: *Proceedings of the 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, Launceston, Australia*.
- [89]. Westwood, A., 2004. *Ocean power wave and tidal energy review*. *Refocus* 5, 50–55.
- [90]. Wu, T.Y., 1972. *Extraction of flow energy by a wing oscillating in waves*. *Journal of Ship Research* 16, 66–78.
- [91]. Wu, T.Y., Chwang, A.T., 1975. *Extraction of flow energy by fish and birds in a wavy stream*. In: *Proceedings of the Symposium on Swimming and Flying in Nature*. Plenum Press, New York.
- [92]. Xiao, Q., Liao, W., Yang, S.C., Peng, Y., 2012. *How motion trajectory affects energy extraction performance of a biomimic energy generator with an oscillating foil?* *Renewable Energy* 37, 61–75.
- [93]. Yin, B., Luo, H., 2010. *Effect of wing inertia on hovering performance of flexible flapping wings*. *Physics of Fluids* 22, 111902.
- [94]. Zhu, Q., Wolfgang, M., Yue, D.K.P., Triantafyllou, M.S., 2002. *Three-dimensional flow structures and vorticity control in fish-like swimming*. *Journal of Fluid Mechanics* 468, 1–28.
- [95]. Zhu, Q., 2007. *Numerical simulation of a flapping foil with chordwise or spanwise flexibility*. *AIAA Journal* 45 (10), 2448–2457.
- [96]. Zhu, Q., 2011. *Optimal frequency for flow energy harvesting of a flapping foil*. *Journal of Fluid Mechanics* 675, 495–517.
- [97]. Zhu, Q., 2012. *Energy harvesting by a purely passive flapping foil from shear flows*. *Journal of Fluids and Structures* 34, 157–169.
- [98]. J.F. Mercure, P. Salas, *An assessment of global energy resource economic potentials*, *Energy* 46 (2012) 322–336.



- [99]. F.O. Rourke, F. Boyle, A. Reynolds, *Tidal energy update 2009*, *Appl. Energy* 87(2010) 398–409.
- [100]. Q. Xiao, Q. Zhu, *A review on flow energy harvesters based on flapping foils*, *J. Fluids Struct.* 46 (2014) 174–191.
- [101]. M. Ragheb, A.M. Ragheb, *Wind turbines theory—the Betz equation and optimal rotor tip speed ratio*, in: R. Carriveau (Ed.), *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Intech Open Access, Rijeka, Croatia, 2011, <http://dx.doi.org/10.5772/731>.
- [102]. K.D. Jones, M.F. Platzer, *Numerical computation of flapping-wing propulsion and power extraction*, *AIAA J.* (1997) 97–0826.
- [103]. S.T. Davids, *A Computational and Experimental Investigation of a Flutter Generator. Master Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Naval Postgraduate School, 1999.*
- [104]. T. Kinsey, G. Dumas, *Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime*, *AIAA J.* 46 (2008) 1318–1330.
- [105]. M.A. Ashraf, J. Young, J.C.S. Lai, M.F. Platzer, *Numerical analysis of an oscillating-wing wind and hydropower generator*, *AIAA J.* 49 (2011) 1374–1386.
- [106]. Q. Zhu, Z.L. Peng, *Mode coupling and flow energy harvesting by a flapping foil*, *Phys. Fluids* 21 (2009) 033601.
- [107]. Q. Zhu, *Optimal frequency for flow energy harvesting of a flapping foil*, *J. Fluid Mech.* 675 (2011) 495–517.
- [108]. G.D. Xu, G.X. Wu, *Boundary element simulation of inviscid flow around an oscillatory foil with vortex sheet*, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 37 (2013) 825–835.
- [109]. D.A. Read, F.S. Hover, M.S. Triantafyllou, *Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering*, *J. Fluids Struct.* 17 (2003) 163–183.
- [110]. Q. Xiao, W. Liao, S.C. Yang, Y. Peng, *How motion trajectory affects energy extraction performance of a biomimic energy generator with an oscillating foil*, *Renew. Energy* 37 (2012) 61–75.
- [111]. K. Lu, Y. Xie, D. Zhang, *Nonsinusoidal motion effects on energy extraction performance of a flapping foil*, *Renew. Energy* 64 (2014) 283–293.
- [112]. L. Teng, J. Deng, D. Pan, X. Shao, *Effects of non-sinusoidal pitching motion on energy extraction performance of a semi-active flapping foil*, *Renew. Energy* 85 (2015) 810–818.
- [113]. T. Kinsey, G. Dumas, *Three-dimensional effects on an oscillating-foil hydrokinetic turbine*, *J. Fluids Eng.* 134 (2012) 071105.
- [114]. Patil, M.J., Hodges, D.H., Cesnik, C.E.S., 2001. *Limit-cycle oscillations in high-aspect-ratio wings*. *Journal of Fluids and Structures* 15 (1), 107–132.
- [115]. *A review on flow energy harvesters based on flapping foils*, Qing Xiao, Qiang Zhu Department of Naval Architecture & Marine Engineering, University of Strathclyde , Glasgow (2013)