



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Προκαταρκτικός σχεδιασμός μηχανής
εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας»*

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Κατσιδονιωτάκη Ειρήνης

Επιβλέπων

Δ. Παπαντώνης, Καθηγητής,

Τμήμα: Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Στον πατέρα μου, στην μητέρα μου,
στην αδερφή μου Μαρία
και στην γιαγιά μου την Ειρήνη..

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτρη Παπαντώνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε προτείνοντας μου το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά και για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Κασσάνο που συμμετείχε στην επίβλεψη της εργασίας, για την συνεχή στήριξη και καθοδήγηση. Ακόμα, ευχαριστώ όλα τα παιδιά του εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών του ΕΜΠ για την καλή σχέση που αναπτύξαμε όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου καθώς τους οφείλω τα πάντα μέχρι σήμερα.

Περίληψη

Η ενέργεια που προέρχεται από τον θαλάσσιο κυματισμό (κυματική ενέργεια) μπορεί να έχει αξιοσημείωτη συνεισφορά στην συνολική παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) σε διεθνές επίπεδο. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες εκμετάλλευσης κυματικού δυναμικού μία εξ' αυτών είναι η Ταλαντευόμενη Στήλη Ύδατος - Oscillating Water Column (OWC). Στη συσκευή αυτή η μετατροπή κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται συνήθως μέσω της μηχανής Wells. Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ο προκαταρκτικός σχεδιασμός της στροβιλομηχανής Wells για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας (παροχή και πίεση αέρα). Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός ακολουθεί η υπολογιστική επίλυση της ροής του αέρα που διέρχεται από τη μηχανή με τη βοήθεια του εμπορικού πακέτου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Ansys Fluent. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή και παρουσίαση των τεχνολογιών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας με έμφαση στις OWC συσκευές και στις μηχανές Wells. Επίσης παρατίθενται παραδείγματα από πραγματικά έργα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας που έχουν υλοποιηθεί. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 2 συγκεντρώνονται συνοπτικά τα μεγέθη που περιγράφουν το κύμα, η μαθηματική θεωρία περιγραφής του κύματος (θεωρία Airy) καθώς και ο υπολογισμός της διαθέσιμης ενέργειας που μπορεί να αποδώσει. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο που περιγράφει τη ροή των ρευστών. Γίνεται αναφορά στις εξισώσεις Navier- Stokes και στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσής τους. Επίσης γίνεται αναφορά στην διακριτοποίηση του χωρίου (meshing) και στη σπουδαιότητα του σωστού πλέγματος στα αποτελέσματα της υπολογιστικής επίλυσης. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται εκτενέστερα η λειτουργία των OWC συσκευών καθώς και των μηχανών Wells. Περιγράφεται η αρχή λειτουργίας ενώ παράλληλα διατυπώνονται οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία τους καθώς και οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Στο Κεφάλαιο 5 αναπτύσσεται η μεθοδολογία σχεδιασμού της μηχανής Wells για συγκεκριμένη εφαρμογή με βάση δεδομένα που διέθεσε η σχολή Ναυπηγών Μηχανικών του ΕΜΠ. Αρχικά σχεδιάστηκαν κάποιες γεωμετρίες οι οποίες δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Μετά από αναθεώρηση της μεθοδολογίας σχεδίασης ήταν δυνατή η εύρεση της κατάλληλης γεωμετρίας μηχανής Wells ώστε να λειτουργεί στο σημείο σχεδιασμού που ορίζεται. Παράλληλα μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών παραμέτρων στην απόδοση της μηχανής. Συγκεκριμένα μελετάται η επίδραση της γεωμετρικής παραμέτρου solidity και hub to tip ratio (Κεφάλαιο 6). Λαμβάνονται αρκετές περιπτώσεις όπου σε καθεμιά οι τιμές των παραμέτρων αυτών μεταβάλλονται. Από τα διαγράμματα λειτουργίας της κάθε γεωμετρίας καθώς και από την ανάλυση του πεδίου ροής ήταν δυνατό να κατανοηθεί η συμπεριφορά της μηχανής σε διάφορες συνθήκες όταν αλλάζει η γεωμετρία. Τέλος, η παράμετρος Tip clearance ή αλλιώς το διάκενο μεταξύ του ακροπτερυγίου και του κελύφους, αποτελεί σημαντική σχεδιαστική παράμετρο. Στο Κεφάλαιο 7 αναλύεται εκτενώς η επίδρασή του. Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής επίλυσης, εκτός της δυνατότητας που παρέχεται να απεικονίζονται σε μορφή διαγραμμάτων, υπάρχει η δυνατότητα της οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων. Οι εικόνες κατανομής μεγεθών (ταχύτητας, πίεσης) ή η δυνατότητα απεικόνισης των ροϊκών γραμμών αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση της λειτουργίας της μηχανής Wells. Συμπερασματικά, οι OWC συσκευές και οι μηχανές Wells μπορούν να συνεισφέρουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ με ικανοποιητικό βαθμός απόδοσης αλλά και η αποδιδόμενη ισχύς. Για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος η συγκεκριμένη μηχανή λειτουργεί μαζί με άλλες συσκευές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως είναι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Λέξεις Κλειδιά:

Wells, κυματική ενέργεια, solidity, hub to tip ratio, tip clearance

Abstract

Wave energy has significant contribution to the international total energy production from renewable energy resources (RES). One of the most intensively studied principles of harnessing the energy from ocean waves is the Oscillating Water Column device (OWC). The OWC converts the motion of the water waves into a bi-directional airflow, which in turn drives an air turbine. The bi-directional axial Wells turbine as a candidate for oscillating water column power take - off systems was the object of this diploma theses. This theses deals with the preliminary design of Wells turbine for a given plant site (air pressure and flow rate). Detailed CFD analysis of the steady flow in a Wells turbines is conducted using the commercial software Ansys Fluent. Chapter 1 consists of introductory information about wave energy emphasizing at OWC devices and Wells turbines. The history of wave energy is presented and the converters categorized according to how they operate. In chapter 2 the theoretical background for wave analysis is described: The wave parameters for the modulation, mathematical approach to describe the wave motion (Airy Theory) and evaluation of available wave energy. In Chapter 3, mathematical theory of computational fluid dynamics, Navier-Stokes equations and numerical methods used for the solution are referred as the base tools of solution. Furthermore in this chapter the discretization of the computational domain and the role of a good quality mesh in order to achieve good results are explained. Chapter 4 particularly analyses basic principles of OWC devices and Wells turbines. and presents the effect of geometrical parameters in the performance of these turbines. In chapter 5 the preliminary design of turbine is conducted based on real data measured by the department of Naval engineering of NTUA. The significance of various design parameters is investigated in Chapter 6, with special interest on solidity and hub to tip ratio. Finally, a great part of the analysis is related to the effect of tip clearance on the efficiency of Wells turbine (Ch. 7). Within the framework of the present diploma, interesting results are concluded. For the better comprehension of the results, diagrams contours and stream lines are included. In conclusion. Wells turbines contribute to electrical energy production with an environmental friendly manner. The efficiency and the output power achieve sufficient rates but in order to achieve the best results, it is recommended a hybrid offshore system which combines wind and wave power for electricity generation.

Keywords:

Wells turbines, wave energy, solidity, hub to tip ratio, tip clearance

Περιεχόμενα

1. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	3
1.1. Εισαγωγή	3
1.2. Ιστορική αναδρομή στην εκμετάλλευση κυματικής ενέργειας	5
1.3. Προέλευση Κυματικής Ενέργειας	7
1.4. Κυματικό δυναμικό στην Ελλάδα	10
1.5. Τεχνολογίες εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.....	12
1.5.1. Ταλαντευόμενη υδάτινη στήλη - Oscillating Water Column (OWC).....	14
1.5.2. Ταλαντευόμενες συσκευές κυματικής ενέργειας - Oscillating body systems.....	15
1.5.3. Σημειακός απορροφητής - Point absorber.....	16
1.5.4. Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης - Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)	16
1.5.5. Υποθαλάσσια συσκευή διαφορικής υδροστατικής πίεσης - Submerged pressure differential.....	17
1.5.6. Εξασθενητής κυματισμών - Wave attenuator	18
1.5.7. Συσκευή υπερχείλισης - Overtopping device.....	18
1.6. Σύστημα μετατροπής ενέργειας.....	19
1.7. Τεχνολογίες Ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (OWC).....	20
1.7.1. Limpet	20
1.7.2. European Wave Energy Pilot Plant - Pico OWC	23
1.8. Παράκτιες υβριδικές συσκευές εκμετάλλευσης αιολικής και κυματικής ενέργειας	25
2. ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	29
2.1. Γενικά	29
2.2. Χαρακτηριστικά κύματος.....	29
2.3. Γραμμική θεωρία κύματος (θεωρία Airy)	30
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ.....	35
3.1. Χρησιμότητα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής.....	35
3.2. Αριθμητικές Μέθοδοι στους Κώδικες Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD codes)	35
3.3. Βασικές εξισώσεις περιγραφής της ροής.....	37
3.4. Διακριτοποίηση του χώρου	38
3.5. Επίλυση των εξισώσεων	41

3.6.	Διακριτοποίηση εξισώσεων ροής και επίλυσης	44
3.7.	Επίλυση γραμμικού συστήματος.....	45
3.8.	Οριακές συνθήκες	50
4.	ΣΤΡΟΒΙΛΙΟΣ WELLS	53
4.1.	Συσκευή ταλαντευόμενης στήλης ύδατος (OWC).....	53
4.2.	Στρόβιλος Wells	53
4.3.	Εξισώσεις που διέπουν τη στροβιλομηχανή Wells	57
4.4.	Παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση των στροβιλομηχανών Wells.....	59
5.	ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΗΣ WELLS.....	63
5.1.	Υπολογιστική προσομοίωση	63
5.2.	Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος	67
5.3.	Επιλογή Wall Function.....	70
5.4.	Σχεδιασμός στροβιλομηχανής Wells	75
5.5.	Αρχική διαστασιολόγηση μηχανής Wells	78
5.6.	Αποτελέσματα πρώτης σχεδίασης.....	80
5.7.	Διαστασιολόγηση με χρήση διαγράμματος Cordier	84
5.8.	Αποτελέσματα υπολογιστικής επίλυσης	86
5.9.	Τελικός σχεδιασμός μηχανής Wells.....	94
6.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ WELLS	99
6.1.	Επίδραση γεωμετρικών παραμέτρων στην αεροδυναμική απόδοση των μηχανών Wells 99	
6.2.	Υπολογιστική επίλυση	102
6.3.	Επίδραση του solidity.....	103
6.4.	Επίδραση του hub to tip ratio	111
7.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ TIP CLEARANCE	121
7.1.	Η επίδραση του διακένου (tip clearance) στην λειτουργία της μηχανής Wells.....	121
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	143
9.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	145
10.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	147

1. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1. Εισαγωγή

Η ενέργεια αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής ζωής. Η θερμική, η ηλεκτρική και η κινητική ενέργεια είναι ορισμένες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο επί καθημερινής βάσης. Είναι λοιπόν αποδεκτό, ότι η αξιοποίηση της ενέργειας διασφαλίζει ένα υψηλό βιοτικό επίπεδο και η έλλειψή της θα είχε αρνητικές συνέπειες για την ανάπτυξη της σημερινής κοινωνίας. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιείται παγκοσμίως προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα. Τα ορυκτά καύσιμα βρίσκονται στο ανώτερο στρώμα της γήινης κρούστας και σχηματίστηκαν από τα απολιθωμένα υπολείμματα νεκρών ζώων και φυτών από την έκθεσή τους σε θερμότητα και πίεση στο γήινο φλοιό επί εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Τα ορυκτά καύσιμα περιλαμβάνουν το πετρέλαιο, τον άνθρακα, το φυσικό αέριο, τον λιγνίτη και την τύρφη και αποτελούν καλή ενεργειακή ύλη γιατί με την καύση τους παράγουν μεγάλα ποσά ενέργειας.

Η αύξηση του πληθυσμού της γης, αλλά και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, οδήγησαν σε ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, με την μεγαλύτερη αυξητική τάση να παρατηρείται στις αναπτυσσόμενες χώρες (Ινδία , Κίνα κλπ). Η παραγωγή ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων, η οποία χρησιμοποιείται για ηλεκτρισμό, θέρμανση και μεταφορές έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα από κάθε άλλη ανθρώπινη δραστηριότητα. Είναι πολύ πιθανό μελλοντικά να παρατηρηθεί σημαντική κατανάλωση ή ακόμα ο ρυθμός κατανάλωσης να είναι τόσο γρήγορος που οι γεωτρήσεις και οι εξορύξεις να μην επαρκούν για την κάλυψη της ζήτησης.

Οι ορυκτές καύσιμες ύλες δημιουργούνται μέσω υπόγειας θέρμανσης και πίεσης, χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια για να σχηματιστούν και εξαντλούνται με πολύ ταχύτερο ρυθμό από τον ρυθμό με τον οποίο σχηματίζονται. Για το λόγο αυτό, τα ορυκτά καύσιμα θεωρούνται μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η επιτακτική ανάγκη για άμεση μείωση τέτοιων μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι δεδομένη. Πρώτος λόγος της άμεσης αυτής ανάγκης είναι οι κατά καιρούς διεθνείς κρίσεις πετρελαίου και οι ξέφρενες πορείες της τιμής του. Δεύτερος λόγος είναι η ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου που οδήγησε σε κλιματικές αλλαγές και η ανάγκη για τον άμεσο περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, του αζώτου και άλλων αερίων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και είναι υπεύθυνα για το σχηματισμό της όξινης βροχής. Η τεχνολογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μία βιώσιμη και τεχνολογικά εφικτή λύση γιατί παράγει ενέργεια από μετατροπή φυσικών πόρων σε χρήσιμες μορφές ενέργειας.

Οι Ευρωπαίοι ηγέτες το 2008 συμφώνησαν ότι μέχρι το 2020, θα πρέπει να μειώσουν την εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα, το 20% της ενέργειας των κρατών τους να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων τουλάχιστον κατά 20% σε σχέση με το 1990. Στις 13 Δεκεμβρίου 2011, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε τον Ενεργειακό Οδικό Χάρτη για το 2050, που περιλαμβάνει σειρά σεναρίων για την επίτευξη 85% μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στον ενεργειακό τομέα, στο πλαίσιο της συμφωνίας για συνολική μείωση των εκπομπών κατά 80 - 95% προκειμένου να αποτραπούν οι χειρότερες επιπτώσεις κλιματικών αλλαγών (www.energypress.gr; <http://ec.europa.eu>).

Με τον όρο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εννοούμε μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικούς πόρους οι οποίοι ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις: i) βρίσκονται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον, ii) δεν εξαντλούνται, iii) συνεχώς ανανεώνονται. Για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται καμία ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση και μπορούν να μετατρέπονται σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Οι μορφές των ΑΠΕ είναι:

1. Αιολική Ενέργεια
2. Ηλιακή Ενέργεια
3. Υδροηλεκτρική Ενέργεια
4. Στοιχεία καυσίμου (υδρογόνο)
5. Ενέργεια από θάλασσα
6. Γεωθερμική ενέργεια
7. Βιομάζα

Μία μορφή Α.Π.Ε. η οποία μέχρι σήμερα έχει αξιοποιηθεί ελάχιστα, είναι η ενέργεια των θαλάσσιων κυματισμών. Το δυναμικό της ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό ή κυματική ενέργεια μπορεί να έχει αξιοσημείωτη συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) σε διεθνές επίπεδο. Η ενέργεια που εμπεριέχεται στους ωκεανούς εκμεταλλεύεται διαφορετικούς τύπους θαλάσσιας ροής, όπως υπεράκτια αιολική ενέργεια, κυματική ενέργεια, θαλάσσια ρεύματα παλιρροιακά και μη, παλιρροιακή ενέργεια, ενέργεια από θερμοκρασιακές διαφορές του νερού των ωκεανών και αποτελεί μία γιγάντια δεξαμενή ηλεκτρικής ενέργειας.

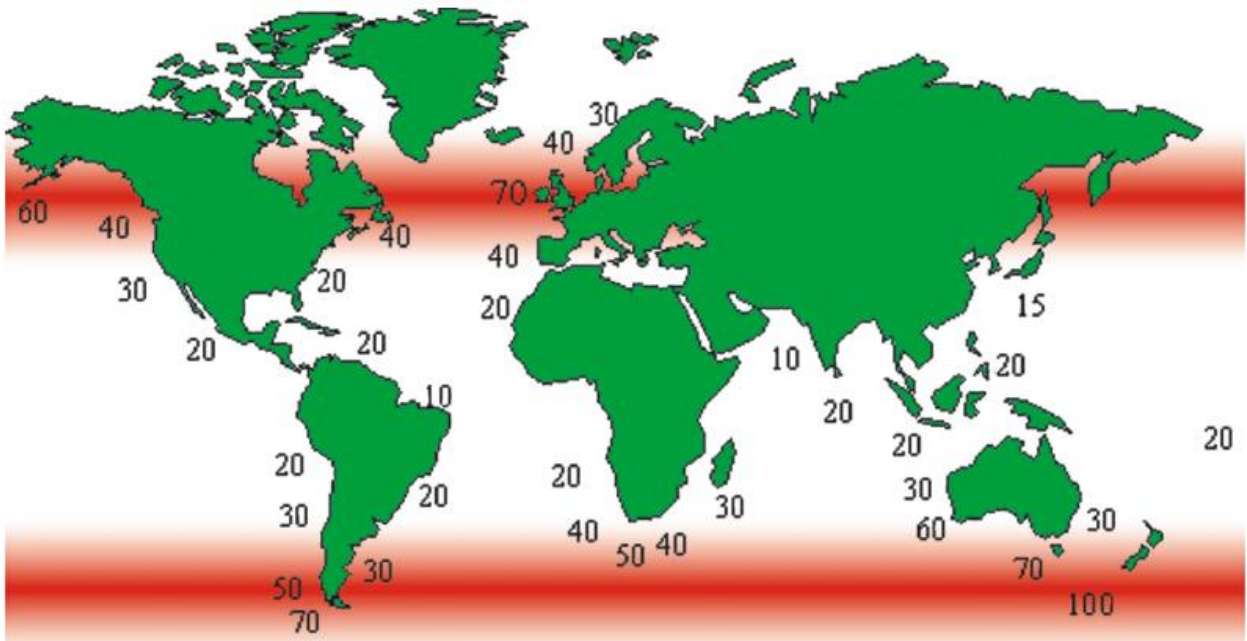
Η υπεράκτια κυματική ενέργεια (off-shore) έχει το δυναμικό να είναι μία από τις πιο ευνοϊκές προς το περιβάλλον μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ελάχιστη οπτική επίδραση στην ακτή. Επίσης, είναι η πιο προβλέψιμη σε σχέση με άλλες μορφές ΑΠΕ, όπως η αιολική ή ηλιακή, καθώς μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια μέχρι και πέντε ημέρες νωρίτερα.

Στην πραγματικότητα η παραγωγή ενέργειας από το κυματικό δυναμικό δεν έχει ωριμάσει αρκετά σαν τεχνολογία, παρ' όλες τις προσπάθειες που έχουν γίνει σε παγκόσμιο επίπεδο. Ανασταλτικός παράγοντας στην πρόοδο αυτών των τεχνολογιών αποτελεί το υψηλό κόστος κεφαλαίου που απαιτεί μία εγκατάσταση σε θαλάσσιο περιβάλλον καθώς και το λειτουργικό κόστος όπως οι εργασίες συντήρησης, σε σύγκριση με μία εγκατάσταση στη στεριά.

Σύμφωνα με δημοσίευση που εκδόθηκε το 2015, μία εγκατάσταση ΑΠΕ που συνδυάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική και κυματική ενέργεια μπορεί να μειώσει το κόστος της παραγόμενης ενέργειας περισσότερο από 50% σε σχέση με μία εγκατάσταση που εκμεταλλεύεται μόνο την ενέργεια από τα κύματα. Έτσι προωθείται η εκμετάλλευση τεχνολογιών θαλάσσιου δυναμικού σε συνδυασμό με την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας η οποία έχει περισσότερο δυναμικό στις θαλάσσιες ανοιχτές περιοχές.

Υπολογίζεται ότι η συνολική ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται από τα κύματα ανά μονάδα χρόνου είναι 2TW. Όπως σε όλες τις μορφές ΑΠΕ το διαθέσιμο κυματικό δυναμικό δεν είναι ίδιο στα διάφορα μέρη του κόσμου. Περιοχές που βρίσκονται στα δυτικά παράλια της Ευρώπης, στις βόρειες ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου, τις ακτογραμμές της βόρειας και της νότιας Αμερικής, Νότια Αφρική λόγω των μεγάλων ακτογραμμών, Αυστραλία και Νέα Ζηλανδία. Όπως φαίνεται

στην Εικόνα 1.1, το καλύτερο κυματικό δυναμικό παρουσιάζεται στην εύκρατη ζώνη (γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 30° και 60° και στα δύο ημισφαίρια) με κυματική ισχύ μεταξύ 20 - 70 kW/m μετώπου του κυματισμού ή και υψηλότερη. Στις περιοχές αυτές ευνοείται η ανάπτυξη ισχυρών κυματισμών λόγω των δυτικών ανέμων και των ισχυρών καταιγίδων που επικρατούν [1].

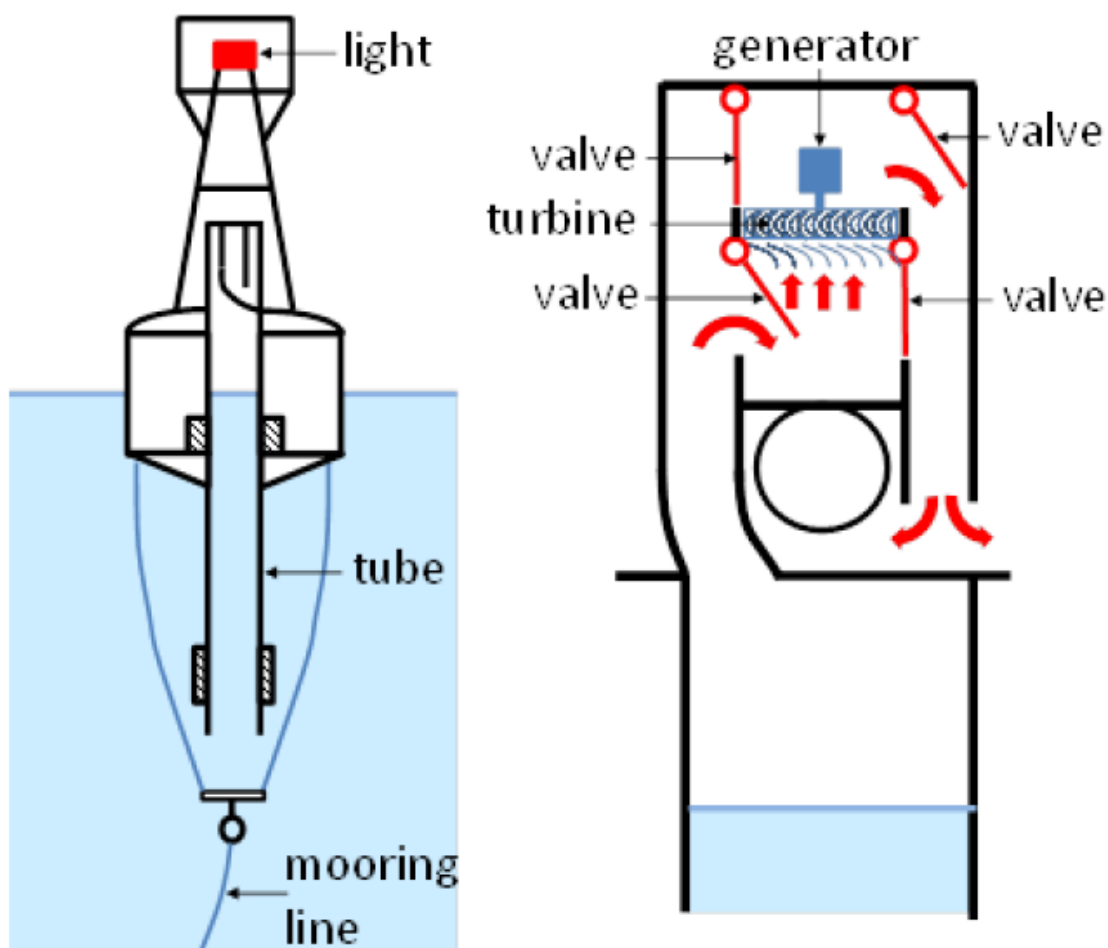


Εικόνα 1.1- Παγκόσμια κατανομή κυματικής ισχύος σε kW/m μετώπου κύματος

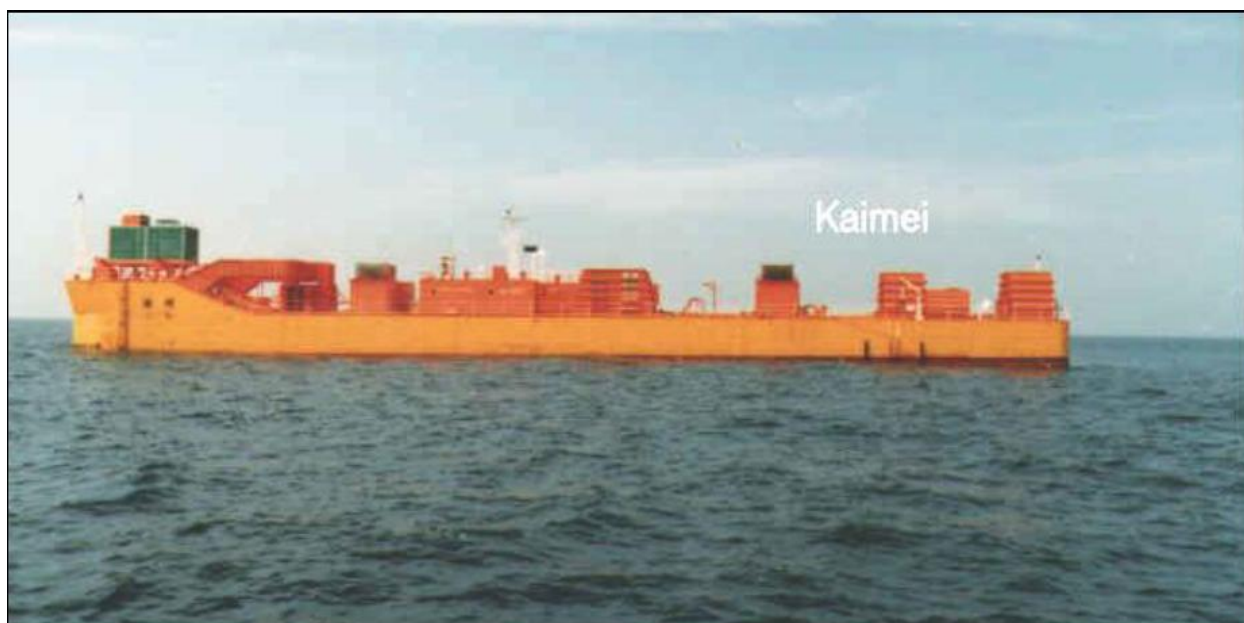
1.2. Ιστορική αναδρομή στην εκμετάλλευση κυματικής ενέργειας

Η θάλασσα έχει θεωρηθεί από καιρό ως πηγή ενέργειας. Κατά το Μεσαίωνα (1200-1500μ.Χ.) οι αγρότες παγίδευαν το νερό της θάλασσας στις λίμνες των μύλων για να το χρησιμοποιήσουν. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 χρόνων, οι μηχανικοί έχουν αρχίσει να εξετάζουν την παλιρροιακή δύναμη και τη δύναμη των κυμάτων σε μία μεγαλύτερη βιομηχανική κλίμακα. Η δυνατότητα μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ενέργεια χρήσιμης μορφής αποτελεί πηγή έμπνευσης για πολλούς εφευρέτες. Περισσότερες από 1000 πατέντες έχουν καταγραφεί έως το 1980 και το νούμερο έχει αυξηθεί σημαντικά έκτοτε.

Το 1799 ο Γάλλος μηχανικός Pierre Girard σχεδίασε την πρώτη μηχανή για την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα, η οποία όμως δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Ο Yoshio Masuda (1925-2009), πρώην Ιάπωνας αξιωματικός Πολεμικού ναυτικού, ίσως θεωρείται ο πατέρας της μοντέρνας τεχνολογίας εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας. Ανέπτυξε ένα πλωτήρα πλοήγησης (navigation buoy) εξοπλισμένο με έναν στρόβιλο που λειτουργεί με αέρα ως ρευστό και απορροφά ενέργεια από τα κύματα. Αυτή η συσκευή στη συνέχεια ονομάστηκε Oscillating Water Column (OWC). Τα navigation buoys τέθηκαν σε εμπορική λειτουργία στην Ιαπωνία από το 1965 και στη συνέχεια στην Αμερική. Το 1976 η ίδια συσκευή μεγαλύτερου μεγέθους προωθήθηκε στην Ιαπωνία με την ονομασία Kaiimei και χρησιμοποιήθηκε σε μία πλωτή πλατφόρμα δοκιμών όπου στέγαζε διάφορες OWC συσκευές με διάφορους τύπους στρόβιλων αέρα. Πιθανώς, η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύχθηκε όταν η επιστήμη εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας βρισκόταν σε πρώιμο στάδιο με αποτέλεσμα η αποδιδόμενη ισχύς που επιτεύχθηκε στην πλατφόρμα Kaiimei δεν απέδωσε μεγάλη επιτυχία.



Εικόνα 1.2 - Σχεδιάγραμμα του Ιαπωνικού Navigation Buoy εξοπλισμένο με τουρμπίνα αέρα [13]



Εικόνα 1.3- Ιαπωνικός μετατροπέας κυματικής ενέργειας Kaimei [13]

Η πετρελαϊκή κρίση το 1973 κίνησε το ενδιαφέρον προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την παραγωγή ενέργειας μεγάλης κλίμακας προερχόμενη από τα κύματα. Οι χώρες της Δυτικής Ευρώπης με ακτές προς τον Ατλαντικό Ωκεανό, όπου εντοπίζονται ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα

κυματικού δυναμικού, ξεκίνησαν εντατικές έρευνες για την ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας. Μία επιστημονική δημοσίευση το 1974 στο ευρέως γνωστό περιοδικό Nature από τον καθηγητή Steven Salter του πανεπιστημίου του Εδιμβούργου, στη Σκωτία, αποτέλεσε ορόσημο για την κυματική ενέργεια καθώς τράβηξε την προσοχή της Διεθνούς Επιστημονικής Κοινότητας.

Από το 1975 και έπειτα, διάφορα ερευνητικά προγράμματα με την στήριξη των κυβερνήσεων, στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Πορτογαλία, την Ιρλανδία, την Νορβηγία, τη Σουηδία και την Δανία στόχευαν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Οι προσπάθειες στον τομέα της έρευνας και της ανάπτυξης της ενέργειας των κυματισμών έχουν κερδίσει της υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η οποία από το 1986, παρακολουθεί την εξέλιξη που πραγματοποιείται.

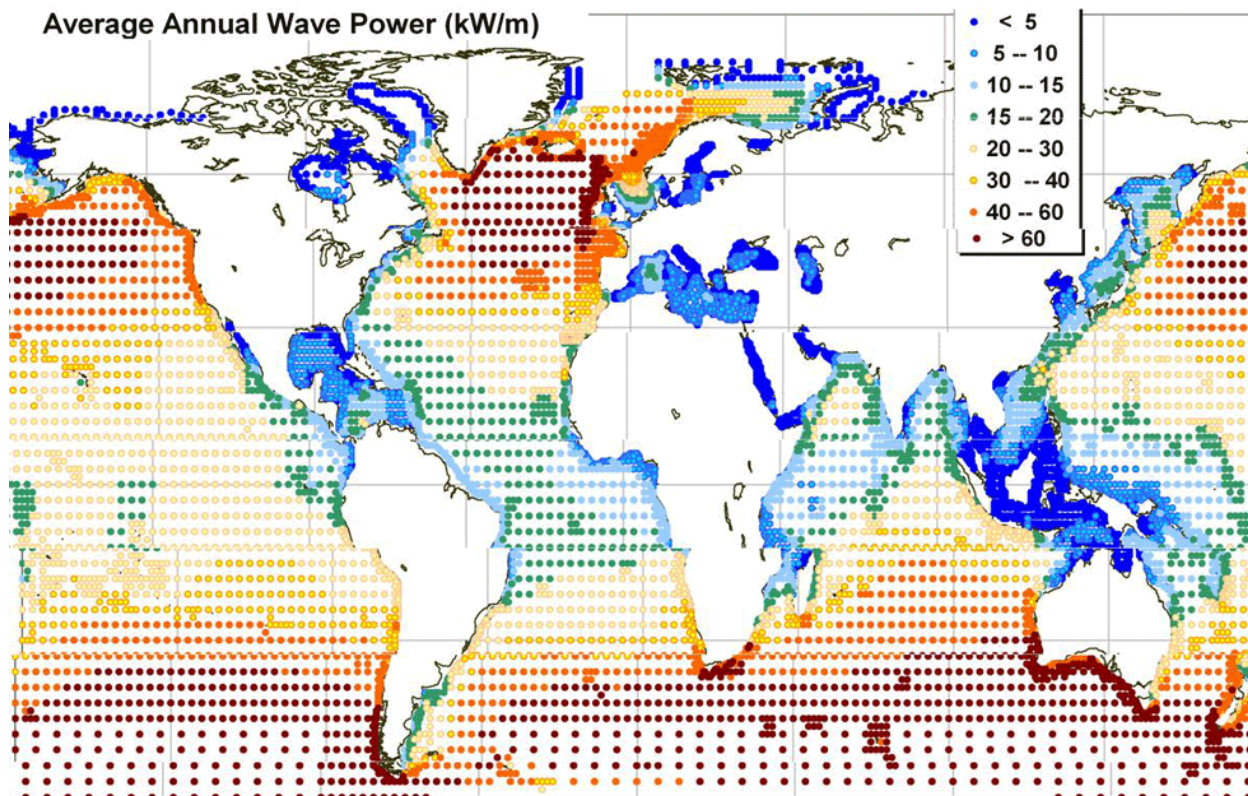
Από το 1992 αξιολογήθηκε ξανά σε κυβερνητικό επίπεδο η μελέτη για την εκμετάλλευση της ενέργειας από τη θάλασσα. Το 1993, η Ευρωπαϊκή επιτροπή υποστήριξε το πρώτο συνέδριο για την κυματική ενέργεια στο Εδιμβούργο της Σκωτίας. Η ουσιαστική στήριξη της Επιτροπής ξεκίνησε το 1994 με το τέταρτο πρόγραμμα στήριξης (4th FP). Έκτοτε η κυματική ενέργεια επέστρεψε ως ερευνητικό αντικείμενο στα πανεπιστημιακά εργαστήρια και στα μηχανουργεία των εφευρετών και υποστηρικτών της Εμπειρία που αποκτήθηκε από προηγούμενες αποτυχημένες προσπάθειες, καθώς και γνώσεις από την τεχνολογία εξόρυξης και παραγωγής πετρελαίου από το θαλάσσιο περιβάλλον οδήγησαν στην ανάπτυξη της νέας γενιάς μηχανών παραγωγής ενέργειας από η θάλασσα. Ακολούθησε μία σειρά από διεθνή συνέδρια (Λισσαβόνα Πορτογαλία 1995, Πάτρα Ελλάδα 1998, Aalborg Δανία 2000). Προς το τέλος της δεκαετίας του 1990, έχει γίνει σαφές ότι η τεχνολογία έχει προωθηθεί σε σημείο όπου η αξιόπιστη και φτηνή ηλεκτρική ενέργεια από τους ωκεανούς γίνεται μία πραγματικότητα. Οι συνεχιζόμενες ερευνητικές προσπάθειες έφεραν την κυματική ενέργεια κοντά στην εμπορική εκμετάλλευση.

Ιδιαίτερα από το 2000 και μετά η έρευνα και η ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας σημειώνει αξιοσημείωτη αναβάθμιση σαν αποτέλεσμα της ευρωπαϊκής αναζήτησης για σημαντική αύξηση της παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το Ηνωμένο Βασίλειο παρήγαγε την πρώτη ηλεκτρική ενέργεια από θαλάσσια και παλιρροιακά κύματα με την οποία εφοδίασε το εθνικό του δίκτυο το έτος 2000, αναγκάζοντας και άλλες χώρες να σκεφτούν σοβαρά να πράξουν κάτι ανάλογο. Σήμερα τουλάχιστον 50 προγράμματα βρίσκονται σε εξέλιξη, μερικά εκ των οποίων και στην Ελλάδα [13]

1.3. Προέλευση Κυματικής Ενέργειας

Οι θαλάσσιες μάζες καλύπτουν το 75% της επιφάνειας του πλανήτη είναι μία τεράστια αποθήκη ενέργειας. Τα θαλάσσια κύματα, είναι μία ανεξάντλητη πηγή, όπως όλες οι Α.Π.Ε. και παρουσιάζουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα. Υπολογίζεται ότι η αξιοποίηση μόλις του 1% του κυματικού δυναμικού του πλανήτη θα κάλυπτε στο τετραπλάσιο την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό για τα κράτη μέλη τη Ε.Ε. υπολογίζεται συνολικά σε 150 TWh /έτος. Στις ακτές των Ευρωπαϊκών χωρών της Μεσογείου το κυματικό δυναμικό υπολογίζεται στα 4 - 11kW/m, με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται στην περιοχή του νότιο-δυτικού Αιγαίου [2]. Όπως προκύπτει από την Εικόνα 1.4, στις ακτές της Δυτικής Ευρώπης, ανοιχτά των ακτών του Καναδά και των ΗΠΑ, καθώς και στις νότιες ακτές της

Αυστραλίας και της Ν. Αμερικής το κυματικό δυναμικό έχει μία μέση ισχύ της τάξης των 40 - 70 kW/m μετώπου κύματος. Βασική προϋπόθεση χρήσης αυτής της ενέργειας είναι η κατασκευή συσκευών ικανών να μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική.



Εικόνα 1.4- Παγκόσμιο ετήσιο κυματικό δυναμικό

Πηγή: www.wrsc.org/presentation/china-energy-geography

Όσον αφορά τις διάφορες μορφές κυματισμού, ο ανεμογενής κυματισμός παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ενεργειακή εκμετάλλευση. Τα ανεμογενή κύματα δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του ανέμου με την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτή η μεταφορά ενέργειας παρέχει ένα είδος φυσικής αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας στο νερό κοντά στην ελεύθερη επιφάνειά του. Εφόσον δημιουργηθεί ο ανεμογενής κυματισμός μπορεί να ταξιδέψει χιλιάδες χιλιόμετρα με ελάχιστες ενεργειακές απώλειες. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τον ανεμογενή κυματισμό ως την πλέον ιδανική μορφή κυματισμού για βέλτιστη απόδοση. Καθώς τα θαλάσσια κύματα πλησιάζουν προς την ακτογραμμή, η ένταση ενέργειας μειώνεται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τον πυθμένα της θάλασσας. Αυτή η απώλεια ενέργειας κοντά στην ακτή μπορεί να αντισταθμιστεί από διάφορα φυσικά φαινόμενα όπως η διάθλαση και η ανάκλαση, οδηγώντας στη συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας (hot spots).

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

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

$$E_{\text{συνολική}} = E_{\text{δυναμική}} + E_{\text{κινητική}} = \rho \cdot g \cdot h^2 \cdot L \cdot \frac{B}{16} + \rho \cdot g \cdot h^2 \cdot L \cdot \frac{B}{16} = \rho \cdot g \cdot h^2 \cdot L \cdot \frac{B}{8} \quad (1.1)$$

όπου το ρ είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού
 το g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας
 το h είναι το ύψος του κύματος
 το L είναι το βήμα των κυμάτων
 το B είναι το μετωπικό μήκος κύματος ενός μέτρου που εξετάζουμε

Στην εξίσωση 1.1 φαίνεται ότι η δυναμική και η κινητική ενέργεια των κυμάτων είναι ισοδύναμες και εξαρτώνται ουσιαστικά από το ύψος του κύματος.

Η κυματική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί ως συγκεντρωμένη μορφή ηλιακής ενέργειας. Τα κύματα των ωκεανών δημιουργούνται από τη μεταφορά ενέργειας από τον ήλιο στον αέρα και στην συνέχεια στο νερό. Οι άνεμοι δημιουργούνται από την περιστροφική κίνηση της γης. Καθώς περνούν πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας μεταφέρουν κομμάτι της ενέργειάς τους σχηματίζοντας κύματα. Οι ακριβείς μηχανισμοί που περιλαμβάνονται σε αυτή τη μεταφορά είναι σύνθετοι και όχι ακόμα εντελώς κατανοητοί. Γενικά ο άνεμος που πνέει πάνω από μία υδάτινη επιφάνεια δημιουργεί ανεμογενή ρεύματα και κύματα. Οι κυματισμοί στη θάλασσα παρουσιάζονται σαν διαδοχικές εξάρσεις και ταπεινώσεις της ηρεμίας της στάθμης, που παρουσιάζουν περιοδικότητα και επομένως μήκος κύματος και χρονική περίοδο. Όταν συμβεί αυτή η μετατροπή, η κυματική ενέργεια μπορεί να ταξιδέψει χιλιάδες μίλια με μικρές ενεργειακές απώλειες. Το πιο σημαντικό, ίσως, είναι το γεγονός ότι μπορεί να προβλεφθεί η ένταση της κυματικής ενέργειας αρκετές ημέρες πριν.

Στο ανοιχτό πέλαγος τα κύματα δημιουργούνται σε σχέση με την ένταση του ανέμου, τη διάρκεια και το αντίστοιχο ανάπτυγμα πελάγους. Υπάρχουν μέθοδοι προσεγγιστικού υπολογισμού του χαρακτηριστικού ύψους κύματος και της αντίστοιχης περιόδου στα βαθιά νερά. Το ύψος αυτό αναφέρεται στο μέσο όρο του άνω 1/3 των υψών κύματος που δημιουργούνται από τα δεδομένα της πνοής ανέμου. Στην πραγματικότητα υπάρχει πάντα ένα φάσμα περιόδων σε κάθε θαλάσσιο κυματισμό. Καθώς τα κύματα ταξιδεύουν προς την ακτή υφίστανται ένα πλήθος μεταβολών, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι εξής:

- οι μεταβολές των χαρακτηριστικών του κυματισμού λόγω ρήγωσης. Πρακτικά αυτές λαμβάνονται υπόψη για βάθη θάλασσας μικρότερα του μισού μήκους κύματος. Εν γέννη το μήκος κύματος τείνει να αυξηθεί με τη μείωση του βάθους.
- διάθλαση, κατά την οποία τα κατ' αρχήν ευθέα μέτωπα του κυματισμού στα βαθιά νερά καμπυλώνονται στην περιοχή μικρότερων, όπως πριν, βαθών και τείνουν να γίνουν παράλληλα με τις ισοβαθείς του πυθμένα. Παράλληλα επηρεάζεται και το ύψος κύματος.
- περίθλαση, στην οποία γίνεται μεταφορά ενέργειας κατά μήκος του μετώπου του κύματος κατά την πρόσκρουση του κυματισμού σε εμπόδιο, όπως για παράδειγμα σε νησίδα ή κυματοθραύστη. Έτσι στη "σκιά" του εμποδίου παρουσιάζεται κυματισμός, μικρότερου ύψους από τον προσπίπτοντα.
- ανάκλαση από τον κεκλιμένο πυθμένα της ακτής, όπου με τη συμβολή του ανακλώμενου κυματισμού μεταβάλλεται η φάση και το ύψος κύματος του επερχόμενου. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί λόγω της σχετικά ήπιας κλίσης του πυθμένα συμβαίνει θραύση των κυματισμών παρά ανάκλασή τους.

- Η θραύση των κυμάτων, που συνεπάγεται ριζική αλλαγή της μορφής τους με ταυτόχρονη έκλυση ενέργειας. Θεωρητικά συμβαίνει σε βάθη γύρω στο 1.3 ύψος κύματος στη θέση της θραύσης για ήπια κλίση πυθμένα. Λόγω του ότι η έκλυση ενέργειας λόγω θραύσεων είναι σημαντική αλλά και λόγω του ότι στη ζώνη θραύσεως δημιουργούνται και άλλα έντονα φαινόμενα (ρεύματα κατά μήκος της ακτής, μεταφορά ιζημάτων) θα πρέπει η διαδρομή του αγωγού εκβολής μέσα από τη ζώνη αυτή να τύχει ιδιαίτερης προσοχής και προστασίας. Επομένως ο καθαρισμός της ζώνης θραύσεως αποκτά ιδιαίτερη σημασία και θα πρέπει πάντοτε να συναρτάται με την περίοδο επαναφοράς της αντίστοιχης κυματικής κατάστασης. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η περίοδος τόσο διευρύνεται προς τα βαθιά η ζώνη θραύσεως λόγω αύξησης των υψών κύματος. Η ζώνη μετά τη θραύση χαρακτηρίζεται από έντονη δραστηριότητα ρευμάτων και μεταφοράς ιζημάτων. Τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής προκαλούνται από το γεγονός της μη παραλληλίας ακτογραμμής - μετώπων κυματισμών, γεγονός που συνεπάγεται εμφάνιση μετά τη θραύση κάποιας συνιστώσας της ποσότητας κίνησης των κυματισμών που είναι παράλληλη στην ακτή. Στην περιοχή πριν τη θραύση των κυμάτων παρατηρούνται και εκεί μετακινήσεις ιζημάτων που κυρίως οφείλονται στα ανεμογενή ρεύματα καθώς και στις κινήσεις των υγρών μορίων κοντά στον πυθμένα που προκαλούνται από τους κυματισμούς [3].

1.4. Κυματικό δυναμικό στην Ελλάδα

Τα κυματικά δεδομένα για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο προέρχονται από δύο πηγές: α) Επιτόπιες μετρήσεις (real time measurements) του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ και β) Μεταγενέστερες εκτιμήσεις (δεδομένα hindcast) από το κυματικό μοντέλο WAM.

Σε εποχιακή βάση, όπως προσδιορίστηκε από το αριθμητικό κυματικό μοντέλο WAM-cycle 4, η έντονη περίοδος σε ότι αφορά τις κυματικές συνθήκες εντείνεται από τον Νοέμβριο μέχρι τον Φεβρουάριο στο Νότιο, Νοτιοδυτικό και Δυτικό Αιγαίο, ενώ τους χειμερινούς μήνες διακρίνεται ένας σχηματισμός έντονου κυματικού πεδίου και στο κεντρικό Αιγαίο. Τον Μάρτιο, παρατηρείται η μορφή του κυματικού πεδίου των προηγούμενων τεσσάρων μηνών, αλλά με πολύ μικρότερη ένταση (με τις τιμές να είναι πιο κοντά σε αυτές του Νοεμβρίου). Τους θερινούς μήνες διακρίνεται εμφανώς η επίδραση των ετήσιων ανέμων (μελέμια) που πνέουν από βόρεια-βορειοδυτικά προς νότια-νοτιοανατολικά στο Αιγαίο πέλαγος. Τον Ιούλιο και τον Ιούνιο η κυματική δράση είναι πιο έντονη στο νοτιοανατολικό Αιγαίο (νότια από τα στενά Κάσου - Κρήτης και Ρόδου-Καρπάθου) ενώ τον Αύγουστο μεγάλες τιμές του ύψους κύματος εμφανίζονται επίσης και σε μία ευρύτερη περιοχή του κεντρικού Αιγαίου, βόρεια του συμπλέγματος των Κυκλάδων (στα στενά μεταξύ Μυκόνου και Ικαρίας). Τέλος, τα μικρότερα ύψη κύματος εμφανίζονται τον Σεπτέμβριο, ενώ τον Μάιο οι ανεμολογικές και κυματικές συνθήκες είναι σχετικά ήπιες.

Σε ετήσια βάση, οι υψηλότερες τιμές του κυματικού δυναμικού, εμφανίζονται στο Ιόνιο Πέλαγος και στα στενά μεταξύ Κρήτης - Κάσου, Κρήτης - Κυθήρων, Κάσου - Καρπάθου και Καρπάθου - Ρόδου, καθώς και στο κεντρικό Αιγαίο, βόρεια των Κυκλάδων.

Το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του ΕΛΚΕΘΕ υλοποιεί το σύστημα παρακολούθησης και πρόγνωσης θαλασσών ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Πρόκειται για ένα σύστημα παρακολούθησης, πρόγνωσης και παροχής πληροφοριών από αφορούν ελληνικές θάλασσες. Το δίκτυο παρακολούθησης ΠΟΣΕΙΔΩΝ αποτελούν 10 ωκεανογράφοι και 10 πλωτήρες τύπου Sea Watch για μέτρηση

κυματικών παραμέτρων, παρατεταγμένοι στις ελληνικές θάλασσες με ποικιλία αισθητήρων για μέτρηση μετεωρολογικών, περιβαλλοντικών και ωκεανογραφικών δεδομένων. Οι κυματικές παράμετροι που καταγράφονται είναι το ύψος και η διεύθυνση κύματος..

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ παρατηρείται ότι στο σύνολο των σταθμών, η διακύμανση του κυματικού δυναμικού ακολουθεί μια τυπική ετήσια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές του δυναμικού, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές. Υπολογίζεται το μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό για τον σταθμό Άθως 0.78-8.37 kW/m, για το σταθμό Μύκονος 2.81 - 10.15kW/m, στο σταθμό E1M3A 1.31 - 7.87 kW/m, στο σταθμό στην Πύλο 1.33 - 14.33kW/m και στο σταθμό Ζάκυνθος 1.05-9.18kW/m. [4]

Χώρες με υψηλό κυματικό δυναμικό προσβλέπουν στην κάλυψη σημαντικού ποσοστού των ενεργειακών αναγκών τους από σταθμούς κυματικής ενέργειας, ενώ χώρες μέτριας στάθμης κυματικό δυναμικό θα μπορούσαν να καλύψουν τοπικές ανάγκες σε παράκτιες περιοχές, νησιά ή να εκμεταλλευτούν αυτό το είδος ενέργειας συμπληρωματικά προς συμβατικές ή άλλου είδους ΑΠΕ. Το κυματικό δυναμικό της Ελλάδας, οι ιδιαίτερες συνθήκες και η τοπογραφία του Αιγαίου συμβάλλουν στην ανάπτυξη αξιοποιήσιμων κυματισμών [2]. Οι εκτιμήσεις του ανέμου-κύματος κοντά στα νησιά του Αιγαίου Πελάγους δείχνουν ότι η ενέργεια που υπάρχει, μπορεί να καλύψει τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό που υπερβαίνει το 85-90%, ακολουθούμενη από την ελαχιστοποίηση των εισαγόμενων καυσίμων και την σημαντική μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων [5].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [6], στις πιθανές περιοχές εγκατάστασης κυματικής συσκευής θα πρέπει να εξετάζονται οι σταθμισμένοι παράγοντες που ακολουθούν:

- Απόσταση από την ακτογραμμή
- Απόσταση από λιμένες
- Απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο σε σημεία σύνδεσης
- Τύπος θαλάσσιου βυθού
- Κυματικό κλίμα

Οι ακόλουθες περιοχές αποτελούν μη εκτελεστικές περιοχές λόγω διάφορων περιορισμών στη χρήση τους:

- Περιοχές Στρατιωτικής άσκησης
- Θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές
- Περιοχές 500m γύρω από τα υποβρύχια καλώδια
- Περιοχές κυματικής σκίασης
- Είσοδος λιμένων και πλοήγησης καναλιών
- Περιοχές με βάθος νερού κάτω από 30m και μεγαλύτερο από 200m.

Σε συνδυασμό με τα κριτήρια επιλογής χώρου, παρατηρούμε ότι αυτές οι περιοχές δεν περιλαμβάνουν περιορισμούς εκτέλεσης με αποτέλεσμα η εγκατάσταση συσκευής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας να είναι δυνατή. Αν και η αξιοποίηση ενέργειας των κυμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος βρίσκεται ακόμα σε εμβρυακό στάδιο, αυτό δεν οφείλεται στο

γεγονός ότι η κυματική ενέργεια δεν μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών. Άλλωστε η συγκεκριμένη πηγή ενέργειας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες ΑΠΕ. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση τεχνολογιών κυματικής ενέργειας θεωρούνται ήπιες ενώ τα κύματα είναι πιο ισχυρά το χειμώνα, όταν είναι μεγαλύτερη η ζήτηση για ηλεκτρισμό. Εξάλλου ακόμα και όταν ο άνεμος σταματήσει να πνέει και οι ανεμογεννήτριες πάντουν να λειτουργούν, ο κυματισμός της θάλασσας μπορεί να διαρκέσει για αρκετές ακόμη ώρες (στη μορφή αποθάλασσας) που αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα.

Τελικά, στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, υπάρχει εκμεταλλεύσιμο αιολικό και κυματικό δυναμικό. Επομένως θα μπορούσε η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων απόληψης αιολικής και κυματικής ενέργειας στη θάλασσα να αποτελέσει μία βιώσιμη και τεχνολογικά εφικτή λύση για την ηλεκτροδότηση της χώρα από ΑΠΕ.

1.5. Τεχνολογίες εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας

Οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας (wave-energy technology) στοχεύουν στην μετατροπή της κίνησης των κυμάτων των θαλασσών-ωκεανών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία μετατροπής αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

- Παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω της κίνησης του κύματος.
- Μετατροπή της παραγόμενης μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Μεταφορά του παραγόμενου ηλεκτρισμού στο δίκτυο.

Διάφοροι μέθοδοι προτείνονται για την κατηγοριοποίηση των συσκευών κυματικής ενέργειας σύμφωνα με:

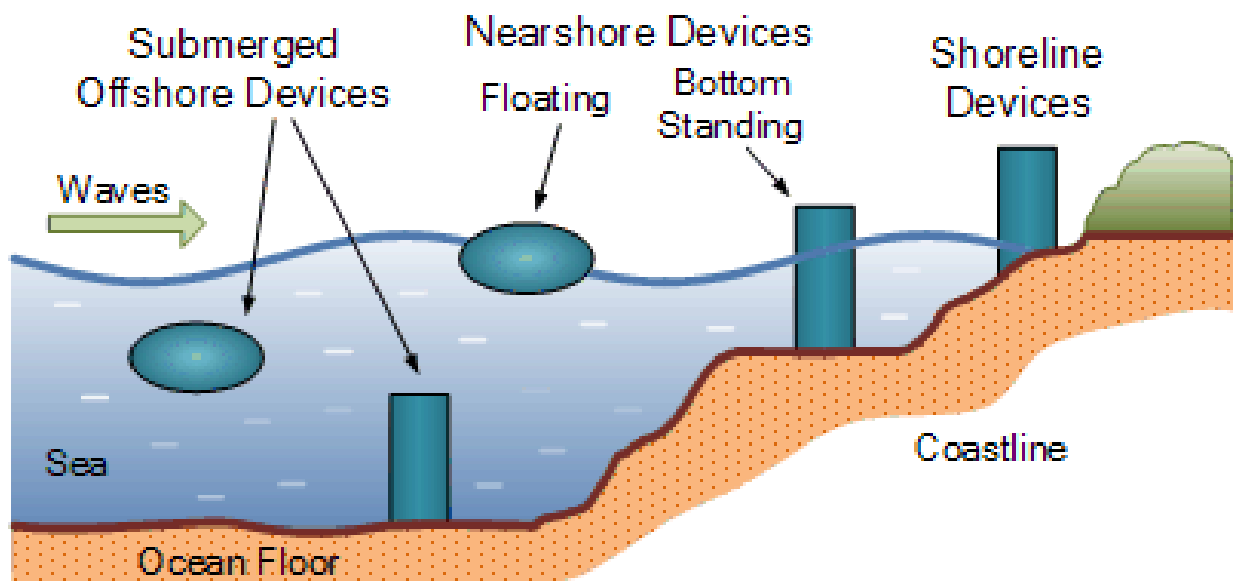
- Την τοποθεσία εγκατάστασης
- Την αρχή λειτουργίας
- Σύστημα μετατροπής ενέργειας (Power Take off System PTO)
- Ωριμότητα της τεχνολογίας
- Απόδοση

Ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης των συσκευών διακρίνονται στις εξής κατηγορίες: επάκτιες (onshore), παράκτιες (coastal ή near shore), υπεράκτιες (offshore).

Επάκτιες συσκευές (onshore): Είναι σταθερές ή ενσωματωμένες συσκευές στην ακτογραμμή κάτι το οποίο τους προσδίδει το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης. Επιπλέον δεν απαιτείται αγκυροβόληση μεγάλου βάθους ή υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια μεταφοράς. Όμως αυτές οι συσκευές μειονεκτούν στη ισχύ που μπορούν να αποδώσουν. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί από τη φυσική συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας ("hot spots"). Ταυτόχρονα, ορισμένες φορές η εγκατάσταση των επάκτιων συσκευών περιορίζεται λόγω της μορφολογίας της ακτογραμμής, το εύρος των παλιρροιακών φαινομένων, της προστασίας του τοπίου.

Παράκτιες συσκευές (coastal ή nearshore): Οι παράκτιες συσκευές εγκαθίστανται σε μέτριο βάθος υδάτων (περίπου 20 με 30 μέτρα), σε απόσταση μέχρι και 500 μέτρα από την ακτή. Ο πυθμένας πρέπει να είναι ισόπεδος από άμμο, σκύρα ή ιλύ χωρίς κάλυψη από πέτρες για το στρώσιμο ηλεκτρικών καλωδίων μεταφοράς στην ακτή. Έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με της επάκτιες τεχνολογίες ενώ ταυτόχρονα πλεονεκτούν στο γεγονός ότι υπόκεινται σε θαλάσσια κύματα υψηλότερης ισχύος σε σχέση με τις επάκτιες συσκευές.

Υπεράκτιες συσκευές (offshore): Οι συσκευές που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία εκμεταλλεύονται πιο πλούσιο κυματικό δυναμικό που είναι διαθέσιμο σε βάθος μεγαλύτερο από 40 μέτρα. Οι νέες υπεράκτιες συσκευές είναι μικρότερες αρθρωτές συσκευές που αποδίδουν συνολικά μεγαλύτερη ισχύ όταν λειτουργούν σε συστοιχίες.



Εικόνα 1.5 - Τοποθεσία εγκατάστασης συσκευών κυματικής ενέργειας

(Πηγή: Ιστοσελίδα ALTERNATIVE-ENERGY-TUTORIALS)

Μια δεύτερη κατηγοριοποίηση γίνεται ανάλογα με την τοποθέτηση των κινούμενων εξαρτημάτων της συσκευής:

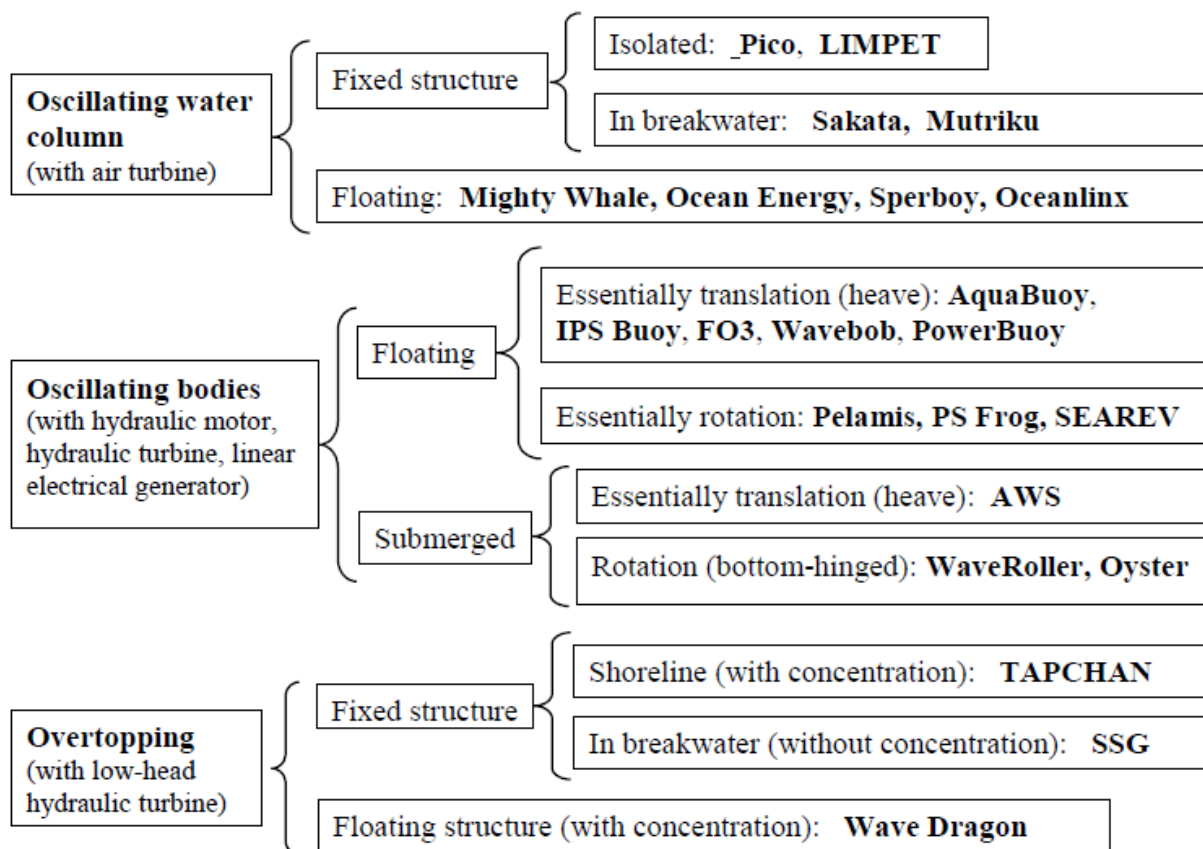
Floating: Η συσκευή επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας και έχει ακυρωθεί στο βυθό επιτρέποντας ελευθερία στην κίνηση της προς όλες τις κατευθύνσεις.

Submerged: Η συσκευή εγκαθίστανται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Pile mounted: Η συσκευή προσαρμόζεται σε πάσσαλο ο οποίος είναι αγκυρωμένος στον πυθμένα της θάλασσας.

Fixed: Η συσκευή προσαρμόζεται σε ένα άλλο σταθερό εξάρτημα ή κατευθείαν στον βυθό.

Λόγω του μεγάλου αριθμού των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας κάθε μία από τις τρεις βασικές κατηγορίες υποδιαιρείται σε υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας της κάθε τεχνολογίας. Η Εικόνα 6 παρουσιάζει μία κατηγοριοποίηση των συσκευών ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους καθώς και τα αντίστοιχες πραγματικές εφαρμογές που έχουν κατασκευαστεί.

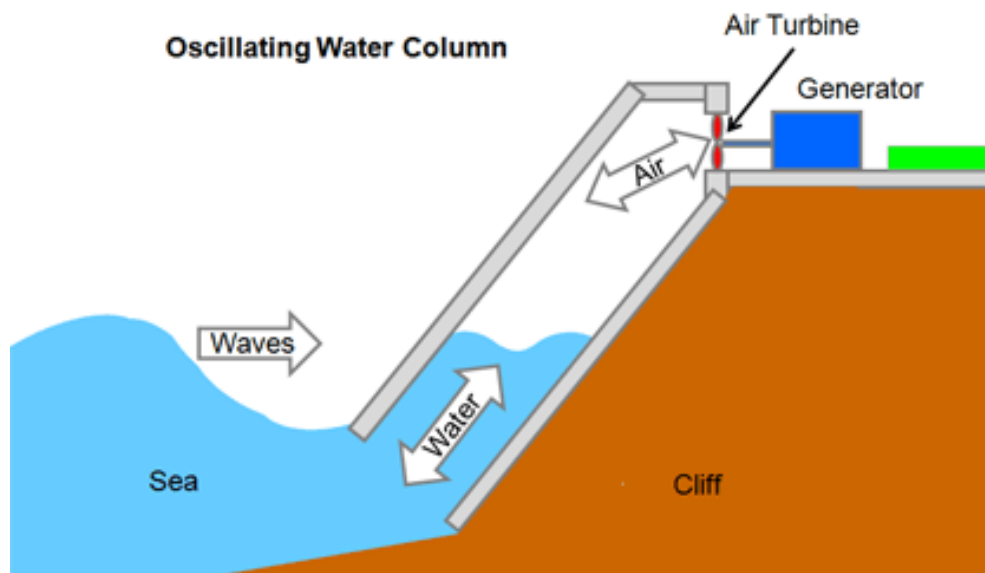


Εικόνα 1.6 - Διάφορες τεχνολογίες κυματικής ενέργειας [12]

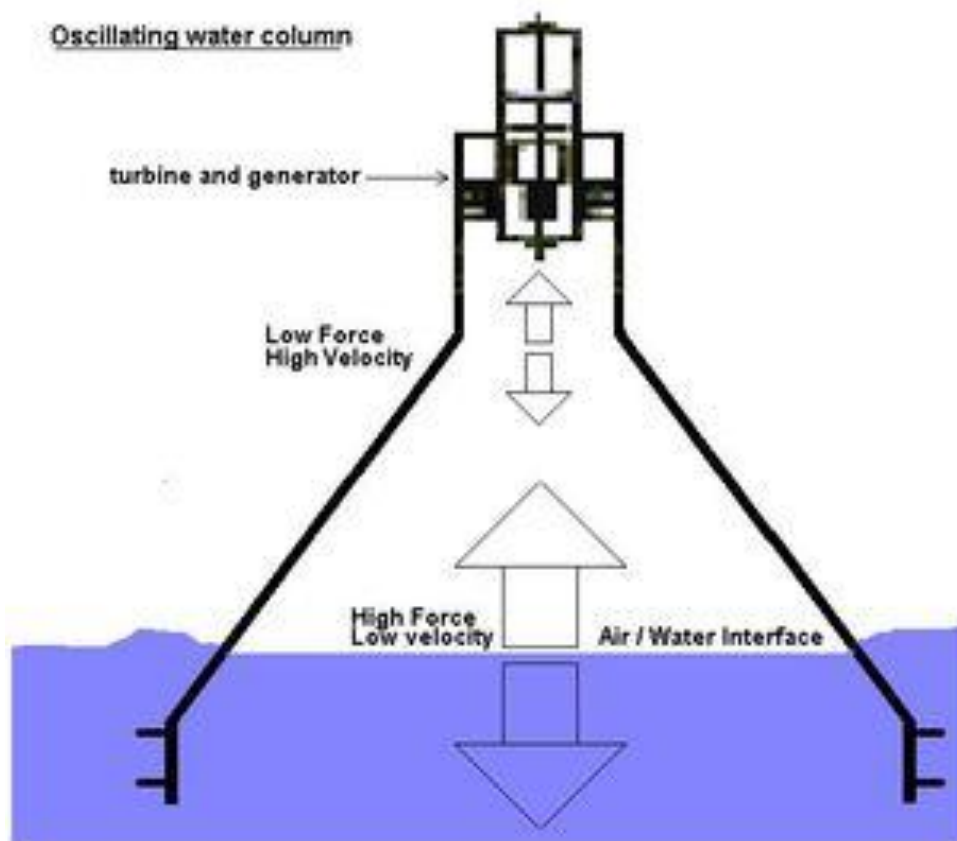
1.5.1. Ταλαντευόμενη υδάτινη στήλη - Oscillating Water Column (OWC)

Συσκευή μερικώς βυθισμένη κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας κατασκευασμένη από τσιμέντο ή χάλυβα. Έχει ένα άνοιγμα στη θάλασσα κάτω από την επιφάνεια των υδάτων ώστε να εγκλωβίζει αέρα πάνω από την υδάτινη στήλη. Η ταλαντευόμενη κίνηση της εγκλωβισμένης επιφάνειας του νερού λόγω του κυματισμού, λειτουργεί σαν έμβολο αναγκάζοντας τον εγκλωβισμένο αέρα της στήλης να διέρχεται διαμέσου ενός αεριοστροβίλου που συνδέεται με μία ηλεκτρική γεννήτρια. Η ταλαντευόμενη κίνηση της επιφάνειας της θάλασσας επιφέρει την αμφίδρομη κίνηση του αέρα λόγω της συμπίεσης και αποσυμπίεσης του εγκλωβισμένου αέρα. Η κορυφή του εγκλωβισμένου κύματος ανυψώνει τη στάθμη της θάλασσας ωθώντας τον αέρα προς το άνοιγμα που βρίσκεται στην κορυφή της συσκευής. Το δημιουργούμενο ρεύμα αέρα προσπίπτει στα πτερύγια του στροβίλου προκαλώντας την περιστροφή του. Καθώς το κύμα υποχωρεί σχηματίζοντας κοιλά, η στάθμη του νερού κατέρχεται προκαλώντας την αναρρόφηση αέρα και την εκ νέου περιστροφή του στροβίλου ο οποίος είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να περιστρέφεται με την ίδια φορά ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του προσπίπτοντος αέρα.

Κλασσικές επάκτιες συσκευές OWC είναι η European Pilot OWC Plant που βρίσκεται στο νησί Pico στις Αζόρες με ονομαστική ισχύ 400kW και η LIMPET OWC που βρίσκεται στο νησί Islay στη δυτική ακτή της Σκωτίας συνολικής ισχύος 500kW. Οι OWC συσκευές μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στην ακτή με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη Sara MWEC ή στην ανοιχτή θάλασσα όπως είναι οι Oceanlinx, Sperboy, Wave Master, MAWEC και Mighty Whale.



Εικόνα 1.7 - Εγκατάσταση ταλαντευόμενης στήλης νερού στην ακτή



Εικόνα 1.8 - Λειτουργία υπεράκτιας ταλαντευόμενης στήλης νερού (Πηγή: Ιστοσελίδα OWCWAVEENERGY)

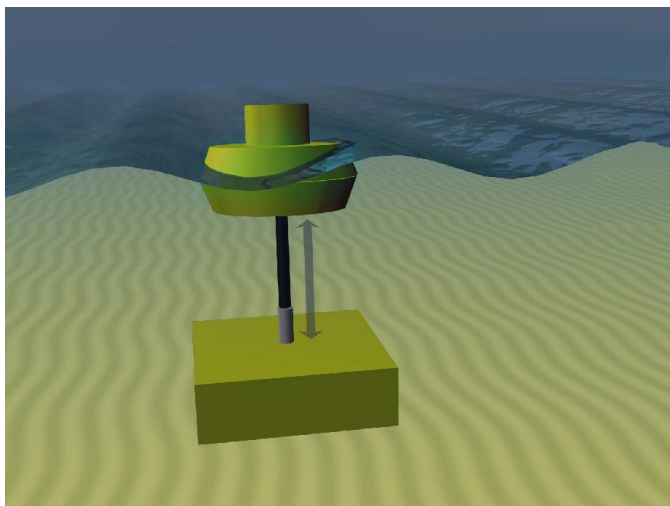
1.5.2. Ταλαντευόμενες συσκευές κυματικής ενέργειας - Oscillating body systems

Οι παράκτιες συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας ανήκουν συνήθως στην κατηγορία των ταλαντευόμενων κυματικών συσκευών οι οποίες είτε επιπλέουν είτε είναι εντελώς βυθισμένες. Εκμεταλλεύονται κύματα με ισχυρό δυναμικό που είναι διαθέσιμα σε μεγάλα

θαλάσσια βάθη συνήθως περισσότερο από 40m βάθος). Οι ταλαντευόμενες συσκευές παράγουν ενέργεια αντιδρώντας με το θαλάσσιο βυθό ή με ένα άλλο ταλαντευόμενο σώμα.

1.5.3. Σημειακός απορροφητής - Point absorber

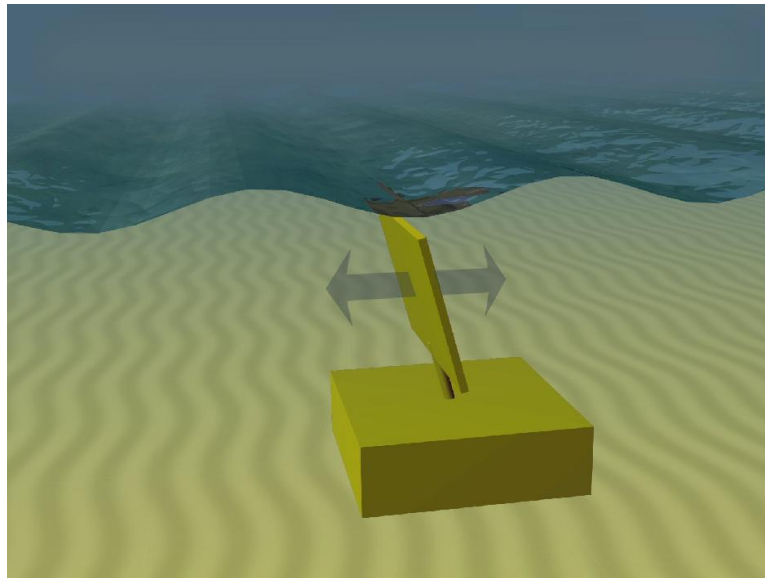
Σύστημα που επιπλέει στην επιφάνεια και συγκρατείται με τη βοήθεια καλωδίων τα οποία προσδένονται στο βυθό. Πρόκειται για πλωτή κατασκευή η οποία απορροφά κυματική ενέργεια από κάθε διεύθυνση μέσω των κινήσεων της και έχει τη δυνατότητα να παράγει μεγάλη ποσότητα ισχύος σε σχέση με το μέγεθός της. Η διάμετρος της συσκευής είναι της τάξης των λίγων μέτρων και το χαρακτηριστικό της σημειακής απορρόφησης είναι η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας από θαλάσσια περιοχή μεγαλύτερης από τις διαστάσεις της συσκευής. Ο σχεδιασμός της θυμίζει σημαδούρα (buoy) και ο σχεδιασμός είναι αξονομετρικός. Η κατακόρυφη κίνηση της σημαδούρας (buoy) είναι απαραίτητη ώστε να επιτευχθεί η συμπίεση και αποσυμπίεση του αερίου ή υγρού που είναι εγκλωβισμένο στη συσκευή. Το ρευστό αναγκάζει σε περιστροφή το σύστημα παραγωγής μηχανικής ενέργειας (για παράδειγμα τον ρότορα ενός στροβίλου) που συνδέεται με τον άξονα περιστροφής της ηλεκτρικής γεννήτριας. Έτσι η κατακόρυφη κίνηση των κυμάτων μετατρέπεται σε περιστροφική.



Εικόνα 1.9 - Υπεράκτια συσκευή point absorber (Πηγή: Ιστοσελίδα AQUARET).

1.5.4. Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης - Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)

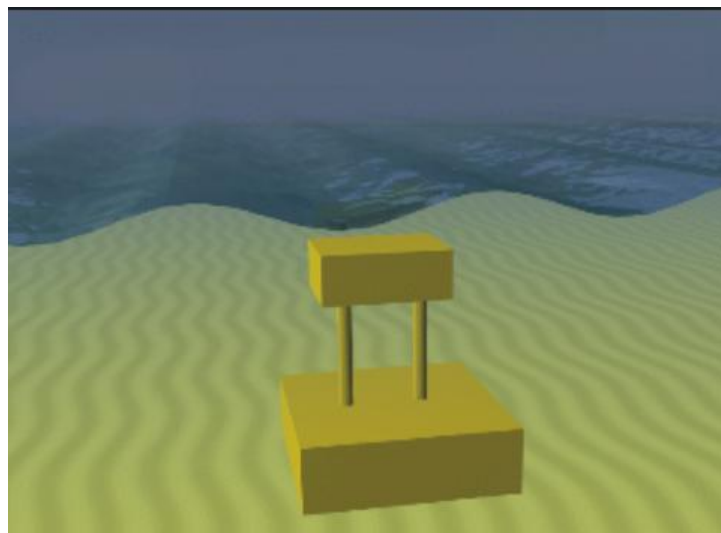
Συσκευές άμεσης εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τη σχετική κίνηση ενός βραχίονα σε σχέση με ένα σταθερό σημείο. Ο περιστρεφόμενος βραχίονα που είναι αγκυρωμένος κοντά στον πυθμένα, εκμεταλλεύεται την οριζόντια ταχύτητα των μορίων του νερού των θαλάσσιων κυμάτων. Ο βραχίονας ταλαντεύεται ως ανάστροφο εκκρεμές λόγω της κίνησης των κυμάτων. Τοποθετούνται σε βάθη μεγαλύτερα από 20 μέτρα (παράκτια ή υπεράκτια τεχνολογία). Σημερινά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι η υποβρύχια συσκευή Waveroller και το διατρητικό επιφάνειας Oyster.



Εικόνα 1.10 - Συσκευή οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Πηγή: Ιστοσελίδα AQUARET).

1.5.5. Υποθαλάσσια συσκευή διαφορικής υδροστατικής πίεσης - Submerged pressure differential

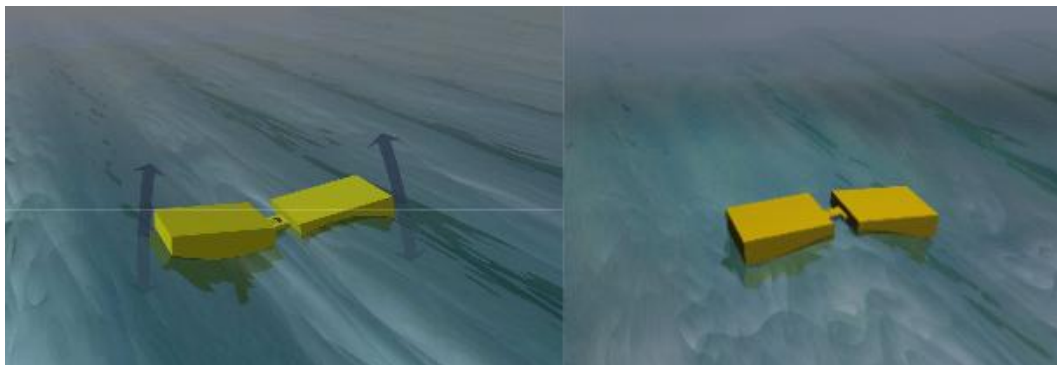
Βυθιζόμενη συσκευή που συνήθως εγκαθίστανται κοντά στην ακτή και προσαρτάται στον πυθμένα. Η κίνηση των κυμάτων προκαλεί την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας πάνω από τη συσκευή, πράγμα που δημιουργεί μία διαφορά πίεσης η οποία αναγκάζει τη συσκευή να ανεβοκατεβαίνει με τα κύματα. Ο σωστός σχεδιασμός της συγκεκριμένης εγκατάστασης διαθέτει αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης. Ένα καλό παράδειγμα υλοποίησης της σχεδίασης αυτής μέχρι σήμερα είναι η AWS (Archimedes Wave Swing) που διαθέτει καλά χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης. Μία ακόμα συσκευή που ανήκει σε αυτή την κατηγορία είναι η Waverotor.



Εικόνα 1.11 - Υποθαλάσσια συσκευή διαφορικής υδροστατικής πίεσης (Πηγή: Ιστοσελίδα AQUARET).

1.5.6. Εξασθενητής κυματισμών - Wave attenuator

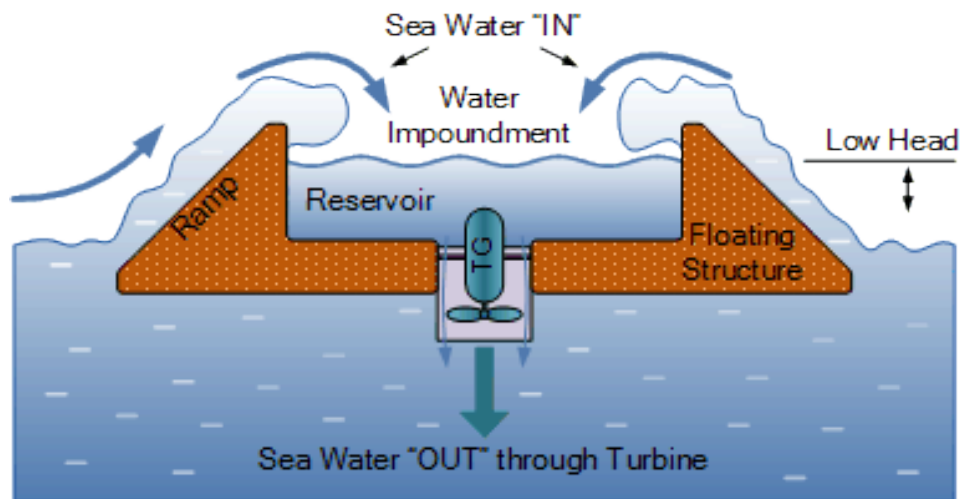
Είναι μία πλωτή συσκευή ευθυγραμμισμένη κάθετα προς το μέτωπο του κύματος. Με τις κινήσεις του κυματισμού, η συσκευή ουσιαστικά επιπλέει επί των διερχόμενων κυματισμών και αποσπά την ενέργειά τους με την επιλεκτική δέσμευση των κινήσεων καθ' όλο το μήκος της. Σημερινό παράδειγμα εξασθενητή κυματισμών είναι η συσκευή Pelamis. Προηγούμενα σχέδια ήταν η κυματική αντλία McCabe για θαλάσσιες δοκιμές και η σχεδία Cockerel.



Εικόνα 1.12 - Εξασθενητής κυματισμών (Πηγή: Ιστοσελίδα AQUARET).

1.5.7. Συσκευή υπερχειλίσης - Overtopping device

Μία άλλη κατασκευή μετατροπής κυματικής ενέργειας που επιτρέπει την ανατροπή των κυμάτων και την εισαγωγή τους σε μία δεξαμενή αποθήκευσης σε επίπεδο υψηλότερο από το μέσο θαλάσσιο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας. Η συσκευή αποτελείται από ένα τοίχωμα πάνω στο οποίο σπάνε τα κύματα και το νερό συλλέγεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης. Τα προσκρούοντα κύματα δημιουργούν ένα ύψος πτώσης το οποίο απελευθερώνεται πίσω στη θάλασσα μέσω συμβατικών στροβίλων χαμηλής πίεσης που είναι εγκατεστημένοι στον πυθμένα της δεξαμενής. Οι συσκευές υπερχειλίσης δεν ακολουθούν γραμμική κυματική θεωρία, σε αντίθεση με τις άλλες κατηγορίες συσκευών. Οι συσκευές υπερχειλίσης είναι συνήθως μεγάλες κατασκευές λόγω του απαιτούμενου χώρου για τη δεξαμενή η οποία χρειάζεται να εξασφαλίσει μία ελάχιστη χωρητικότητα αποθήκευσης. Οι συσκευές μπορεί να είναι πλωτές κυρίως υπεράκτιες όπως η Wave Dragon ή και σταθερές στη στεριά όπως η TapChan και η Sea Slot Cone Generator (SSG) η οποία ενσωματώνεται σε κυματοθραύστη.



Εικόνα 1.13 - Υπεράκτια συσκευή υπερχειλίσσης (Πηγή: Ιστοσελίδα ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS-WAVE ENERGY)

1.6. Σύστημα μετατροπής ενέργειας

Έξι τύποι συστημάτων μετατροπής ενέργειας ή Power Take-off Systems (PTO) για τη μετατροπή κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική [16]:

I. Μηχανές υδραυλικής συμπίεσης

Η κίνηση της κυματικής συσκευής κινεί το υδραυλικό πιστόνι μίας αντλίας και έτσι ενέργεια συσσωρεύεται σε ένα υγρό. Ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κατόπιν γεννήτρια ικανή να κινηθεί από το συμπιεσμένο υγρό. Επίσης υπάρχει και η εναλλακτική όπου χρησιμοποιείται κατευθείαν το συμπιεσμένο νερό της θάλασσας για την κίνηση υδροστρόβιλου.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Κατάλληλο για συγκεκριμένες μετατοπίσεις
2. Αποθήκευση ενέργειας
3. Προσαρμόζεται ανάλογα με τη χρήση: Υδροστρόβιλος για χρήση θαλάσσιου νερού, Συσσωρευτής και γεννήτρια, Ευκολία χρήσης σε επάκτιες εγκαταστάσεις.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Απαιτείται εξοπλισμός για τη συντήρησή του
2. Απώλειες πίεσης
3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

II. Μηχανικό

Μηχανικά συστήματα μετατροπής κυματικής ενέργειας εμφανίζονται σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη. Αποτελούνται από γραναζωτή σύνδεση μετατροπής της κατακόρυφης κίνησης σε περιστροφική (ατέρμων κοχλίας) και συστήματα μετατροπής της ταλαντευόμενης περιστροφικής κίνησης σε περιστροφή σταθερής φοράς (σύστημα συμπλέκτη). Η τελική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος γίνεται με την κίνηση του άξονα της γεννήτριας.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Υψηλή απόδοση μετατροπής
2. Ευκολία στην μετάδοση κίνησης στη γεννήτρια
3. Δυνατότητα να παρέχει φιλτραρισμένη ισχύ στην έξοδο (με χρήση σφονδύλου)

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Αριθμός κινούμενων εξαρτημάτων

III. Γραμμική γεννήτρια

Μία γραμμική γεννήτρια αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες και ένα σταθερό άξονα με πηνία τοποθετημένα γύρω από αυτόν.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Άμεση μετατροπή
2. Απλή κατασκευή
3. Αριθμός κινούμενων εξαρτημάτων

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Η ισχύς στην έξοδο δεν φιλτράρεται
2. Όχι δυνατότητα αποθήκευσης

IV. Αεριοστρόβιλος

Χρησιμοποιείται συνήθως σε τεχνολογίες ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (OWC) όπου η φορά κίνησης του αέρα δεν επηρεάζει τη φορά περιστροφής της μηχανής.

V. Υδροστρόβιλοι

Συνήθως χρησιμοποιούνται χαμηλής πίεσης μηχανές, συνήθως για συσκευές υπερχείλισης (overtopping device).

1.7. Τεχνολογίες Ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (OWC)**1.7.1. Limpet**

Το 1988 το Queen's University Belfast σε συνεργασία με τις εταιρίες Wavegen Ireland Ltd, Charles Brand Ltd, Kirk McClure Morton και την I.S.T. Portugal ανέλαβαν να κατασκευάσουν και να δοκιμάσουν μία παράκτια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων. Η μονάδα έχει συνολική ισχύ 500kW και η έναρξη της λειτουργίας πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2000. Έκτοτε η εγκατάσταση λειτουργεί και ελέγχεται εξ αποστάσεως, ενώ τροφοδοτεί το δίκτυο του ηνωμένου Βασιλείου με ηλεκτρική ενέργεια. Η μέχρι σήμερα επιτυχημένη λειτουργία χωρίς επίβλεψη της εγκατάστασης τους LIMPET απέδειξε τις δυνατότητες συνεισφοράς της παράκτιας κυματικής ενέργειας στα εθνικά αποθέματα ενέργειας.

Η συσκευή χρησιμοποιεί τρεις στήλες ύδατος που ταλαντώνονται μέσα σε θαλάμους από τσιμέντο με εσωτερικές διαστάσεις 6 μέτρα επί 6 μέτρα και σε κλίση 45° ως προς την οριζόντιο εγκλωβίζοντας συνολική επιφάνεια νερού 169m². Οι επάνω επιφάνειες των θαλάμων συνδέονται μεταξύ τους και η μετατροπή ισχύος γίνεται μέσω ενός κοινού άξονα ενός στρόβιλου που συνδέεται με μία γεννήτρια. Οι θάλαμοι έχουν εξωτερικό πλάτος 21 μέτρα και είναι τοποθετημένοι 17 μέτρα από τη φυσική ακτογραμμή σε ένα κατασκευασμένο βαθούλωμα μέσου βάθους 6 μέτρων.



Εικόνα 1.14 - Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας LIMPET στο νησί Islay της Σκωτίας

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει ένα στρόβιλο Wells διαμέτρου 2.6m που αποτελείται από δύο σειρές πτερυγίων που περιστρέφονται αντίστροφα (counter-rotating) κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα. Κάθε σειρά πτερυγίων αποδίδει ισχύ 250kW. Η ισχύ στην έξοδο εξομαλύνεται και αντιστρέφεται πριν τη σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής σε εύρος από 700 έως 1400rpm. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης ελέγχονται από ειδικό λογισμικό και μπορούν να μεταβληθούν. Ο θόρυβος που παράγεται από την ροή του αέρα διαμέσου των στρόβιλων μειώνεται σε ένα ειδικό ακουστικό θάλαμο πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Επίσης υπάρχει και βαλβίδα ελέγχου της ροής του αέρα ώστε να ρυθμίζεται η παροχή.



Εικόνα 1.15 - Απεικόνιση λειτουργίας της εγκατάστασης LIMPET

Σημαντικά χαρακτηριστικά των στρόβιλομηχανών Wells είναι ο συντελεστής απόσβεσης (damping coefficient) και η απόδοση μετατροπής (conversion efficiency). Ο συντελεστής

απόσβεσης υποδηλώνει τη σχέση μεταξύ της πτώσης πίεσης διαμέσου της μηχανής και της παροχής του αέρα που εισέρχεται στη μηχανή ενώ υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ τους σε μία μηχανή Wells για σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Ο συντελεστής απόσβεσης είναι σημαντικό χαρακτηριστικό για την μετατροπή κυματικής ενέργειας καθώς συμβάλλει στον υπολογισμό της διαθέσιμης ισχύς στην έξοδο. Η απόδοση της μηχανής ορίζεται ως ο λόγος της ισχύς στην έξοδο της μηχανής προς την διαθέσιμη ενέργεια του αέρα. Μία αποτελεσματική μηχανή Wells απαιτεί υψηλή απόδοση για μεγάλο εύρος λειτουργίας.

Η κατασκευή του LIMPET θεωρείται μεγάλη επιτυχία παρόλο που η παραγόμενη ισχύ είναι μικρότερη από την προβλεπόμενη. Συνέβαλε στην ανάπτυξη τεχνογνωσίας σχετικά με σχετικά με τον τρόπο κατασκευής, τη διαδικασία λειτουργίας το πως μπορεί να προσαρμόζεται η εγκατάσταση στις συνθήκες λειτουργίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος ώστε να αποδίδει το μέγιστο δυνατό. Το LIMPET προσαρμόζεται αυτόματα στις συνθήκες λειτουργίας της θάλασσας καθώς έχει τη δυνατότητα να συνδέεται και να αποσυνδέεται από το δίκτυο. Ταυτόχρονα διεξάγονται πειραματικές μετρήσεις οι οποίες αποστέλλονται στο πανεπιστήμιο του Belfast μέσω ISDN γραμμών.

Το σύστημα συλλογής πληροφοριών του LIMPET ελέγχει όλες τις παραμέτρους λειτουργίας. Η διαθέσιμη κυματική ενέργεια έχει μετρηθεί για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα χρησιμοποιώντας υποθαλάσσιους αισθητήρες. Τα δεδομένα από το σύστημα αξιολόγησης χωρίζονται σε εκείνα που χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς και σε εκείνα που είναι απαραίτητα για τη σωστή σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Η απόδοση του LIMPET είναι μικρότερη από το αναμενόμενο καθώς αρχικά υπερεκτιμήθηκε η κυματική ενέργεια που φτάνει στις συσκευές ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, όπως επίσης και η απόδοση του στροβίλου Wells στην πραγματικότητα αποκλίνει από τα διαθέσιμα υπολογιστικά αποτελέσματα για μόνιμα ροή. Με βάση τα χρήσιμα αποτελέσματα από δοκιμή και αξιολόγηση της εγκατάστασης LIMPET αναπτύχθηκαν νέα σχέδια σε συνδυασμό με διάφορες μεθόδους κατασκευή καθώς και νέα υλικά.

Το κόστος της κατασκευής ανήλθε στα US\$1.44 εκατομμύρια ενώ ο κύκλος της ζωής του υπολογίζεται πως είναι 30 έτη. Το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το LIMPET είναι 0.10 Ευρώ/kWh [17,18].

Sea State	Tz (s)	Hs (m)	Power (kW)	% Occurrence
1	10.0	1.5	8.8	1.85
2	12.4	1.6	9.6	0.40
3	7.6	1.6	8.9	2.87
4	9.8	1.5	9.4	8.18
5	10.0	2.5	24.8	1.42
6	11.9	1.6	10.1	0.76
7	11.8	2.4	23.3	1.13
8	11.9	2.9	33.6	0.18
9	14.7	2.2	21.4	0.18
10	7.6	1.5	8.9	9.23
11	7.6	1.5	21.6	0.33
12	9.6	1.6	10.0	10.83
13	9.6	2.5	25.5	4.98
14	10.0	2.9	34.2	0.36
15	11.8	1.6	10.7	0.87
16	11.3	2.4	22.7	2.18
17	12.2	2.9	35.3	1.53
18	12.3	3.5	48.8	0.33
19	13.1	2.8	34.2	0.15
20	13.6	3.4	50.9	0.15
21	7.6	1.6	10.4	9.49
22	7.7	2.6	25.2	0.98
23	9.7	1.6	10.5	8.98
24	9.6	2.4	23.0	7.09
25	10.1	3.0	37.8	1.67
26	10.1	3.6	51.6	0.18
27	11.5	1.6	11.5	0.62
28	12.3	2.3	22.2	0.87
29	12.0	2.9	35.9	1.49
30	11.8	3.5	51.9	0.87
31	11.7	4.0	66.4	0.55
32	7.6	1.5	9.5	3.60
33	7.8	2.4	23.5	0.62
34	9.6	1.5	10.1	3.09
35	9.5	2.4	23.4	2.51
36	9.7	3.0	38.9	1.93
37	9.8	3.6	56.1	0.47
38	9.9	4.0	67.3	0.07
39	12.6	2.2	21.1	0.36
40	11.7	3.0	38.1	0.73
41	12.2	3.6	56.2	0.76
42	11.7	4.1	75.5	0.47
43	11.3	4.4	83.7	0.15
44	14.8	3.5	56.9	0.07
45	13.6	3.9	71.8	0.04
46	13.5	4.4	89.9	0.11
47	10.0	2.5	26.6	0.25
48	9.7	3.0	37.3	0.47
49	10.1	3.7	58.5	0.29
50	11.9	2.9	37.3	0.15
51	12.1	3.6	56.6	0.40
52	11.9	4.1	73.9	0.44
53	13.4	4.4	92.6	0.07

Εικόνα 1. 16 - Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από LIMPET ανάλογα με το ύψος και την περίοδο των θαλάσσιων κυμάτων [18]

1.7.2. European Wave Energy Pilot Plant - Pico OWC

Η εγκατάσταση Pico OWC κατασκευάστηκε ως ένα πιλοτικό Ευρωπαϊκό πρόγραμμα με τη συγχρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Κύριος σκοπός του προγράμματος ήταν η πραγματοποίηση της ιδέας για εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος που θα τροφοδοτεί το δίκτυο ενός μικρού νησιού. Επίσης το OWC plant θα παρείχε τη δυνατότητα για δοκιμές του μηχανισμού power take off, κυρίως αεριοστροβίλων. Τέλος θα αποτελούσε το πρότυπο για την συνολικής μεθοδολογίας σχεδιασμού μίας παρόμοιας εγκατάστασης. Για παράδειγμα πως θα είναι η γεωμετρία της κατασκευής, ποιός είναι ο απαραίτητος εξοπλισμός, ποιά είναι η μεθοδολογία που προβλέπει την παραγόμενη ενέργεια.

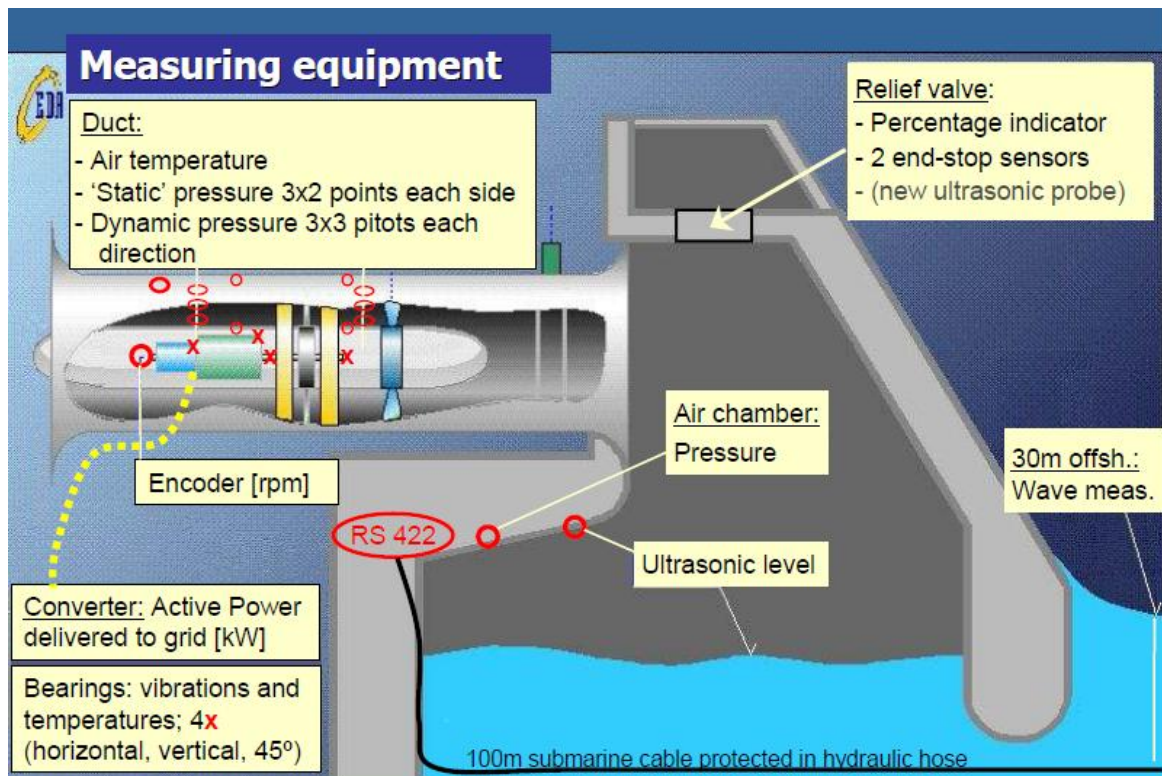
Το πρόγραμμα ξεκίνησε το 1992 στηριζόμενο από τις τοπικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας για παροχή ηλεκτρισμού και η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1999 με τη συνεργασία του Instituto

Superior Técnico (IST). Λίγο πριν ολοκληρωθεί η κατασκευή ένα ατύχημα που οφείλονταν σε πλημμύρα κατέστρεψε τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, όμως η επιδιόρθωση έγινε σε σύντομο χρονικό διάστημα και έτσι το Pico OWC τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το καλοκαίρι του 1999. Όμως πολλά τεχνικά προβλήματα και έλλειψη χρηματοδότησης οδήγησαν στη διακοπή της κατασκευής για μερικά χρόνια. Το 2003, ο οργανισμός WavEC Offshore Renewable πήρε την ευθύνη της εγκατάστασης έχοντας ως υποστήριξη εθνική χρηματοδότηση. Οι πρώτες δοκιμές έγιναν το 2005 όπου παρουσιάστηκαν σοβαρά τεχνικά προβλήματα όπου δεν ήταν εύκολο να επιλυθούν με την παρούσα χρηματοδότηση. Όμως η ομάδα που συμμετείχε στο πρόγραμμα συνέχισε το ερευνητικό της έργο προκειμένου να βελτιωθεί η εγκατάσταση, αυξάνοντας τις ώρες λειτουργίας, τη διαθεσιμότητα και την παραγόμενη ισχύ την περίοδο 2006-2008.

Κατά το έτος 2010 μικρά τεχνικά προβλήματα καθυστέρησαν την πλήρη λειτουργία της μονάδας αλλά σταδιακά έγινε η εγκατάσταση αυτόματου και απομακρυσμένου ελέγχου. Έπειτα από επιτυχημένες δοκιμές αυτόνομης λειτουργίας μεταξύ Σεπτεμβρίου και Δεκεμβρίου 2010, επιτεύχθηκε συνολική παραγωγή 45MWh για 1450 ώρες λειτουργίας. Το 2011 το ενδιαφέρον στράφηκε στην προετοιμασία μίας κατασκευής όπου θα τοποθετούνταν στην εγκατάσταση και θα αποτελούσε μία πλατφόρμα για δοκιμές στροβιλομηχανών, κατάλληλο για εξοπλισμό από 100kW έως 700kW.

Το νησί Pico είναι το μεγαλύτερο στο σύμπλεγμα των νήσων Azores, το σημείο όπου τοποθετήθηκε η συσκευή OWC παρέχει υψηλό ενεργειακό δυναμικό λόγω του βραχώδους ανάγλυφου της περιοχής αλλά και του μεγάλου θαλάσσιου βάθους.

Η εγκατάσταση Pico OWC αποτελείται από ένα θάλαμο κατασκευασμένο από τσιμέντο όπου το μπροστινό του μέρος είναι μερικώς βυθισμένο στη θάλασσα. Ο θάλαμος βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και εγκλωβίζει ποσότητα αέρα η οποία συμπιέζεται ή αποσυμπιέζεται ανάλογα με τον κυματισμό (12x12m² η τομή του θαλάμου). Η αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης ακολουθεί την αρχή λειτουργίας της ταλαντευόμενης στήλης νερού (OWC) που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η OWC χρησιμοποιεί μία μηχανή Wells με οδηγητικά περύγια, οριζόντιου άξονα που είναι συνδεδεμένη με μία γεννήτρια. Υπολογίζεται ότι η μέγιστη στιγμιαία ισχύς εξόδου είναι 560kW θεωρώντας ότι ο στρόβιλος αποδίδει περίπου στο 80%. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της αποκόλλησης της ροής στη μηχανή χρησιμοποιείται μία ρυθμιστική βαλβίδα ώστε να ελέγχεται η πίεση του διερχόμενου αέρα από τη μηχανή. Ένα από τα πιο σημαντικά και καινοτόμα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης σχετίζονται με την μεταβλητή ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας (750 έως 1500rpm) [19].



Εικόνα 1.17 - Τομή της OWC εγκατάστασης Pico [19]

Συμπεράσματα από τη λειτουργία της εγκατάστασης Pico OWC:

- Ομαλή λειτουργία γεννήτριας
- Καλή λειτουργία στροβίλου Wells και οδηγικών πτερυγίων
- Παραγωγή ισχύος σε ήρεμες θαλάσσιες συνθήκες
- Σημαντική συμβολή της ρυθμιστικής βαλβίδας στην συνολική απόδοση της εγκατάστασης

1.8. Παράκτιες υβριδικές συσκευές εκμετάλλευσης αιολικής και κυματικής ενέργειας

Η κύρια πρόκληση για τις παράκτιες εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παραμένει το θέμα του συνδυασμού μίας οικονομικά βιώσιμης κατασκευής που εκμεταλλεύεται όσο το δυνατό περισσότερο από το ισχυρό δυναμικό των παράκτιων θαλάσσιων περιοχών ενώ ταυτόχρονα το κόστος της να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με την παγκόσμια αγορά.

Υπάρχουν αρκετές ομοιότητες με την τεχνολογία των κλασικών αιολικών πάρκων ενώ ταυτόχρονα η ανάγκη για όλο και περισσότερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας για την κάλυψη του φορτίου οδήγησε τη βιομηχανία παράκτιων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας να αναπτυχθεί γρήγορα. Η τεχνολογία της Principle Power, Inc.'s (PPI) με το όνομα Wind Float αφορά ένα πλεύσιμο αιολικό πάρκο μεγάλης ισχύος όπου κάθε παράκτια ανεμογεννήτρια είναι τοποθετημένη σε μία θαλάσσια πλατφόρμα (WindFloat) που αποτελείται από τρεις ημιβυθισμένες εξέδρες σχεδιασμένες να τοποθετούνται σε θαλάσσια βάθη μεγαλύτερα από 45 μέτρα [16]. Η παράκτια ανεμογεννήτρια είναι μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα όπου τοποθετείται

στην κορυφή της μίας εκ των τριών εξέδρων της πλατφόρμας αφήνοντας χώρο στην πλατφόρμα για την τοποθέτηση συμπληρωματικών συσκευών.

Η Principle Power Inc. και το National Renewable Energy Lab (NREL) αξιολόγησαν το σενάριο που αφορά την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης συσκευής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας στην εγκατάσταση Wind Float εισάγοντας μία νέα τεχνολογία που ονομάζεται WindWaveFloat (WWF). Οι WindFloat συσκευές μετατρέπονται σε WindWaveFloat (WWF) συσκευές καθώς κάτω από κάθε εξέδρα είναι εφικτό να τοποθετηθεί ένας σύστημα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας (WEC).



Εικόνα 1.18 - Εγκατάσταση WindWaveFloat

Η ενσωμάτωση διαφορετικών συσκευών σε μία πλατφόρμα μπορεί να αποφέρει οικονομικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα. Χρησιμοποιείται κοινός εξοπλισμός πρόσδεσης στο βυθό, το ίδιο υποθαλάσσιο ηλεκτρικό καλώδιο και τις ίδιες συσκευές μεταφοράς. Έτσι το συνολικό κόστος κεφαλαίου μειώνεται συγκριτικά με το κόστος για την κάθε επένδυση ξεχωριστά.. Επιπλέον, η WindWaveFloat δίνει τη δυνατότητα αύξησης της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, αύξηση της συνολικής ικανότητας της πλατφόρμας και σταθερότητα της μεταφερόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο. Το υβριδικό σύστημα εκμετάλλευσης αιολικής - κυματικής ενέργειας αποφέρει μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω του κοινού εξοπλισμού για την αγκυροβόληση και της ευελιξίας τοποθέτησης σε βάθη μεγαλύτερα από 150-250 πόδια. Αυτά τα βάθη θεωρούνται μεγάλα για συσκευές κυματικής ενέργειας καθώς απαιτείται υψηλό κόστος για αγκυροβόληση. Αναμένεται πιο σταθερή και αξιόπιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για παράδειγμα σε κατάσταση δύσκολων καιρικών συνθηκών όπου οι ανεμογεννήτριες δεν λειτουργούν η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνεχίζεται έχοντας ως πηγή τα κύματα.

Συνεπώς για την εγκατάσταση μίας WaveWindFloat συσκευής εξετάζονται δύο βασικά σημεία:

1. Η βιωσιμότητα από τεχνική και οικονομική άποψη εξετάζοντας διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας (Power Take off systems PTO) από τον άνεμο και τα κύματα.
2. Η αξιολόγηση του μέσου συνολικού κόστους (Levelized Cost of Energy, LCOE) της WaveWindFloat εγκατάστασης σε σχέση με την WindFloat.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός υδροστροβίλου Wells που θα τοποθετηθεί κάτω από κάθε μία εξέδρα, η οποία λειτουργεί σαν OWC συσκευή. Η μηχανή Wells σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στις θαλάσσιες συνθήκες της περιοχής όπου θα τοποθετηθεί και να αποδώσει μία συγκεκριμένη ισχύ. Λεπτομέρειες ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Όπως αναφέρθηκε, κάθε μία από τις εξέδρες μπορεί να λειτουργήσει σαν OWC συσκευή. Το εσωτερικό της εξέδρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να εγκλωβίζεται αέρας ενώ στην κορυφή της υπάρχει άνοιγμα ώστε να επιτρέπει στον αέρα να κινείται αμφίδρομα καθώς το κύμα προσπίπτει πάνω της. Στην περιοχή κοντά στο άνοιγμα προς την ατμόσφαιρα τοποθετείται ο στρόβιλος Wells που κάνει την μετατροπή σε μηχανικό έργο. Οι διαστάσεις της OWC συσκευής προσδιορίζονται από μετρήσεις που γίνονται στη θαλάσσια περιοχή εγκατάστασης έτσι ώστε να μπορέσει να απορροφήσει όσο το δυνατό περισσότερη κυματική ενέργεια γίνεται.

2. ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΟΣ

2.1. Γενικά

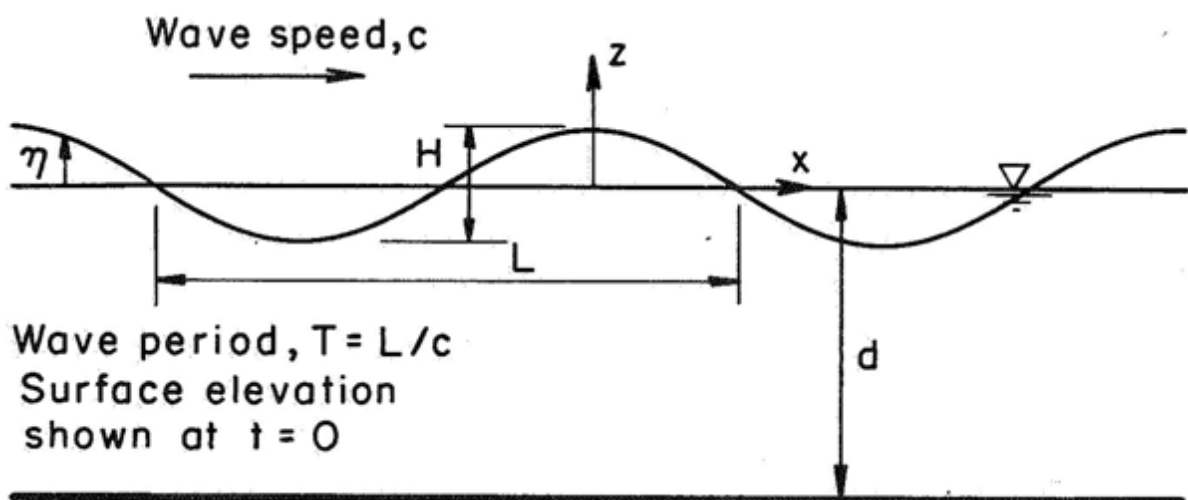
Η επιφάνεια της θάλασσας βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση με διαρκείς αναταράξεις, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Η κύρια αιτία για την κίνηση αυτή, που μας ενδιαφέρει και περισσότερο για παράγωγη ενέργειας είναι ο άνεμος. Κατά την έναρξη του ανέμου, στην επιφάνεια ήρεμου ύδατος δημιουργούνται ‘ρυτίδες’ ακανόνιστου σχήματος, οι οποίες μετατρέπονται αρχικά, υπό την συνεχή επίδραση του ανέμου, σε ακανόνιστα κύματα. Τα κύματα αυτά στην συνέχεια, αφού διανύσουν κάποια απόσταση, μετατρέπονται σε πιο ομοιόμορφα κύματα με διακριτό ύψος και περίοδο.

Ουσιαστικά τα κύματα είναι περιοδικές ταλαντώσεις των μορίων του νερού με τις οποίες μεταφέρεται η ενέργεια που αποκτήθηκε από τον άνεμο. Η ενέργεια αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την διάρκεια αλληλεπίδρασης ανέμου-θάλασσας καθώς και από το μήκος αλληλεπίδρασης. Κατά την μεταφορά οι απώλειες ενέργειας ιδιαίτερα στα βαθιά νερά είναι μικρές, γι’ αυτό και η εκτόνωση της ισχύος των κυμάτων γίνεται κυρίως με την θραύση τους στην ακτή.

Επειδή ο άνεμος είναι ένα μεταβλητό φαινόμενο από περιοχή σε περιοχή είναι φανερό πως η μορφή των κυμάτων είναι αποτέλεσμα σύνθεσης κυμάτων με διαφορετικό ύψος, μήκος και περίοδο. Η μαθηματική περιγραφή αυτών των πραγματικών κυμάτων είναι ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα στατιστικής. Ο πιο εύκολος τρόπος να περιγράψουμε ένα κύμα είναι μέσω μια απλής ημιτονοειδούς συνάρτησης. Με τον τρόπο αυτό η ανάλυση για την επίδραση κύματος-σώματος γίνεται αρκετά πιο εύκολη και τα αποτελέσματα της μπορούν να αναχθούν και σε πραγματικά κύματα, καθώς αυτά παριστάνονται με επαλληλία διάφορων αρμονικών κυμάτων.

2.2. Χαρακτηριστικά κύματος

Οι ιδιότητες του κύματος όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.1, είναι:



Εικόνα 2.1 - Ιδιότητες κύματος

Το **μήκος κύματος** (L): Είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο κορυφών (ή δύο κοίλων). Στην παρούσα εργασία θα το συμβολίζουμε με το μικρό ελληνικό γράμμα λ .

Η περίοδος κύματος (T): Είναι ο χρόνος που αντιστοιχεί για το πέρασμα δυο κορυφών από το ίδιο σημείο.

Βάθος νερού (d): Η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι τον βυθό.

Το ύψος κύματος (H): Η κάθετη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και ενός κοίλου.

Αν το κύμα θεωρηθεί δισδιάστατο και αρμονικό τα τέσσερα παραπάνω μεγέθη αρκούν για να το περιγράψουν. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλα σημαντικά μεγέθη που θα χρειαστούν αργότερα και προκύπτουν από τα παραπάνω και είναι τα εξής:

Αριθμός κύματος (k):

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Πλάτος κύματος (A):

$$A = \frac{H}{2}$$

Συχνότητα κύματος (f):

$$f = \frac{1}{T}$$

Κυκλική συχνότητα κύματος (ω):

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Ταχύτητα κύματος (c):

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

2.3. Γραμμική θεωρία κύματος (θεωρία Airy)

Η επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής που διέπουν ένα κύμα είναι γενικά ένα πολύπλοκο πρόβλημα για το οποίο έχουν αναπτυχθεί αρκετές θεωρίες. Η πιο απλή και δημοφιλής λύση, που βρίσκεται και σε πολλά συγγράμματα [7έως 11], είναι η γραμμική θεωρία κύματος, η οποία απλοποιεί το πρόβλημα με βάση τις παρακάτω παραδοχές:

- Το κύμα μπορεί να θεωρηθεί δισδιάστατο (δε διαφοροποιείται κατά την διεύθυνση y)
- Ιδανικό ρευστό. Δηλαδή χωρίς εσωτερικές τριβές μεταξύ των μορίων τους.
- Ασυμπιεστο ρευστό. Δηλαδή σταθερή πυκνότητα
- Αστρόβιλο πεδίο ροής. Δηλαδή τα στοιχεία του ρευστού δεν περιστρέφονται.
- Ως στάθμη μηδενικής πίεσης θεωρείται η επιφάνεια του υγρού.
- Το πλάτος κύματος είναι μικρό συγκρινόμενο με το μήκος κύματος και το βάθος. ($H \ll \lambda, d$)
- Οι επιφανειακές τάσεις αμελούνται.

Με τις παραδοχές της ασυμπίεστης και αστρόβιλης ροής, η εξίσωση συνέχειας, εισάγοντας το δυναμικό ταχύτητας, παίρνει την μορφή της εξίσωσης Laplace:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

Και αντίστοιχα η εξίσωση Bernoulli για ασυμπίεστη, μη μόνιμη, δυναμική ροή γίνεται:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = f(t) \quad (2.2)$$

Οι **οριακές συνθήκες** που χρειαζόμαστε για την λύση της Laplace είναι:

1) Ο Βυθός αποτελεί αδιαπέραστο στερεό τοίχωμα. (συνθήκη μη εισχώρησης)

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = -h \quad (2.3)$$

2) Συνθήκη σταθερής πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια. (χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρούμε $p=0$)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz = 0, \quad z = \eta(x, t) \quad (2.4)$$

Όπου η σταθερά $f(t)$ έχει ενταχθεί στο $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$. Η ελεύθερη επιφάνεια είναι $z = \eta(x, t)$.

3) Ικανοποίηση της κινηματικής συνθήκης ότι η ελεύθερη επιφάνεια είναι μια υλική επιφάνεια, δηλαδή αποτελείται από τα ίδια σωματίδια. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως:

$$\frac{D(z - \eta(x, t))}{Dt} = 0 \quad (2.5)$$

Το οποίο με πράξεις οδηγεί στο

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad z = \eta(x, t) \quad (2.6)$$

Παρατηρούμε (εξισώσεις 2.2, 2.6) ότι το πρόβλημα δεν ακόμα γραμμικό. Όμως με την παραδοχή του μικρού ύψους κύματος σε σύγκριση με το βάθος και το μήκος ($H \ll \lambda, d$) οι μη γραμμικοί όροι μπορούν να αμεληθούν και έτσι με τις εξισώσεις.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta = 0, \quad z = \eta(x, t) \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad z = \eta(x, t) \quad (2.8)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = -h \quad (2.9)$$

Και την Laplace, χρησιμοποιώντας μέθοδο χωρισμού μεταβλητών [9] βρίσκουμε το δυναμικό της ταχύτητας και μέσω αυτού κάθε κίνηση. Η κίνηση της επιφάνειας περιγράφεται από την σχέση:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.10)$$

Ενώ η κατακόρυφη μετατόπιση κάθε σωματιδίου περιγράφεται από τη σχέση:

$$\xi(x, z, t) = -\frac{H \sinh k(z+d)}{2 \sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (2.11)$$

Η οποία για βαθιά νερά $d/\lambda > \frac{1}{2}$ παίρνει τη μορφή:

$$\xi(x, z, t) = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξίσωση:

$$\lambda = T^2 \frac{g}{2\pi} \tanh kd \quad (2.13)$$

Όπου αν έχουμε βαθιά νερά τότε το $\tanh kd$ τείνει στο 1 και $\lambda = T^2 g / 2\pi$, που σημαίνει πως το βάθος δεν επηρεάζει το μήκος κύματος (άρα και την ταχύτητα) ενώ σε ρηχά νερά ισχύει $\lambda = T \sqrt{gd}$ και το μήκος κύματος επηρεάζεται από το βάθος.

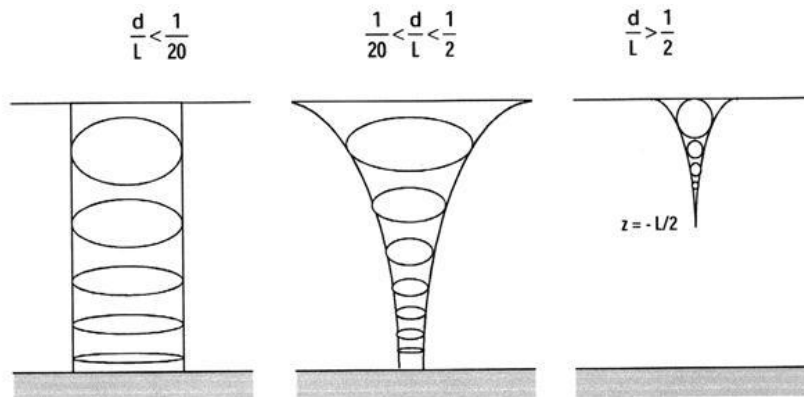
Τέλος σημαντική για την παρούσα εργασία είναι η εξίσωση της πίεσης:

$$\frac{P}{\rho g} = \frac{H \cosh k(z+d)}{2 \sinh kd} \cos(kx - \omega t) - z \quad (2.14)$$

Η οποία για βαθιά νερά $d/\lambda > \frac{1}{2}$ παίρνει τη μορφή:

$$\frac{P}{\rho g} = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) - z \quad (2.15)$$

Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται η διαφορά των τροχιών των σωματιδίων του νερού σε σχέση με το σχετικό βάθος (d/λ). Βλέπουμε πως σε βαθιά νερά ($d/\lambda > \frac{1}{2}$) η κίνηση είναι κυκλική με φθίνουσα ακτίνα όσο προχωράμε προς το βυθό. Μετά από κάποιο βάθος της τάξεως του $\lambda/2$ η ακτίνα γίνεται τόσο μικρή που πρακτικά μπορούμε να θεωρήσουμε πως τα στοιχεία είναι πλέον ακίνητα. Αντίθετα, στα ρηχά νερά ($d/\lambda < \frac{1}{2}$) όλα τα στοιχεία βρίσκονται σε κίνηση σχηματίζοντας ελλειπτικές τροχιές με τον οριζόντιο άξονα σχεδόν σταθερό ενώ τον κατακόρυφο άξονα να φθίνει. Στον πυθμένα η κίνηση είναι σχεδόν οριζόντια. Τέλος στα ενδιάμεσα ύδατα εμφανίζεται μία μέση κατάσταση.



Εικόνα 2.2- Τροχιές σωματιδίων με σχετικό βάθος [8]

Η μέση ενέργεια του κύματος είναι το άθροισμα λόγω της κατακόρυφης ταλάντωσης και της κινητικής λόγω της κυκλικής κίνησης των στοιχείων του νερού.

Η μέση δυναμική ενέργεια ανά οριζόντια επιφάνεια κύματος υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την σχέση $d(E_p) = \rho g \bar{\xi} dV$ όπου $\bar{\xi} = \frac{1}{2}\xi$ είναι το κέντρο βάρους του στοιχειώδες όγκου και $dV = \xi dx$. Έτσι θεωρώντας ημιτονοειδές κύμα προκύπτει:

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g A^2 \left(\frac{J}{m^2} \right) \quad (2.16)$$

Η δυναμική ενέργεια ανά οριζόντια επιφάνεια κύματος υπολογίζεται ολοκληρώνοντας τη σχέση $d(E_K) = \frac{1}{2} (u^2 + w^2) \rho dx dz$ όπου u, w είναι η ταχύτητα κατά την οριζόντια και κάθετη διεύθυνση αντίστοιχα. Προκύπτει:

$$E_K = \frac{1}{4} \rho g A^2 \left(\frac{J}{m^2} \right) \quad (2.17)$$

Παρατηρούμε δηλαδή πως στην περίπτωση ημιτονοειδούς κύματος η δυναμική και η κινητική ενέργεια είναι ίσες. Η συνολική ενέργεια είναι το άθροισμά τους:

$$E = E_p + E_K = \frac{1}{2} \rho g A^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.18)$$

Από την ενέργεια μπορούμε να υπολογίσουμε και τη ροή ενέργειας J . Αυτή μετρείται σε kW ανά μέτρο μετώπου κύματος και δίνεται από τη σχέση:

$$J = E c_g \quad (2.19)$$

Όπου c_g ορίζεται η φασική ταχύτητα ομάδας (ταχύτητα πολλαπλών κυμάτων) που παριστάνει την ταχύτητα με την οποία διαδίδεται η ενέργεια. Για βαθιά νερά ισούται με $c_g = \frac{1}{2}c = \frac{gT}{4\pi}$ άρα τελικά

$$J = \frac{\rho g^2}{32\pi} TH^2 \quad (2.20)$$

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

3.1. Χρησιμότητα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής

Οι βασικές εξισώσεις της Ρευστομηχανικής είχαν καταστρωθεί και συμπληρωθεί από πολλούς ερευνητές ήδη από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Όμως δεν ήταν δυνατό να επιλυθούν, αφού αποτελούν συστήματα μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, για τις οποίες δεν είναι γνωστές γενικές αναλυτικές λύσεις, παρά μόνο σε μερικές ειδικές περιπτώσεις (π.χ. ροή couette). Γι' αυτό για πάνω από ενάμιση αιώνα οι ρευστομηχανικοί και οι αεροδυναμικοί κυρίως επιστήμονες έως το 1900 προχωρούσαν σε φυσικομαθηματικές απλουστεύσεις για να πετύχουν αναλυτικές λύσεις των απλουστευμένων πλέον εξισώσεων ροής.

Η υπολογιστική επανάσταση για την Ρευστομηχανική άρχισε γύρω στο 1970 με τη δυνατότητα να εφαρμόζονται γνωστές αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης με κωδικοποίηση και προγραμματισμό στη "γλώσσα" των συνεχώς εξελισσόμενων ηλεκτρονικών υπολογιστών και να λύνονται προβλήματα, δηλαδή να προϋπολογίζονται πολύπλοκα ροϊκά πεδία τα οποία θεωρούνταν απρόσιτα στις λεπτομέρειες τους με τις αναλυτικές μεθόδους. Αυτό οδήγησε μέσα σε λίγες δεκαετίες στην αναγνώριση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (ΥΡ) ως τον τρίτο πυλώνα της Ρευστομηχανικής, δίπλα στην Αναλυτική και Πειραματική Ρευστομηχανική.

Παλιότερα ο μόνος τρόπος για να μελετηθούν οι ροές ήταν το πείραμα με σήραγγες. Συγκεκριμένα τοποθετούνταν οι γεωμετρίες σε μικρότερη κλίμακα μέσα σε σήραγγες όπου έρεε το ρευστό και έτσι γινόταν οι μετρήσεις των ροϊκών μεγεθών. Όμως ακόμα και σήμερα, μετά τη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών το πείραμα αποτελεί σημαντικό κομμάτι της έρευνας διότι αποδεικνύει - πιστοποιεί τους υπολογισμούς που γίνονται με θεωρητικά μοντέλα. Φυσικά πρέπει να αναφερθεί ότι το κόστος για την πειραματική μελέτη είναι μεγάλο καθώς επίσης και το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να δώσει αποτελέσματα. Ακόμα αδυνατεί πολλές φορές να προσομοιώσει τα φυσικά μεγέθη των γεωμετριών και τις συνθήκες και όσο για τα αποτελέσματα των μετρήσεων αφορούν μόνο συγκεκριμένα ολοκληρωτικά μεγέθη, όπως συνολικές δυνάμεις. Σε αυτό το σημείο φαίνεται η χρησιμότητα της υπολογιστικής ρευστομηχανικής η οποία λύνει σχετικά γρήγορα και οικονομικά τις ροές σε οποιεσδήποτε συνθήκες καθώς επίσης δίνει όλα τα ροϊκά μεγέθη σε κάθε σημείο της ροής. Από την άλλη δεν υπάρχει πάντα μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα και βεβαιότητα για την ορθότητα της λύσης, αφού ροϊκά φαινόμενα, όπως η τύρβη μοντελοποιούνται εμπειρικά λόγω της αδυναμίας επίλυσης των Navier-Stokes σε μεγάλη πυκνότητα σημείων υπολογισμού, ώστε να γίνεται μέτρηση της πολύ μικρής χωρικής κλίμακας λειτουργίας της, που επηρεάζει μακροσκοπικά τη ροή. Συνεπώς ο συνδυασμός υπολογιστικής ρευστομηχανικής και πειράματος δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα και των δύο.

3.2. Αριθμητικές Μέθοδοι στους Κώδικες Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD codes)

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση των ρευστών είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις. Αυτές οι εξισώσεις είναι δομημένες από συνδυασμούς παραμέτρων ροής όπως οι συνιστώσες ταχύτητας και η πίεση στο ρευστό καθώς και οι παράγωγοι αυτών. Με δεδομένο ότι η απευθείας επίλυση αυτών των εξισώσεων με υπολογιστικά μέσα είναι αδύνατη, είναι προφανές ότι πρέπει να

μετατραπούν σε εξισώσεις που περιέχουν μόνο αριθμούς και ο συνδυασμός των οποίων να περιγράφεται με απλές σχέσεις.

Η μετατροπή των μερικών διαφορικών εξισώσεων στο αριθμητικό τους ανάλογο ονομάζεται αριθμητική διακριτοποίηση (numerical discretization). Σε αυτή τη διαδικασία διακριτοποίησης, κάθε όρος μέσα σε μία διαφορική εξίσωση, πρέπει να μετατραπεί σε διαφορικό ανάλογο το οποίο μπορεί να προγραμματιστεί και να υπολογιστεί ο υπολογιστής. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν προς αυτή την κατεύθυνση και ενώ καθεμία βασίζεται σε διαφορετικές αρχές, όλες έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά.

Κοινό χαρακτηριστικό των Κωδίκων της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής είναι η χρήση αριθμητικών μεθόδων, οι οποίες βασίζονται στις πεπερασμένες χωρικές και χρονικές διαφορές και ως γνωστών επικρατέστερες είναι οι εξής τρεις:

- a) Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών FDM (Finite Difference Method),
- b) Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων FVM (Finite Volume Method) και
- c) Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων FEM (Finite Element Method).

Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (FDM): Έχει το πλεονέκτημα της άμεσης λύσης των πλήρων εξισώσεων διατήρησης (συνέχειας, ορμής, ενέργειας) χωρίς να προαπαιτούνται πλέον κάποιες προσεγγίσεις, επειδή οι απειροστές διαφορές (παράγωγοι κάθε τάξης) αντικαθίστανται απευθείας με πεπερασμένες. Μειονέκτημα αποτελεί για αρκετές εφαρμογές η προβληματική συμπεριφορά σύγκλισης προς την ορθή λύση, επειδή τα αριθμητικά λάθη (συνήθως της τάξης $(\Delta y)^2$, $(\Delta y)^3$...) συσσωρευμένα οδηγούν σε μη εκπλήρωση της διατήρησης της μάζας ή/και της ενέργειας και είναι μη συντηρητικές (δηλαδή σε απλουστευμένη διατύπωση π.χ. η συνολική εισρέουσα μάζα στο ροϊκό φαινόμενο μπορεί να αυξάνεται και τελικά κατά την εκροή να είναι μεγαλύτερη!). Τότε απαιτούνται μικρότερα βήματα διακριτοποίησης και επαναληπτικού υπολογισμού, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της χρονικής διάρκειας του υπολογισμού.

Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων (FVM): Επειδή εξ' ορισμού είναι μία συντηρητική μέθοδος (δηλαδή η αριθμητική διακριτοποίηση εμπεριέχει την προϋπόθεση της διατήρησης της μάζας, ορμής και ενέργειας), έχει το πλεονέκτημα να μην παρουσιάζει προβλήματα σύγκλισης με αποτέλεσμα οι επαναληπτικοί υπολογισμοί να μειώνονται οδηγώντας σε σχετικά συντομότερους υπολογιστικούς χρόνους. Είναι κατάλληλη μέθοδος επίσης σε τρισδιάστατα ροϊκά πεδία μεγάλων διαστάσεων (π.χ. πλήρες ροϊκό πεδίο κινητής και ακίνητης περυγώσης σε μία ή και περισσότερες βαθμίδες στροβιλομηχανών). Παρουσιάζουν κατά περίπτωση δυσκολίες, όταν η γεωμετρία του ροϊκού πεδίου είναι ιδιαίτερα σύνθετη. Δηλαδή πρέπει να είναι στοιχειώδεις όγκοι τοπολογικά καρτεσιανού συστήματος (όχι απαραίτητα ορθογώνιου) πάντα με έξι ακμές και έξι πλευρές στην τρισδιάστατη περίπτωση.

Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM): Κύριο πλεονέκτημά της είναι η μεγάλη ευελιξία διακριτοποίησης των εξισώσεων, αφού αρκούν μη δομημένα πλέγματα, τα οποία καθορίζουν τη γεωμετρία του κάθε στοιχείου. Όμως παρουσιάζουν προβλήματα σύγκλισης του υπολογισμού κυρίως σε τρισδιάστατες περιπτώσεις ροής με τρισδιάστατα στοιχεία. Συνήα η μέθοδος απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο συγκριτικά με τις προηγούμενες μεθόδους και περιορίζεται σε σχετικά μικρής έκτασης ροϊκά πεδία.

3.3. Βασικές εξισώσεις περιγραφής της ροής

Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ρευστού είναι μαθηματικές εκφράσεις των νόμων διατήρησης της φυσικής.

- Η εξίσωση συνέχειας εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας που αποτελεί τον πρώτο νόμο της κλασικής Μηχανικής σύμφωνα με τον οποίο η μάζα δεν καταστρέφεται ούτε δημιουργείται.
- Η εξίσωση διατήρησης της ορμής εκφράζει τον δεύτερο βασικό νόμο της κλασικής Μηχανικής, που ονομάζεται και δεύτερος νόμος του Newton, ότι δηλαδή η χρονική μεταβολή της ορμής ισούται με το άθροισμα των δρυσών δυνάμεων.
- Η εξίσωση διατήρησης της ροπής της ορμής ή στροφορμής, εκφράζει ότι η χρονική μεταβολή της στροφορμής ισούται με το άθροισμα των ροπών των δρυσών δυνάμεων.
- Η αρχή διατήρησης της ενέργειας εκφράζει το γενικευμένο νόμο της Θερμοδυναμικής (α' αξίωμα). Στη Μηχανική των ρευστών προσφορότερη μορφή είναι ο ισολογισμός ισχύων, δηλαδή ενεργειών ανά μονάδα χρόνου.

Όταν εφαρμοστούν οι παραπάνω νόμοι διατήρησης σε ένα μικρό στοιχείο ρευστού, το οποίο ονομάζεται όγκος ελέγχου, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις Navier-Stokes (N-S).[40]

Εξισώσεις Navier-Stokes

I. Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (3.1)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού και \vec{U} το διάνυσμα ταχυτήτων στον χώρο.

II. Εξίσωση ορμής

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{U}) = \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{U}) = \rho g_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{U}) = \rho g_w + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (3.4)$$

όπου σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} η πίεση και σ_{ij} ο τανυστής ιξωδών τάσεων ο οποίος για Νευτώνειο ρευστό είναι ίσος προς:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) + \delta_{ij} \lambda (\operatorname{div} \vec{U}) \quad (3.5)$$

όπου $\lambda = -(2\mu)/3$ και οι δείκτες i, j αναπαριστούν τις τρεις διαστάσεις του χώρου.

Όλες οι ροές που αφορούν υδροστροβίλους μπορούν να θεωρηθούν ασυμπίεστες, δηλαδή η πυκνότητα είναι σταθερή. Επίσης, η επίδραση της θερμοκρασίας αμελείται. Για τον λόγο αυτόν δεν έχει προστεθεί η διατήρηση της εσωτερικής ενέργειας στο ανωτέρω σύστημα εξισώσεων. Με τη χρήση της υπόθεσης μη-συμπίεστότητας, το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο και η πυκνότητά του παραμένει σταθερή, έτσι ο παράγοντας $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ που εμφανίζεται στις εξισώσεις συνέχειας και ορμής παίρνει μηδενική τιμή.

Τελικά το σύστημα εξισώσεων του ασυμπίεστου ρευστού περιλαμβάνει τέσσερις εξισώσεις και τέσσερις άγνωστες μεταβλητές που αφορούν την στατική πίεση και τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας (σε καρτεσιανό ή κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων).

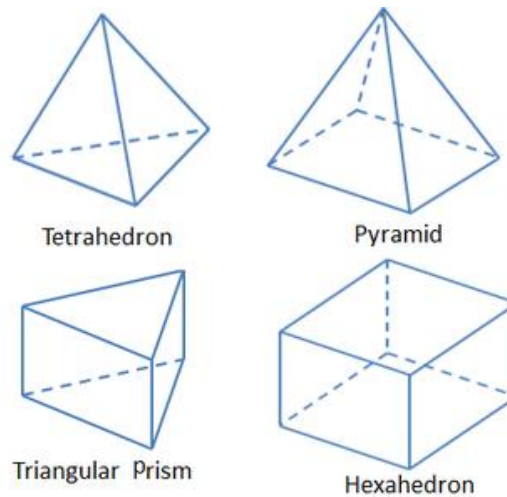
3.4. Διακριτοποίηση του χώρου

Οι εξισώσεις Navier-Stokes δεν μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά για τις περισσότερες πρακτικές ροές και γι' αυτό το λόγο πρέπει να επιλυθούν αριθμητικά σε ορισμένα διακριτά σημεία ή κόμβους στο πεδίο ροής. Η χωρική διακριτοποίηση του πεδίου ροής επιτυγχάνεται με την κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος. Η κατασκευή ενός ποιοτικού υπολογιστικού πλέγματος είναι απαραίτητη για την ακριβή προσομοίωση της υπό εξέταση ροής. Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την καταλληλότητα ενός πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος είναι η πυκνότητά του, η μορφή και η ποιότητά του. Οι τρεις αυτοί παράγοντες έχουν κυρίαρχο ρόλο στην επιτυχία της σύγκλισης του επαναληπτικού αλγόριθμου επίλυσης, στους απαιτούμενους υπολογιστικούς πόρους για τον χρόνο, την μνήμη και την ακρίβεια της επίλυσης του προβλήματος. Συνεπώς, η ενδελεχής μελέτη κατασκευής του πλέγματος ακόμα και σε περιπτώσεις που είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα καταλήγει σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα με ταυτόχρονη σημαντική εξοικονόμηση χρόνου.

Τα χαρακτηριστικά του κάθε ροϊκού προβλήματος καθορίζουν την πυκνότητα που θα πρέπει να έχει το υπολογιστικό πλέγμα. Γενικά, η πυκνότητα του πλέγματος πρέπει να είναι αυξημένη στις περιοχές που αναμένονται έντονες μεταβολές στις ιδιότητες του ρευστού. Στην περίπτωση του στροβίλου Wells, πύκνωση πλέγματος παρατηρείται στις περιοχές μεγάλων κλίσεων των ταχυτήτων και της πίεσης, δηλαδή γύρω από το πτερύγιο. Επίσης πυκνό πλέγμα πρέπει να χρησιμοποιείται και κοντά στα στερεά τοιχώματα όπου σχηματίζεται το οριακό στρώμα. Το τελικό συμπέρασμα για την επάρκεια της πυκνότητας του πλέγματος λαμβάνεται με τη διενέργεια ειδικής μελέτης για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων (mesh independence). Κατά τη διερεύνηση αυτή, η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνει προοδευτικά και επαναλαμβάνεται η προσομοίωση του ίδιου προβλήματος. Στόχος είναι η εύρεση εκείνου του πλέγματος του οποίου περαιτέρω πύκνωση δεν θα επιφέρει αξιοσημείωτες μεταβολές στα αριθμητικά αποτελέσματα της ροής. Η εφαρμογή πυκνότερου πλέγματος από το απαιτούμενο δεν

επιρεάζει πλέον την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά αυξάνει τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο και την απαιτούμενη διαθέσιμη μνήμη του υπολογιστή.

Η μορφή του πλέγματος εξαρτάται από το σχήμα των κελιών. Τα στοιχεία του τρισδιάστατου πλέγματος μπορεί να είναι εξαεδρικά (Hex), συνδυασμός εξαεδρικών και σφηνοειδών στοιχείων (Hex/Wedge), συνδυασμός τετραεδρικών και πολυεδρικών κελιών (Tet/Hybrid), πυραμοειδή (pyramid) και τέλος πολυεδρικά (polyhedron). Αντίστοιχα στην περίπτωση δισδιάστατου πλέγματος, τα στοιχεία μπορεί να είναι τετράπλευρα (Quad), τριγωνικά (Tri) ή συνδυασμός αυτών.



Εικόνα 3.1 - Στοιχεία τρισδιάστατου πλέγματος

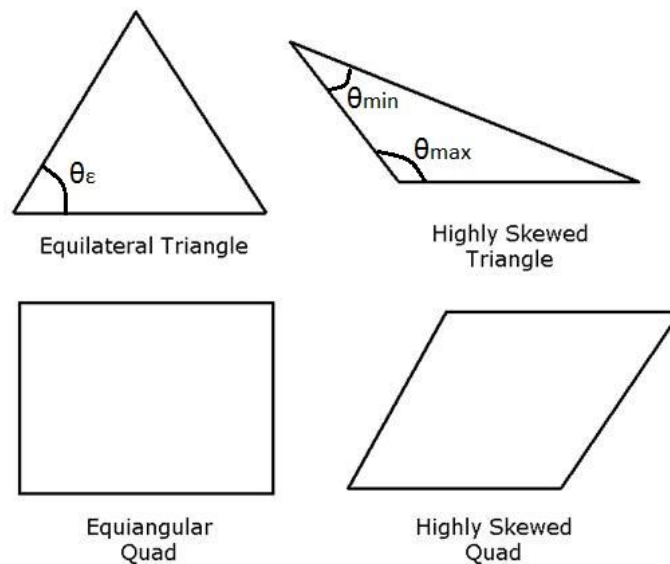
Γενικά σε περίπτωση τρισδιάστατων πλεγμάτων προτιμούνται τα εξαεδρικά κελιά, ενώ στα διδιάστατα προτιμούνται τα τετράπλευρα καθώς έτσι το πλέγμα αποτελείται από λιγότερα κελιά επιτυγχάνοντας καλύτερη ποιότητα πλέγματος. Βέβαια σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η γεωμετρία είναι πολύπλοκη, η κατασκευή εξαεδρικού πλέγματος είναι πολύπλοκη με αποτέλεσμα να προτιμάται το τετραεδρικό. Επίσης, η χρήση εξαεδρικών κελιών επιτρέπει την τοποθέτηση σχετικά μικρών πλευρών κάθετα στη ροή, όπως απαιτείται για την ελαχιστοποίηση σφαλμάτων και σχετικά μεγαλύτερων πλευρών παράλληλα σε αυτή με στόχο την αύξηση του μεγέθους τους. Έτσι στις περιπτώσεις εξαεδρικών ή τετραγωνικών κελιών, τα κελιά μπορούν να έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό και τότε το πλέγμα που προκύπτει χαρακτηρίζεται ως δομημένο (structured).

Η ποιότητα του υπολογιστικού πλέγματος σχετίζεται με τη στρεβλότητά του (skewness), την ομαλότητα και την κατανομή των κόμβων σε αυτό. Υπάρχουν πολλά κριτήρια που ορίζουν την ποιότητα του πλέγματος, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι οι αριθμοί skewness, orthogonal quality και aspect ratio. Οι αριθμοί αυτοί υπολογίζονται χωριστά για κάθε στοιχείο του πλέγματος, με αποτέλεσμα να προκύπτει η μέση ποιότητα του πλέγματος, η ποιότητα του χειρότερου κελιού και άλλα στατιστικά χαρακτηριστικά.

Το συνηθέστερο κριτήριο αξιολόγησης της ποιότητας του πλέγματος είναι η στρεβλότητά του (skewness) και ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση.

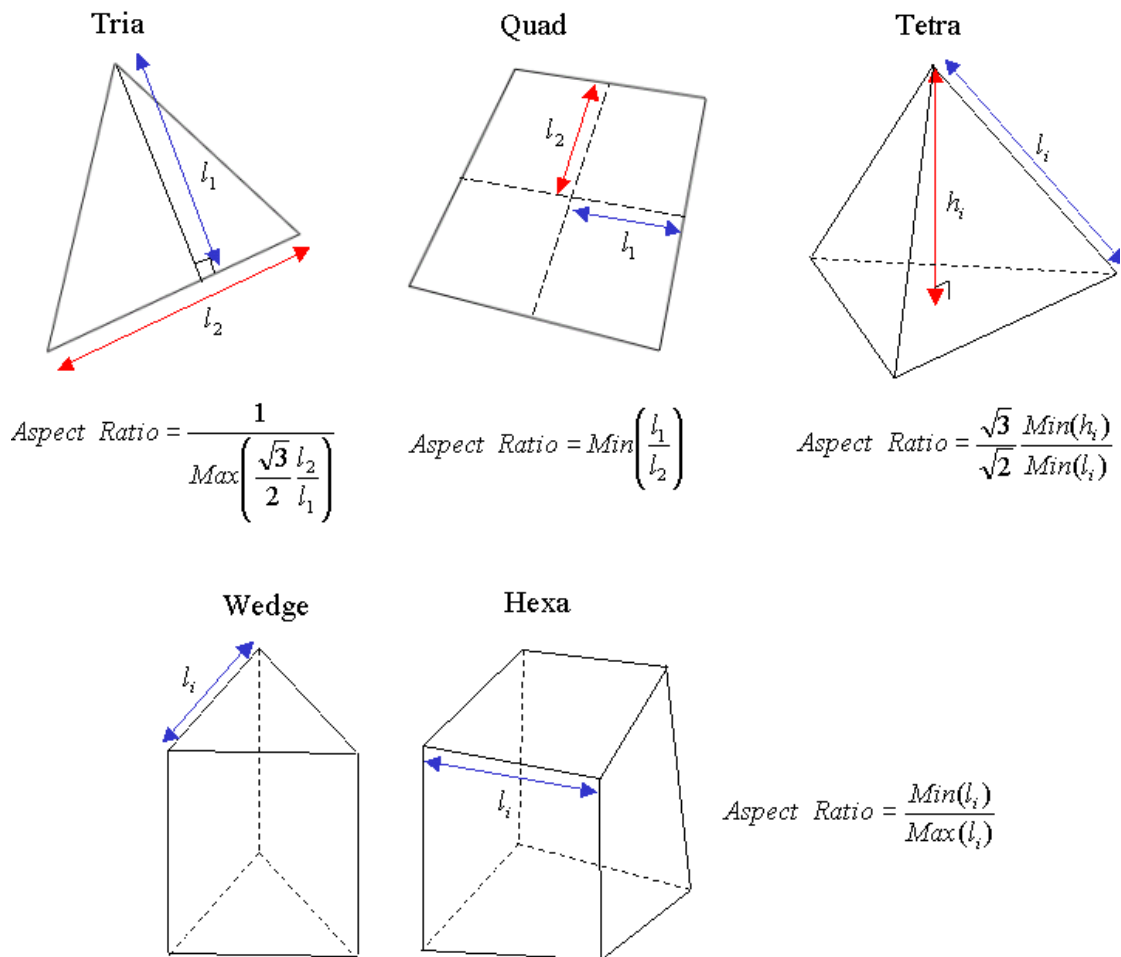
$$\max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_{\epsilon}}{180 - \theta_{\epsilon}}, \frac{\theta_{\epsilon} - \theta_{min}}{\theta_{\epsilon}} \right] \quad (3.6)$$

όπου θ_{max} είναι η μέγιστη γωνία σε ένα κελί, θ_{min} είναι η ελάχιστη, θ_{ϵ} είναι η γωνία της επιφάνειας όπως θα έπρεπε να είναι (60° για τρίγωνο και 90° για τετράγωνο). Ιδανικά η στρεβλότητα πρέπει να είναι μηδέν ενώ η χειρότερη τιμή είναι η μονάδα. Σε γενικές γραμμές, η ασυμμετρία των πιο στρεβλών κελιών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.95 ενώ η μέση τιμή συνίσταται να είναι κάτω από 0.30.



Εικόνα 3.2 - Ποιότητα κελιών με βάση τη στρεβλότητά τους (skewness)

Για να εξασφαλιστεί ικανοποιητική ομαλότητα, είναι σημαντικό οι πλευρές των κελιών να έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος. Αν δεν πραγματοποιηθεί αυτό θα δημιουργηθούν μεγάλα σφάλματα αποκοπής, δηλαδή σφάλματα μεταξύ των διαφορετικών εξισώσεων και τη διακριτοποιημένη μορφή τους, τα οποία θα τείνουν να μεγεθυνθούν κατά την προσομοίωση. Το μέτρο με το οποίο καθορίζεται η ομαλότητα του πλέγματος είναι η αναλογία των διαστάσεων (aspect ratio). Με τον όρο αναλογία διαστάσεων ορίζεται ο λόγος του μήκους της μεγαλύτερης πλευράς προς την μικρότερη.



Εικόνα 3.3 - Παραδείγματα υπολογισμού του aspect ratio για διάφορα πλεγματικά στοιχεία

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η ποιότητα των κελιών επηρεάζει τόσο την πιθανότητα μη σύγκλισης του αλγόριθμου κατά τη διάρκεια της επίλυσης όσο και την ακρίβεια του υπολογισμού. Γενικότερα εξετάζεται η ποιότητα του χειρότερου κελιού και λιγότερο ο μέσος όρος διότι ακόμα και ένα κελί μπορεί να προκαλέσει απόκλιση της λύσης ειδικά αν βρίσκεται σε περιοχή με υψηλά gradients, ενώ το FLUENT δεν δέχεται πλέγματα με skewness μεγαλύτερο από 0.97. [45]

3.5. Επίλυση των εξισώσεων

Αφού διακριτοποιηθεί ο χώρος με την κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος, απαιτείται η διακριτοποίηση των εξισώσεων N-S, ώστε στη συνέχεια να επιλυθούν αριθμητικά. Η μέθοδος διακριτοποίησης την οποία χρησιμοποιεί κώδικας του FLUENT είναι η μέθοδος πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method) [44].

Το FLUENT παρέχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο αριθμητικών μεθόδων επίλυσης:

- Επίλυση που βασίζεται στην πίεση (Pressure-Based Solver)
- Επίλυση που βασίζεται στην πυκνότητα (Density-Based Solver)

Η επίλυση που βασίζεται στην πίεση αναπτύχθηκε για ασυμπίεστες ροές χαμηλής ταχύτητας σε αντίθεση με την επίλυση που βασίζεται στην πυκνότητα που χρησιμοποιήθηκε κυρίως συμπίεστες

ροές υψηλών ταχυτήτων. Πλέον οι μέθοδοι επίλυσης έχουν βελτιωθεί ώστε να μπορούν να επιλύσουν ένα μεγάλο εύρος συνθηκών ροής πέρα από τον αρχικό τους σχεδιασμό.

Και στις δύο αριθμητικές μεθόδους επίλυσης, το πεδίο ταχυτήτων προκύπτει από τις εξισώσεις της ορμής. Στην μέθοδο επίλυσης που βασίζεται στην πυκνότητα, η πυκνότητα προκύπτει από την εξίσωση της συνέχειας ενώ το πεδίο της πίεσης από τις εξισώσεις κατάστασης. Η μέθοδος επίλυσης βασισμένη στην πίεση χρησιμοποιεί μία εξίσωση πίεσης ή διόρθωσης πίεσης, η οποία προκύπτει με κατάλληλο συνδυασμό των εξισώσεων ορμής και συνέχειας.

Ανεξάρτητα της αριθμητικής μεθόδου που θα επιλέγει, χρησιμοποιείται μία τεχνική που θεωρεί έναν όγκο ελέγχου και αποτελείται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- Διακριτοποίηση της γεωμετρίας χρησιμοποιώντας υπολογιστικό πλέγμα.
- Διακριτοποίηση των εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή στους πεπερασμένους όγκους ελέγχου για την κατασκευή αλγεβρικών εξισώσεων για τον υπολογισμό των διακεκριμένων εξαρτημένων μεταβλητών (αγνώστων) όπως οι ταχύτητες και η στατική πίεση.
- Γραμμικοποίηση του συστήματος διακεκριμένων εξισώσεων και επίλυσή του αποδίδοντας νέες τιμές κάθε φορά στις εξαρτημένες μεταβλητές.

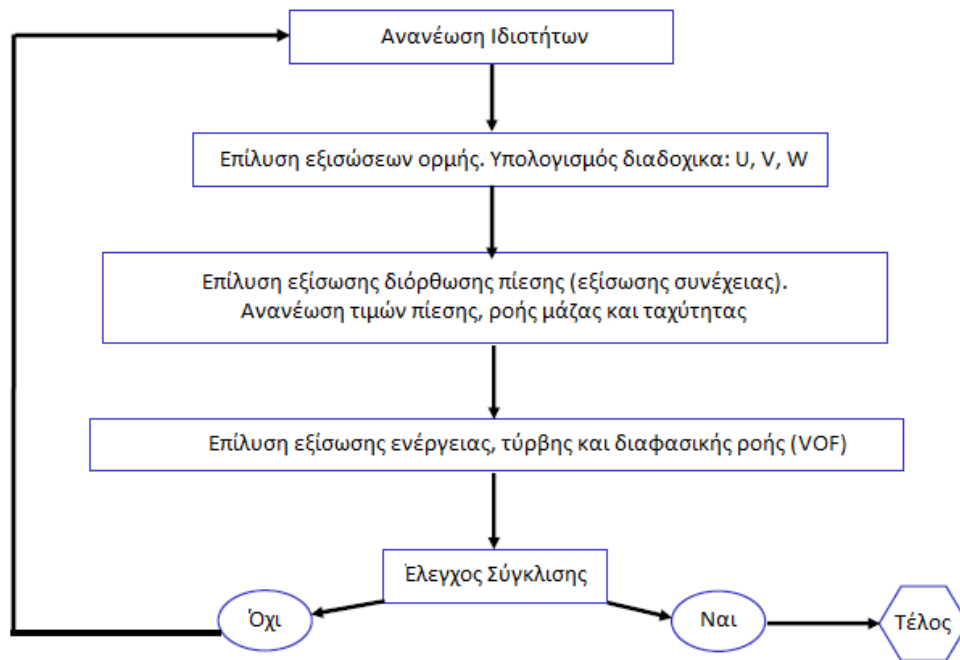
Η διαδικασία διακριτοποίησης της γεωμετρίας και των εξισώσεων είναι κοινή και για τους δύο επιλυτές, η διαφορά έγκειται στην προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την γραμμικοποίηση και επίλυση των διακεκριμένων εξισώσεων.

Αλγόριθμοι επίλυσης βασισμένοι στην πίεση

Όπως αναφέρθηκε οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή είναι μη γραμμικές και συνδυάζονται μεταξύ τους ώστε να προκύψει η τελική λύση, έτσι η διαδικασία επίλυσης περιλαμβάνει επαναλήψεις ώστε το σύστημα των εξισώσεων να επιλύεται επαναλαμβανόμενα μέχρι τη σύγκλιση της λύσης. Η μέθοδος επίλυσης βασισμένη στην πίεση περιλαμβάνει δύο τύπους αλγόριθμων:

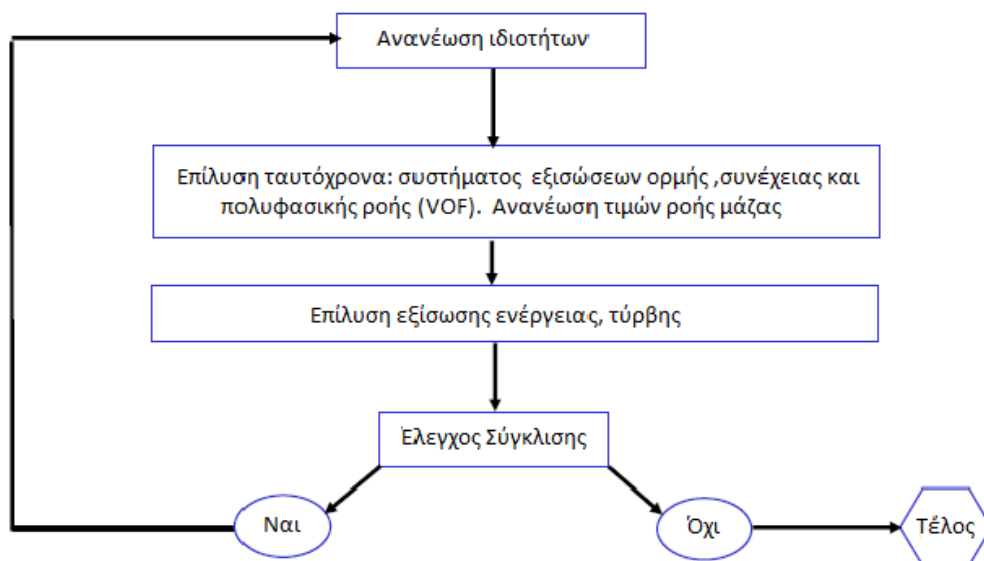
- Αλγόριθμος διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver)
- Αλγόριθμος συζευγμένης επίλυσης (coupled solver)

Στην περίπτωση του αλγόριθμου διαχωρισμένης επίλυσης οι εξισώσεις ορμής και συνέχειας επιλύονται σε διαφορετικά στάδια και όχι ταυτόχρονα. Έτσι, κάθε εξίσωση για κάποια ροϊκή μεταβλητή επιλύεται για στοιχειώδεις όγκους ελέγχου και στη συνέχεια επιλύεται η εξίσωση για την επόμενη ροϊκή μεταβλητή για όλους τους όγκους ελέγχου. Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα με τα βήματα τα οποία ακολουθούνται όταν χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι διαχωρισμένης επίλυσης, σε συνδυασμό με μία εξίσωση σύζευξης μεταξύ της πίεσης και της ταχύτητας.



Εικόνα 3.4 - Λογικό διάγραμμα αλγόριθμων διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver) [45]

Η εναλλακτική μέθοδος επίλυσης των εξισώσεων είναι ο ταυτόχρονος υπολογισμός των ροϊκών μεταβλητών σε έναν όγκο ελέγχου, προτού επαναληφθεί η διαδικασία για τους υπόλοιπους όγκους. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται συζευγμένος (pressure-based coupled). Αρχικά, επιλύει ταυτόχρονα τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας για κάθε όγκο ελέγχου. Στη συνέχεια, επιλύονται οι υπόλοιπες εξισώσεις δηλαδή της ενέργειας και της τύρβης, όπως και στους αλγορίθμους διαχωρισμένης λύσης. Ο ρυθμός σύγκλισης της λύσης αυξάνεται σε σχέση με την περίπτωση διαχωρισμένης επίλυσης, λόγω της ταυτόχρονης επίλυσης των εξισώσεων. Ωστόσο, απαιτεί 1.5 - 2 φορές περισσότερη μνήμη από τους άλλους αλγορίθμους και ο χρόνος πραγματοποίησης κάθε επανάληψης είναι αντίστοιχος της τάξης μεγέθους.



Εικόνα 3.5 - Λογικό διάγραμμα αλγόριθμων συζευγμένης επίλυσης (coupled solver) [45]

3.6. Διακριτοποίηση εξισώσεων ροής και επίλυσης

Για την επίλυση του ροϊκού προβλήματος, αφού ο υπό μελέτη χώρος διακριτοποιηθεί με την κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος, γίνεται η διακριτοποίηση των Navier-Stokes εξισώσεων ώστε να ακολουθήσει η αριθμητική τους επίλυση. Η μέθοδος για την διακριτοποίηση των εξισώσεων που χρησιμοποιείται από το FLUENT είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method).

Η διακριτοποίηση των εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή παρουσιάζεται καλύτερα θεωρώντας την εξίσωση διατήρησης για μη μόνιμη ροή της βαθμωτής ποσότητας ϕ . Η εξίσωση έχει ολοκληρωτική μορφή και αναφέρεται έναν όγκο ελέγχου V που αποτελεί τον όγκο ενός πεπερασμένου κελιού:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3.7)$$

όπου

ρ = πυκνότητα

\vec{v} = διάνυσμα ταχύτητας

\vec{A} = διάνυσμα επιφάνειας

Γ_ϕ = συντελεστής μεταφοράς της ποσότητας ϕ

S_ϕ = παραγωγή της ποσότητας ϕ λόγω πηγών στον όγκο ελέγχου

Εκτελώντας τις πράξεις η διακριτοποιημένη εξίσωση αλγεβρική μορφή και επιλύεται για κάθε κελί της διακριτοποιημένης γεωμετρίας.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (3.8)$$

όπου

N_{faces} = αριθμός επιφανειών κελιού

ϕ_f = τιμή της ποσότητας ϕ στην επιφάνεια f

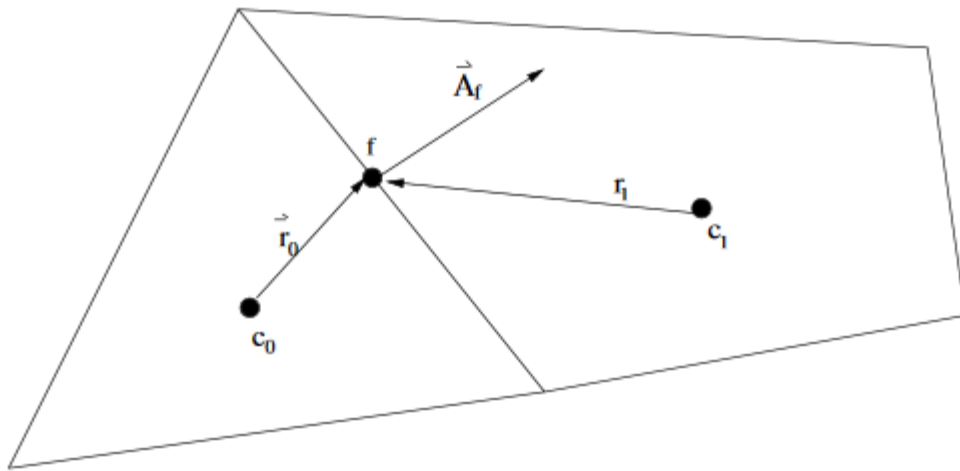
$\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ = ροή μάζας δια μέσου της επιφάνειας

\vec{A}_f = εμβαδό επιφάνειας f

V = όγκος κελιού

Ο όρος, $\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V$, αναφέρεται στη χρονική μεταβολή του μεγέθους και αμελείται σε περίπτωση

μόνιμων ροών. Οι εξισώσεις που επιλύονται έχουν τη γενική μορφή των παραπάνω εξισώσεων και εύκολα εφαρμόζονται στην περίπτωση τρισδιάστατων, μη-δομημένων πλεγμάτων αποτελούμενα από οποιασδήποτε μορφής πολύεδρα [44,45].



Εικόνα 3.6 - Όγκος ελέγχου στον οποίο εφαρμόζονται οι διακριτοποιημένες εξισώσεις ροής

3.7. Επίλυση γραμμικού συστήματος

Η διακεκριμένη βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς περιλαμβάνει την άγνωστη βαθμωτή μεταβλητή φ στο κέντρο του κελιού καθώς και τις άγνωστες τιμές στα γειτονικά κελιά. Η εξίσωση μπορεί να γραμμικοποιηθεί και να πάρει την εξής μορφή:

$$\alpha_p \varphi = \sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + b$$

(3.9)

όπου ο δείκτης n_b αναφέρεται στα γειτονικά κελιά ενώ οι όροι α_p και a_{nb} είναι οι γραμμικοί συντελεστές των φ και φ_{nb} .

Ο αριθμός των γειτονικών κελιών εξαρτάται από την τοπολογία του πλέγματος, αλλά τυπικά είναι ίσος με τον αριθμό των εδρών που εσωκλείουν το κελί.

Το FLUENT αποθηκεύει διακεκριμένες τιμές του βαθμωτού μεγέθους φ στο κέντρο των κελιών (c_0 και c_1 όπως φαίνονται στην Εικόνα 6). Όμως για τον υπολογισμό των όρων μεταφοράς της εξίσωσης χρειάζονται οι τιμές των μεγεθών στις επιφάνειες των όγκων ελέγχου, φ_f . Αυτές υπολογίζονται με τη χρήση σχημάτων παρεμβολής μεταξύ των τιμών του συγκεκριμένου και των γειτονικών κελιών. Υπάρχουν διάφορα σχήματα για τον υπολογισμό των τιμών αυτών και η ακρίβεια της διακριτοποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από αυτά. Το πιο διαδεδομένο είναι το ανάντι σχήμα δεύτερης τάξης (second order upwind) το οποίο αναπτύσσει τη σειρά Taylor της υπολογισθείσας τιμής του μεγέθους στο κέντρο του κελιού, προσφέροντας ακρίβεια δεύτερης τάξης. Το σχήμα αυτό έχει τη μορφή της Εξίσωσης:

$$\varphi_{f,sou} = \varphi + \nabla\varphi \cdot \vec{r} \quad (3.10)$$

όπου φ και $\nabla\varphi$ είναι οι τιμές στο κέντρο του ανάντι κελιού για την ποσότητα φ και της βαθμίδα της και \vec{r} είναι το διάνυσμα θέσης από το κέντρο του κελιού ως το κέντρο της έδρας. Επιπλέον, συνιστάται ως το καλύτερο σχήμα σε περιπτώσεις όπου η ροή δεν είναι ευθυγραμμισμένη με τις γραμμές του πλέγματος. Μειονέκτημα του σχήματος ωστόσο αποτελεί ο αυξημένος απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος, σε σχέση με άλλα σχήματα.

Αν στην Εξίσωση (3.10) αντικατασταθεί το φ με το u , προκύπτει η γραμμικοποιημένη Εξίσωση της ορμής κατά τη διεύθυνση x :

$$\alpha_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S \quad (3.11)$$

Παρόμοιες εξισώσεις προκύπτουν για κάθε κελί στο πλέγμα, δημιουργώντας ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων. Η επίλυση του γραμμικού συστήματος γίνεται χρησιμοποιώντας έναν επιλυτή γραμμικών συστημάτων βασισμένο στη μέθοδο Gauss-Seidel, σε συνδυασμό με μία αλγεβρική πολυπλεγματική μέθοδο (Algebraic Multigrid-AMG), η οποία υπολογίζει τις τιμές των μεταβλητών ροής αρχικά σε αραιότερα πλέγματα του πεδίου ροής, ώστε να προκύπτουν τα γενικά χαρακτηριστικά της ροής. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται στα αραιότερα πλέγματα, χρησιμοποιούνται ως αρχικές προβλέψεις, οι οποίες στη συνέχεια διορθώνονται στα πυκνότερα πλέγματα. Πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία αυτή επιταχύνει την επίτευξη σύγκλισης χωρίς να επηρεάζει στην τελική λύση.

Το ομόθετο (co-located) σχήμα που χρησιμοποιεί το FLUENT αποθηκεύει την ταχύτητα και την πίεση στο κέντρο των υπολογιστικών κελιών. Η επίλυση του συστήματος εξισώσεων ορμής προϋποθέτει την τιμή των βαθμίδων πίεσης στην επιφάνεια του ορίου μεταξύ γειτονικών κελιών. Έτσι, απαιτείται πρώτα η εκτίμηση της πίεσης, ώστε στη συνέχεια να επιλυθεί το σύστημα εξισώσεων της ορμής.

Η εκτίμηση του πεδίου πίεσης γίνεται με τη χρήση κάποιου σχήματος παρεμβολής. Στη συνέχεια, με τη χρήση αλγορίθμων σύζευξης της πίεσης και της ταχύτητας (pressure velocity coupling), εξάγεται μία εξίσωση για την πίεση ή τη διόρθωση πίεσης (pressure correction) από αυτές της συνέχειας και της διατήρησης ορμής. Όταν η εξίσωση συνέχειας ολοκληρωθεί σε έναν όγκο ελέγχου, προκύπτει η διακριτοποιημένη μορφή της:

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f A_f = 0 \quad (3.12)$$

όπου J_f η ροή μάζας δια μέσου της επιφάνειας f .

Συσχετίζοντας τις τιμές της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας, \vec{v}_n , στην επιφάνεια, με τις αποθηκευμένες τιμές της ταχύτητας στα κέντρα των γειτονικών κελιών, προκύπτει η εξής μορφή για τον υπολογισμό των ροών μάζας J_f :

$$J_f = \hat{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1}) \quad (3.13)$$

Όπου, p_{c0} και p_{c1} , είναι οι πιέσεις εντός των δύο κελιών σε κάθε πλευρά μιας επιφάνειας, ενώ ο όρος \hat{J}_f , περιλαμβάνει την επίδραση των ταχυτήτων στα κελιά αυτά. Ο όρος d_f , τέλος είναι συνάρτηση της μέσης τιμής των συντελεστών, a_p , της εξίσωσης ορμής για τα γειτονικά κελιά.

Η Εξίσωση (3.13) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιπλέον σχέσης για την πίεση, η οποία είναι αναγκαία για την επίλυση των εξισώσεων. Στην περίπτωση αυτή θα έχει επιτευχθεί η σύζευξη της ταχύτητας με την πίεση.

Στο λογισμικό FLUENT παρέχονται τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι για τη σύζευξη της πίεσης με την ταχύτητα, οι εξής:

1. SIMPLE
2. SIMPLER
3. PISO
4. Coupled

Οι πρώτοι τρεις αλγόριθμοι είναι παρόμοιοι μεταξύ τους και αποτελούν μέρος της γενικότερης αντιμετώπισης της λύσης των εξισώσεων, η οποία ονομάζεται διαχωρισμένη επίλυση (segregated solver).

Ο αλγόριθμος SIMPLE αποτελεί την προεπιλογή στο FLUENT και πρόκειται για μία μέθοδο που χρησιμοποιείται ευρέως, αν και ο ρυθμός σύγκλισής της είναι χαμηλός. Η λογική πίσω από τη μέθοδο αυτή είναι απλή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί το γεγονός ότι το ρευστό ρέει από μία περιοχή υψηλής πίεσης σε μία με χαμηλότερη. Αρχικά, χρησιμοποιώντας ένα εκτιμώμενο πεδίο πίεσης, ελέγχει τη διατήρηση της συνέχειας στους όγκους ελέγχου. Αν αυτή δεν ικανοποιείται, και συμβαίνει η εισροή μάζας να είναι μεγαλύτερη από την εκροή, η πίεση στους όγκους ελέγχου σε σχέση με τους γειτονικούς έχει θεωρηθεί πολύ μικρή. Συνεπώς, πρέπει να αυξηθεί η πίεση στο όγκο ελέγχου αυτό σε σχέση με τους γύρω του. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει αν η εκροή είναι μεγαλύτερη της εισροής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η λύση συγκλίνει.

Με τη μορφή εξισώσεων, ο αλγόριθμος δουλεύει ως εξής: Η εξίσωση ορμής επιλύεται με τη χρήση ενός εκτιμώμενου πεδίου πίεσης, p^* . Από την Εξίσωση [] προκύπτει η πρώτη προσέγγιση της ροής μάζας διαμέσου της επιφάνειας, J_f^* :

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f (p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (3.14)$$

δεν ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας. Συνεπώς, μία διόρθωση J'_f προστίθεται στη ροή μάζας διαμέσου της επιφάνειας J_f^* και έτσι προκύπτει μία διορθωμένη τιμή ροής δια μέσου της επιφάνειας, J_f :

$$J_f = J_f^* + J'_f \quad (3.15)$$

ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας. Ο αλγόριθμος SIMPLE θεωρεί ότι το J'_f μπορεί να γραφτεί ως:

$$J'_f = d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.16)$$

όπου p' είναι η διόρθωση της πίεσης στο κελί. Ο αλγόριθμος SIMPLE στη συνέχεια αντικαθιστά τη διορθωμένη εξίσωση ροής μάζας, δηλαδή τις Εξισώσεις (3.15) και (3.16) στη διακριτοποιημένη Εξίσωση συνέχειας (3.14), ώστε να προκύψει η διακριτοποιημένη μορφή της εξίσωσης διόρθωσης πίεσης p' στον όγκο ελέγχου:

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (3.17)$$

όπου ο όρος πηγής, b , αφορά το ρυθμό καθαρής εισροής μάζας στον όγκο ελέγχου και ισούται με:

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (3.18)$$

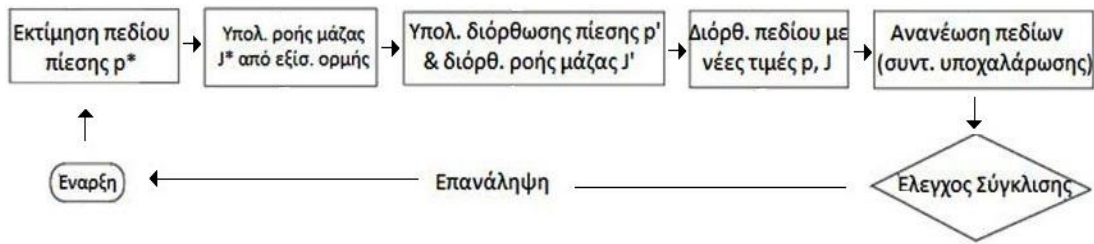
Η εξίσωση διόρθωσης πίεσης, Εξίσωση (3.17), επιλύεται με τη χρήση της αλγεβρικής πολυπλεγματικής μεθόδου AMG. Αφού υπολογιστεί η λύση, δηλαδή βρεθεί η διόρθωση της πίεσης, p' , προκύπτουν οι τιμές της πίεσης και της ροής διαμέσου της επιφάνειας, Εξισώσεις (3.19) και (3.20) αντίστοιχα:

$$p = p^* + \omega_p p' \quad (3.19)$$

$$J_f = J_f^* + d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.20)$$

Ο όρος ω είναι ο συντελεστής υποχαλάρωσης (under-relaxation factor). Η διορθωμένη ροή μάζας διαμέσου της επιφάνειας των όγκων ελέγχων, ικανοποιεί τη διακριτοποιημένη εξίσωση συνέχειας σε κάθε επανάληψη.

Το λογικό διάγραμμα επίλυσης του αλγορίθμου SIMPLE παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7 - Λογικό διάγραμμα ροής αλγόριθμου SIMPLE

Ο αλγόριθμος SIMPLEC έχει παρόμοια δομή με τον SIMPLE, ωστόσο συγκλίνει ταχύτερα στην περίπτωση απλών ροών. Σε πολύπλοκα προβλήματα δεν παρουσιάζει διαφορά από τον αλγόριθμο SIMPLE.

Ο αλγόριθμος σύζευξης πίεσης-ταχύτητας PISO, αποτελεί παραλλαγή του SIMPLE, στον οποίο όμως οι επαναληπτικοί υπολογισμοί που απαιτούνται έχουν μεταφερθεί μέσα στο υπολογιστικό στάδιο της επίλυσης της εξίσωσης διόρθωσης της πίεσης. Έτσι, κάθε επαναληπτικό βήμα απαιτεί περισσότερο χρόνο, αλλά τα συνολικά βήματα τα οποία απαιτούνται για την επίτευξη σύγκλισης είναι λιγότερα, ειδικά στην περίπτωση μη-μόνιμης ροής. Στην περίπτωση μόνιμων ροών εντούτοις, δεν υπερέρχει του αλγορίθμου SIMPLE.

Η εναλλακτική μέθοδος επίλυσης των εξισώσεων είναι ο ταυτόχρονος υπολογισμός των ροϊκών μεταβλητών σε έναν όγκο ελέγχου, προτού επαναληφθεί η διαδικασία για τους υπόλοιπους όγκους. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται συζευγμένος (pressure-based coupled). Αρχικά, επιλύει ταυτόχρονα τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας για κάθε όγκο ελέγχου. Στη συνέχεια, επιλύονται οι υπόλοιπες εξισώσεις δηλαδή της ενέργειας και της τύρβης, όπως και στους αλγορίθμους διαχωρισμένης λύσης. Ο ρυθμός σύγκλισης της λύσης αυξάνεται σε σχέση με την περίπτωση διαχωρισμένης επίλυσης, λόγω της ταυτόχρονης επίλυσης των εξισώσεων. Ωστόσο, απαιτεί 1.5-2 φορές περισσότερη μνήμη από τους άλλους αλγορίθμους και ο χρόνος πραγματοποίησης κάθε επανάληψης είναι σημαντικά μεγαλύτερος.

Οι διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής και συνέχειας (3.8) και (3.12) αντίστοιχα, με τις ροές μάζας εκφρασμένες από την Εξίσωση (3.14), μετασχηματίζονται, ώστε στο δεξί μέλος να βρίσκονται τα υπόλοιπα των εξισώσεων για την παρακολούθηση της σύγκλισης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Έτσι, προκύπτει το τελικό σύστημα γραμμικών εξισώσεων το οποίο έχει τη μορφή:

$$\sum_j [A]_{ij} \vec{X}_j = \vec{B}_j \quad (3.21)$$

όπου ο τετραγωνικός πίνακας, $[A]_{ij}$, περιλαμβάνει τους συντελεστές που υποδηλώνουν την επίδραση του κελιού i στο j . Επίσης, τα διανύσματα στήλης, \vec{X}_j , και \vec{B}_j , είναι τα διανύσματα αγνώστων και υπολοίπων και έχουν τη μορφή:

$$\vec{X}_j = [p'_i \ u'_i \ v'_i \ w'_i]^T \quad (3.22)$$

$$\vec{B}_j = [-r_i^p \quad -r_i^u \quad -r_i^v \quad -r_i^w]^T \quad (3.23)$$

Το γραμμικό σύστημα (3.21) επιλύεται με την αλγεβρική πολυπλεγματική μέθοδο (AMG solver). Ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται, σε κάθε επανάληψη προκύπτει νέα τιμή του φ η οποία θα πρέπει να τείνει προς την τελική τιμή, στην οποία θα συγκλίνει ο αλγόριθμος. όμως, ανάλογα με το πρόβλημα, την ποιότητα πλέγματος και άλλες παραμέτρους, είναι δυνατόν να υπερεκτιμηθεί η μεταβολή του φ , με αποτέλεσμα η μέθοδος να μην συγκλίνει. Για τον λόγο αυτόν εισάγονται συντελεστές υποχαλάρωσης, ω , σύμφωνα με το σχήμα:

$$\varphi = \varphi_{old} + \omega \Delta\varphi \quad (3.24)$$

Ενσωματώνοντας την υποχαλάρωση του φ στο σύστημα των διακριτοποιημένων εξισώσεων με στόχο τη σταθεροποίηση της σύγκλισης των μη-γραμμικών επαναλήψεων προκύπτει η Εξίσωση [44, 45]:

$$\frac{\alpha_p}{\omega} \varphi = \sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + \frac{1 - \omega}{\omega} \alpha_p \varphi_{old} \quad (3.25)$$

3.8. Οριακές συνθήκες

Κατά την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes και της εξίσωσης της ροής, απαιτείται ο προσδιορισμός κατάλληλων αρχικών οριακών συνθηκών (boundary conditions) οι οποίες είναι απαραίτητες για την επίλυση μαθηματικών μοντέλων. Δίνουν πληροφορίες για τη διεύθυνση της κίνησης του ρευστού ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζουν την ροή, για παράδειγμα της μάζας, της ορμής και της ενέργειας, εντός του υπολογιστικού χώρου. Προσδιορίζουν το ρευστό ή το στερεό που βρίσκεται εντός του χωρίου και το είδος της κάθε επιφάνειας που αποτελεί όριο της εξεταζόμενης γεωμετρίας.

Για τη σωστή επίλυση ενός προβλήματος, ο χρήστης πρέπει να ορίζει σωστά και αποτελεσματικά τις οριακές συνθήκες και να κατανοεί το ρόλο τους στον αλγόριθμο επίλυσης. Αν οι οριακές συνθήκες δεν οριστούν σωστά τότε η λύση ίσως δώσει λάθος αποτελέσματα και ταυτόχρονα οδηγήσει στην αύξηση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος.

Σε προβλήματα όπου υπάρχει μόνο ρευστό στο υπολογιστικό χωρίο το οποίο μελετάται ως ασυμπίεστο ρευστό υπάρχουν οι εξής τύποι οριακών συνθηκών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

1. **Οριακές συνθήκες πίεσης (Pressure boundary conditions):** Σαν είσοδος απαιτείται η στατική πίεση ενώ η πίεση λειτουργίας (operating pressure) αποτελεί ξεχωριστή είσοδο στο λογισμικό. Χρησιμοποιείται όταν ούτε η παροχή του ρευστού ούτε η ταχύτητα είναι γνωστά μεγέθη.

$$P_{absolute} = P_{static} + P_{operating}$$

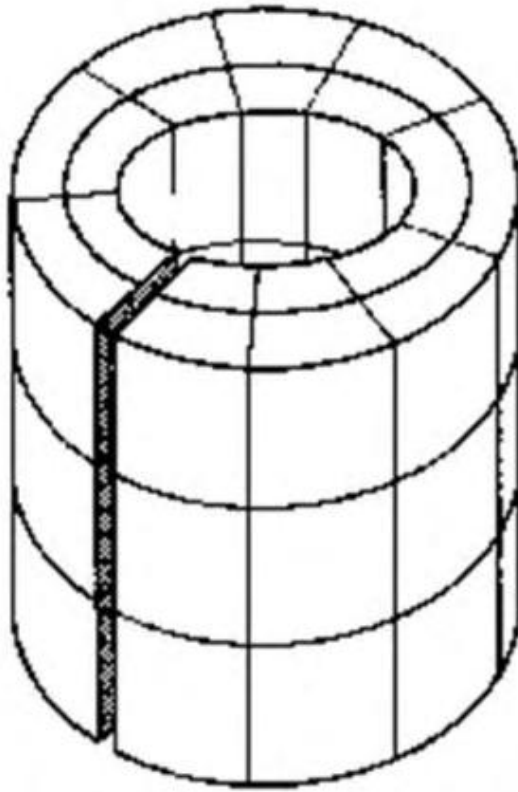
- a) Οριακή συνθήκη πίεσης στην είσοδο: Είναι κατάλληλη συνθήκη για συμπίεστες και ασυμπίεστες ροές. Η ροή μάζας στην είσοδο διαφέρει και εξαρτάται από τις

εσωτερικές συνθήκες και προσδιορίζεται από τη διεύθυνση της ροής. Για ασυμπίεστες και συμπιεστές ροές ισχύουν αντίστοιχα:

$$p_{total} = p_{static} + \frac{1}{2}\rho v^2$$

$$p_{total} = p_{static} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{k/(k-1)}$$

- b) Οριακή συνθήκη πίεσης στην έξοδο: Σε αυτή την περίπτωση ορίζεται η στατική πίεση στη έξοδο της ροής και παίρνει την τιμή της στατικής πίεσης του περιβάλλοντος στο οποίο η ροή καταλήγει. Συνήθως η στατική πίεση θεωρείται σταθερή σε όλη την επιφάνεια που ορίζεται σαν επιφάνεια εξόδου. Σε περιπτώσεις, για παράδειγμα, έντονων στροβιλισμών της ροής στην έξοδο διατίθεται η δυνατότητα ακτινικής ισορροπίας της κατανομής πίεσης (radial equilibrium pressure distribution).
2. **Ταχύτητα εισόδου (Velocity inlet):** Ορίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας στη επιφάνεια που ορίζεται σαν επιφάνεια από την οποία εισέρχεται η ροή. Επίσης προσδιορίζονται οι βαθμωτές ιδιότητες της ροής στην είσοδο. Χρησιμοποιείται συνήθως όταν το προφίλ της ταχύτητας είναι γνωστό στην είσοδο. Συνήθως εφαρμόζεται ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας αλλά είναι διαθέσιμα και άλλα προφίλ. Χρησιμοποιείται κυρίως σε ασυμπίεστες ροές.
 3. **Συνθήκη εκροής (Outflow boundary):** Χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη ροή που εξέρχεται από ένα υπολογιστικό χωρίο ενώ η ταχύτητα και η πίεση της ροής είναι άγνωστα μεγέθη πριν την επίλυση του ροϊκού προβλήματος. Υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη χρήση του. Συγκεκριμένα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με συμπιεστές ροές, με την οριακή συνθήκη πίεσης εισόδου, σε μη μόνιμες ροές έχοντας ως μεταβλητή την ταχύτητα.
 4. **Στερεό τοίχωμα (Wall boundaries):** Είναι αδιαπέραστο από το ρευστού (συνθήκη μη-εισχώρησης), ενώ υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού της τραχύτητας του για τυρβώδη ροή. Επίσης, η ταχύτητα του ρευστού σε αυτό είναι μηδέν (συνθήκη μη-ολίσθησης) Στα στερεά τοιχώματα εφαρμόζονται ειδικές οριακές συνθήκες (wall functions).
 5. **Περιοδικά τοιχώματα (Periodic boundaries):** Εφαρμόζεται όταν η εξεταζόμενη γεωμετρία και η ροή έχουν περιοδικά επαναλαμβανόμενη φύση, ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός όγκος του προβλήματος. Συγκεκριμένα αυτά τα όρια έρχονται σε ζεύγη και χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί ότι η ροή έχει τις ίδιες τιμές μεταβλητών σε ισοδύναμα σημεία και των δύο ορίων. Για παράδειγμα, θεωρείται ότι η πτώση πίεσης μεταξύ των περιοδικών τοιχωμάτων είναι μηδαμινή. Στα προβλήματα ροής γύρω από στροβιλομηχανές χρησιμοποιείται περιστροφική περιοδικότητα (Rotational periodic) γύρω από τον άξονα περιστροφής της μηχανής. Στην Εικόνα 3.9, δομημένο εξαεδρικό πλέγμα έχει περιστραφεί γύρω από τον εαυτό του. Στην γραμμοσκιασμένη επιφάνεια και στην αντικριστή της επιφάνεια, οι μεταβλητές του ρευστού θα πρέπει να είναι ίσες στα αντίστοιχα σημεία.



Εικόνα 3.8 - Χωρίο με δομημένο εξαεδρικό πλέγμα με περιοδικά τοιχώματα

4. ΣΤΡΟΒΙΛΙΟΣ WELLS

4.1. Συσκευή ταλαντευόμενης στήλης ύδατος (OWC)

Πολλές από τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο έχουν μελετηθεί στα πλαίσια ερευνών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, όμως η συσκευή που έχει ως αρχή λειτουργίας την ταλαντευόμενη στήλη νερού έχει αποδειχτεί ότι είναι η περισσότερο πρακτικά εφαρμόσιμη μέθοδος. Το Διάγραμμα 4.1 αναπαριστά την αρχή λειτουργίας μίας OWC συσκευής και παρουσιάζει τα στάδια που ακολουθούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1, η συσκευή έχει δυο ανοίγματα, το ένα είναι σε επαφή με το νερό και το άλλο με την ατμόσφαιρα. Το κύμα εγκλωβίζεται από τη συσκευή και η κίνηση του κύματος (ταλαντευόμενη κίνηση) αναγκάζει τον αέρα να εξέλθει μέσω του άλλου ανοίγματος. Συγκεκριμένα, όταν η στάθμη του νερού ανεβαίνει λόγω της ανύψωσης του κύματος, ο εγκλωβισμένος αέρας συμπιέζεται και διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, όταν η στάθμη του νερού πέφτει δημιουργείται υποπίεση μέσα στο θάλαμο της συσκευής και έτσι ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται. Καθώς ο αέρας διέρχεται μέσω της οπής προκαλεί την περιστροφή μίας τουρμπίνας. Ο άξονας της γεννήτριας περιστρέφεται μέσω της κίνησης της τουρμπίνας μετατρέποντας με αυτό τον τρόπο την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας χρησιμοποιούνται συστήματα που συνδυάζουν ρυθμιστικές βαλβίδες που προσαρμόζουν την παλινδρομική ροή του αέρα με συμβατικές τουρμπίνες, τύπου Francis. Όμως υπάρχουν συστήματα με αυτορυθμιζόμενους στροβίλους που έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται με την ίδια φορά ανεξάρτητα της φοράς της ροής του αέρα. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων μηχανών, που περιλαμβάνουν τους στροβίλους Wells που σχεδιάστηκαν από τον Dr. A. A. Wells (Raghunathan, 1982 και 1985) και στροβίλους ώθησης (Impulse turbines) που προτείνονται από πολλούς ερευνητές (Kim, 1988 και Setoguchi, 2000). Οι μηχανές Wells και είναι μία απλή, οικονομική κατασκευή και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην πτώση πίεσης της ροής. Αντιθέτως, στις impulse μηχανές δεν εμφανίζεται πτώση πίεσης, μηχανικό έργο παράγεται καθώς το ρευστό τείνει να περιστρέψει τον ρότορα της μηχανής, δηλαδή απορροφώντας την κινητική ενέργεια του αέρα.

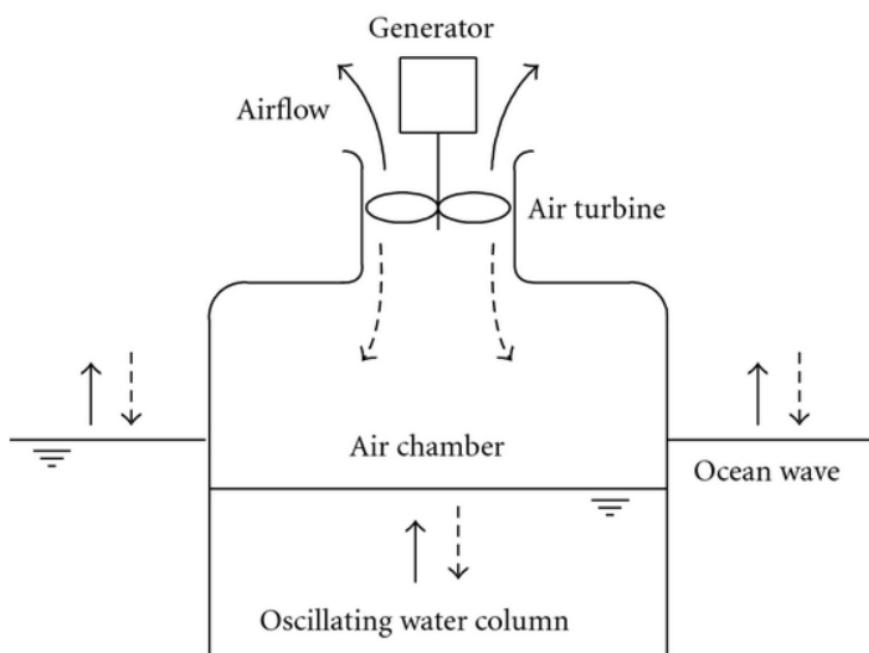
Οι OWC συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε παράκτιες θαλάσσιες ζώνες (off-shore). Υπολογίζεται ότι οι συσκευές που τοποθετούνται κοντά στην ακτογραμμή εκμεταλλεύονται μόνο το 25-50% της διαθέσιμης ενέργειας σε σχέση με off-shore συσκευές.

4.2. Στρόβιλος Wells

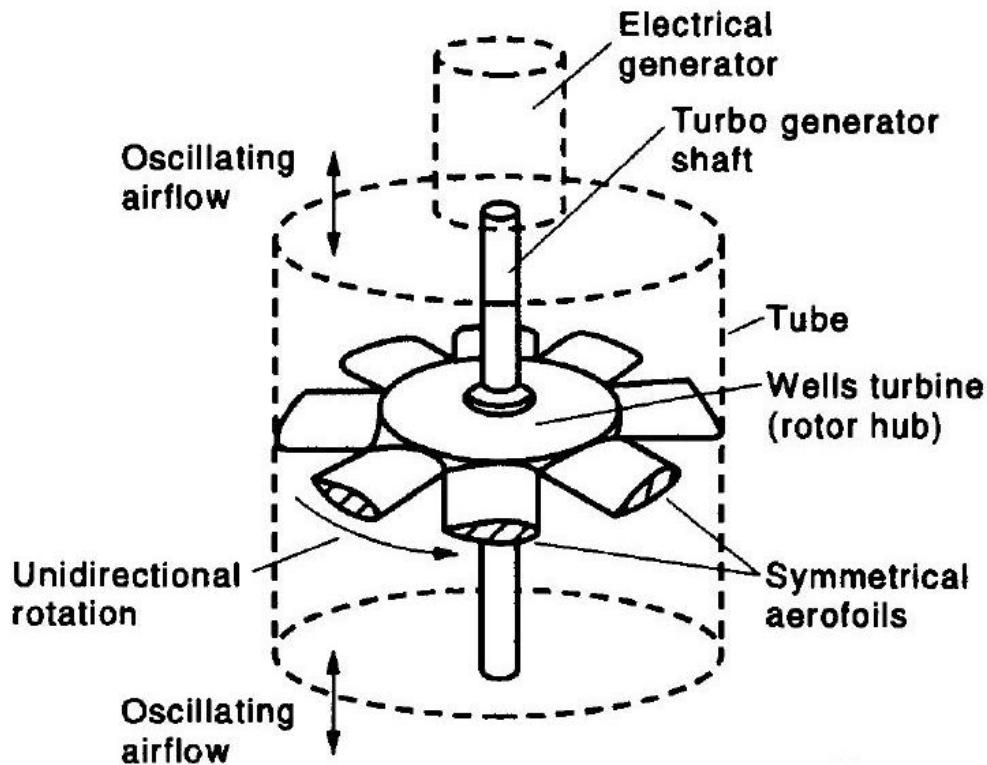
Στην παρούσα εργασία, γίνεται σχεδιασμός ενός στροβίλου Wells όπου θα αποτελέσει το power take-off σύστημα σε μια OWC συσκευή. Η μηχανή Wells επιλέγεται λόγω της απλής κατασκευής και λόγω της δυνατότητας περιστροφής προς την ίδια κατεύθυνση ανεξαρτήτως της φοράς με την οποία εισέρχεται ο αέρας στη μηχανή. Η εφαπτομενική δύναμη που εμφανίζεται στο πτερύγιο της μηχανής δρα πάντα προς την ίδια φορά, αποτέλεσμα της συμμετρικής αεροτομής που χρησιμοποιείται. Έτσι δεν διαθέτει ρυθμιστικές βαλβίδες πτερυγίων μειώνοντας έτσι το κόστος αλλά και την πολυπλοκότητα της κατασκευής.



Διάγραμμα 4. 1 - Διάγραμμα ροής μετατροπής κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω OWC



Εικόνα 4.1 - Σχηματική απεικόνιση OWC συσκευής με μηχανή Wells



Εικόνα 4.2 - Σχηματική απεικόνιση στροβιλομηχανής Wells [17]

Η μηχανή Wells αποτελεί την πιο απλή περίπτωση στροβίλου που χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο ρευστό τον αέρα. Αποτελείται από πτερύγια συμμετρικών αεροτομών όπου το επίπεδο της αεροτομής είναι κάθετα τοποθετημένο στον άξονα περιστροφής της μηχανής. Σύμφωνα με την κλασική θεωρία των αεροτομών, ροή ρευστού που προσπίπτει με γωνία α σε σχέση πάντα με την χορδή, προκαλούνται δύο δυνάμεις. Η δύναμη της άνωσης (Lift) που είναι κάθετη στην διεύθυνση ροής του ρευστού και η δύναμη της αντίστασης που δρα παράλληλα στην ροή (παράλληλη στη σχετική ταχύτητα του ρευστού). Αυτές οι δυνάμεις μπορούν να αναλυθούν σε εφαπτομενική συνιστώσα F_x (στο επίπεδο περιστροφής) και σε αξονική συνιστώσα F_θ (κάθετη στο επίπεδο περιστροφής). Η εφαπτομενική δύναμη F_x (προκαλεί τη ροπή γύρω από τον άξονα της μηχανής και η αξονική συνιστώσα F_θ προκαλεί μία ώθηση κατά μήκος του άξονα της μηχανής. Όπως αναφέρθηκε, λόγω της συμμετρίας της αεροτομής, η δύναμη F_x δρα πάντα με την ίδια φορά εξασφαλίζοντας της συνεχόμενη λειτουργία της μηχανής (Εικόνα 4.3).

Στους στροβίλους Wells, λόγω της ροής του αέρα και από τις δύο διευθύνσεις η γωνία πρόσπτωσης του αέρα μεταβάλλει τις τιμές της από θετικές σε αρνητικές ανάλογα με την φορά της ροής του αέρα. Αν η γωνία είναι θετική για την κίνηση του αέρα προς μία φορά τότε παίρνει αρνητικές τιμές όταν η φορά του αέρα αντιστρέφεται. Λόγω της συμμετρίας των πτερυγίων, η εφαπτομενική δύναμη στον ρότορα της μηχανής δρα πάντα με την ίδια φορά ανεξάρτητα από την αμφίδρομη κίνηση του αέρα με αποτέλεσμα την συνεχόμενη περιστροφή του άξονα που συνδέεται με την ηλεκτρική γεννήτρια παράγοντας μία σταθερά θετική ροπή. Ως εκ τούτου δεν απαιτούνται ρυθμιστικές βαλβίδες για τα πτερύγια κατά την αμφίδρομη κίνηση του αέρα και αυτό αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό για το οποίο οι μηχανές Wells είναι κατάλληλες για της OWC συσκευές εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας.

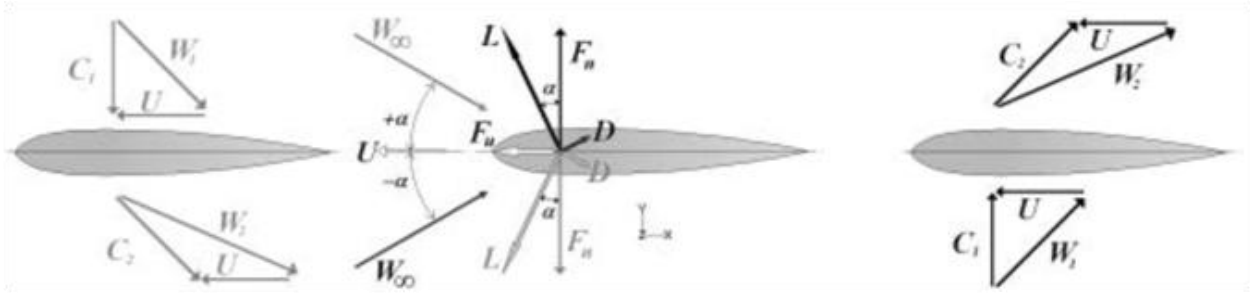
Η απόλυτη ταχύτητα του ρευστού που συμβολίζεται με C , κατά την είσοδο θεωρείται ότι έχει αξονική φορά. Με U συμβολίζεται η περιφερειακή ταχύτητα στο άκρο του πτερυγίου και υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση $U = \omega \cdot R_{tip}$ και θεωρείται σταθερή καθώς η γωνιακή ταχύτητα ω του ρότορα παραμένει σταθερή. Τέλος, με W συμβολίζεται η σχετική ταχύτητα του ρευστού που προκύπτει από την απόλυτη και τη περιφερειακή ταχύτητα. Στην εικόνα παρουσιάζονται τα τρίγωνα ταχυτήτων έτσι όπως υπολογίζονται στον στρόβιλο Wells. Οι δείκτες 1 και 2 υποδηλώνουν το ανάντη (upstream) και το κατάντη (downstream) της ροής αντίστοιχα. Για τους υπολογισμούς θεωρείται μία τιμή W όσον αφορά την σχετική ταχύτητα η οποία είναι η μέση τιμή των W_1 και W_2 και σχηματίζει γωνία με την χορδή του πτερυγίου. Η γωνία θεωρείται ότι είναι η γωνία πρόσπτωσης της ροής στο πτερύγιο (Εικόνα 4.4).

Η σχέση μεταξύ της πτώσης πίεσης και της παροχής του αέρα είναι γραμμική στην περιοχή λειτουργίας της μηχανής Wells. Σε μικρές παροχές αέρα που συνεπάγονται μικρές γωνίες πρόσπτωσης, η δύναμη της αντίστασης υπερिσχύει της άνωσης συνεπώς η απόδοση της μηχανής παίρνει αρνητικές τιμές. Σε αυτή την περίπτωση, η διαθέσιμη ενέργεια από τα κύματα μετατρέπεται σε θερμότητα και δεν παράγεται μηχανικό έργο ενώ οι συγκεκριμένες μηχανές δεν έχουν την ιδιότητα να μετατρέπονται σε αντλίες. Στις μεγάλες παροχές που συνοδεύονται από μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, το οριακό στρώμα στα πτερύγια τείνει να αποκολλάται (stall) οδηγώντας σε πτώση της απόδοσης των Wells. Για το λόγο αυτό σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν σε ένα εύρος γωνιών πρόσπτωσης $\pm a_{max}$, όπου η γωνία a_{max} είναι μικρότερη από την γωνία στην οποία γίνεται η αποκόλληση a_{stall} .

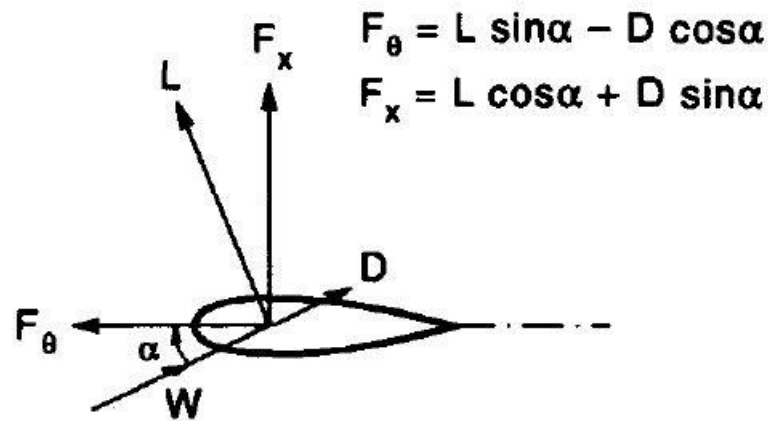
Ο βαθμός απόδοσης της μηχανής Wells είναι χαμηλότερος συγκριτικά με μηχανές σταθερής παροχής αέρα και με μη συμμετρικές αεροτομές. Αιτία για χαμηλότερη απόδοση σχετίζεται με το γεγονός ότι οι συμμετρικές αεροτομές έχουν μεγαλύτερο συντελεστή αντίστασης (drag coefficient) σε σχέση με τις μη συμμετρικές αεροτομές. Επίσης, οι συμμετρικές αεροτομές αναπτύσσουν χαμηλότερη ταχύτητα ακόμα και για υψηλή γωνία πρόσπτωσης - παροχή. Ο βαθμός απόδοσης των μηχανών Wells σε ταλαντευόμενη ροή αέρα έχει τιμές που κυμαίνονται από 0.40 έως 0.70.

Κατά το σχεδιασμό μιας μηχανής Wells εξετάζονται οι πιθανές διαμορφώσεις που μπορεί να πάρει. Συγκεκριμένα έξι τύποι μηχανών Wells είναι οι πιο συνηθισμένοι και είναι:

- Στρόβιλος Wells με οδηγητικά πτερύγια (guide vanes)
- Στρόβιλος Wells με πτερύγια μεταβλητής γωνίας (variable pitch)
- Στρόβιλος Wells με δύο σειρές πτερυγίων (biplane) και οδηγητικά πτερύγια
- Στρόβιλος Wells με δύο σειρές πτερυγίων που περιστρέφονται αντίθετα (contra-rotating biplane)
- Απλός στρόβιλος Wells με μία σειρά πτερυγίων (monoplane)
- Απλός στρόβιλος Wells με δύο σειρές πτερυγίων (biplane)
- Στρόβιλος Wells σε συνδυασμό σε στρόβιλο Impulse



Εικόνα 4. 3 - Τρίγωνα ταχυτήτων στις μηχανές Wells



Εικόνα 4.4 - Δυνάμεις στο περύγιο της μηχανής Wells [17]

4.3. Εξισώσεις που διέπουν τη στροβιλομηχανή Wells

Ο στρόβιλος είναι το τμήμα της συσκευής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας από το οποίο όταν διέρχεται ο αέρας παρατηρείται μία πτώση στατικής πίεσης ΔP_{static} . Παρουσιάζονται κάποια αδιάστατα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της μηχανής και σχετίζονται με την απόδοσή της [18].

Αδιάστατος συντελεστής παροχής αέρα (flow rate coefficient):

$$\varphi = \frac{V_{axial}}{\omega \cdot \frac{D_{tip}}{2}} = \frac{Q}{\frac{\pi^2}{4} D_{tip}^3 n}$$

Αδιάστατος συντελεστής στατικής πίεσης (static pressure-head coefficient):

$$\psi = \frac{\Delta P_{static}}{\frac{\pi^2}{8} D_{tip}^2 n^2 \rho_{air}}$$

Αδιάστατος συντελεστής ισχύος (power coefficient):

$$\lambda = \frac{P_{shaft}}{\frac{\pi^4}{8} D_{tip}^5 n^3 \rho_{air}}$$

Βαθμός απόδοσης (efficiency):

$$\eta = \frac{P_{shaft}}{Q \cdot \Delta P_{static}} = \frac{\lambda}{\varphi \cdot \psi}$$

V_{axial} : αξονική ταχύτητα εισόδου του αέρα στη μηχανή [m/sec]

ΔP_{static} : Πτώση στατικής πίεσης [Pa]

P_{shaft} : Ισχύς στον άξονα [W]

Q : παροχή αέρα [m^3/sec]

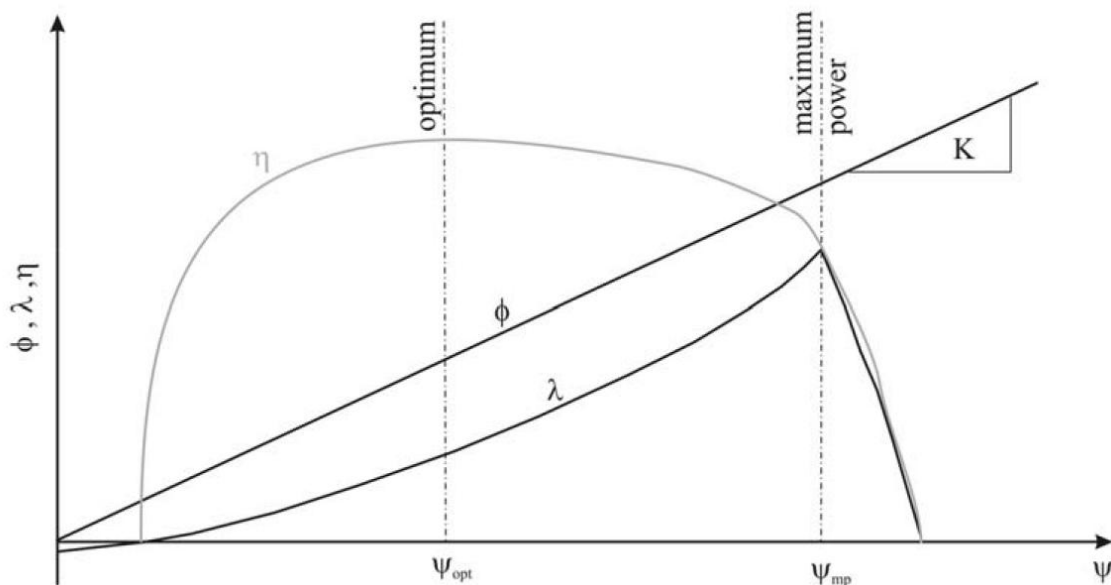
D_{tip} : Εξωτερική διάμετρος ρότορα [m]

ρ_{air} : πυκνότητα αέρα [kg/m^3]

ω : ταχύτητα περιστροφής [rpm]

n : ταχύτητα περιστροφής [rev/sec]

Οι μηχανές Wells χαρακτηρίζονται από τις καμπύλες λειτουργίας τους οι οποίες εκφράζονται ως $\phi = f(\psi)$, $\lambda = f(\psi)$, $\eta = f(\psi)$. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τη μορφή που παίρνουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας τις στροβιλομηχανής Wells. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι μηχανές Wells χαρακτηρίζονται από μία περιοχή λειτουργίας όπου η ισχύς στον άξονα της γεννήτριας συνεχώς αυξάνεται φτάνοντας ένα μέγιστο σημείο. Μετά το σημείο αυτό η ισχύς της μηχανής μειώνεται ακαριαία και εμφανίζονται φαινόμενα αποκόλλησης της ροής στα πτερύγια της μηχανής. Το σημείο όπου η μηχανή λειτουργεί βέλτιστα, θεωρείται εκείνο με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης, είναι δηλαδή εκείνο το σημείο στο οποίο η μηχανή εκμεταλλεύεται περισσότερο τη προσδιδόμενη ενέργεια για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας.



Εικόνα 4.5 - Σχηματική απεικόνιση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών μόνιμης ροής της μηχανής Wells [18]

Βασικό χαρακτηριστικό της στροβιλομηχανής Wells αποτελεί η γραμμική σχέση μεταξύ πτώσης πίεσης και παροχής, τα μεγέθη αυτά συνδέονται μεταξύ τους με ένα αδιάστατο συντελεστή χαρακτηριστικό της μηχανής και ορίζεται ως:

$$K = \frac{\phi}{\psi}$$

Ο αδιάστατος συντελεστής K είναι σταθερός και εξαρτάται από τη γεωμετρία της μηχανής δηλαδή για μία μηχανή με δεδομένη γεωμετρία και σταθερή γωνιακή ταχύτητα, υπάρχει μία γραμμική σχέση μεταξύ της παροχής του αέρα που εισέρχεται στη μηχανή και της πτώσης πίεσης.

4.4. Παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση των στροβιλομηχανών Wells

Η απόδοση των μηχανών Wells εξαρτάται από τους αεροδυναμικούς συντελεστές οι οποίοι με τη σειρά τους είναι άμεσα συνδεδεμένοι με άλλους παράγοντες όπως [17]:

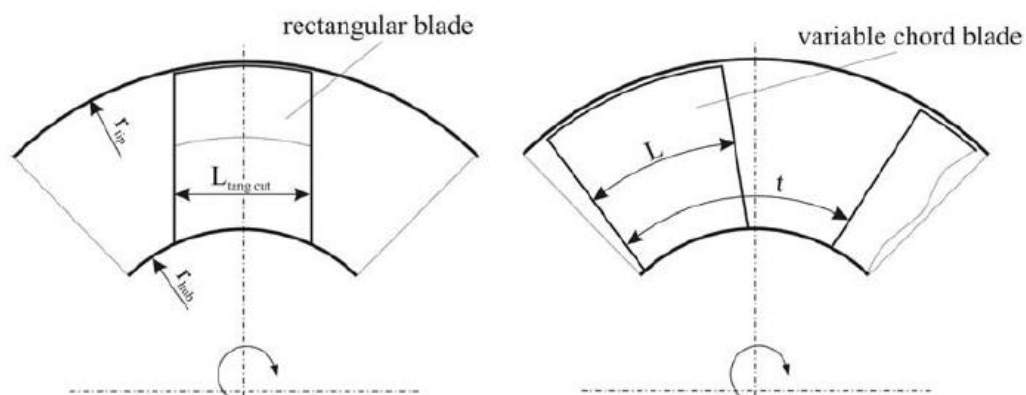
- Γεωμετρικό προφίλ πτερυγίων
- Αριθμός πτερυγίων
- Αριθμός σειρών πτερυγίων (mono-plane, bi-plane)
- Διάμετρος
- Solidity
- Λόγος διαμέτρου άξονα της μηχανής προς διάμετρο ρότορα (hub to tip ratio)
- Οδηγητικά πτερύγια (guide vanes)
- Διάκενο μηχανής (tip clearance)
- Ταχύτητα περιστροφής
- Αριθμός Mach και Reynolds

1) Στερεότητα - Solidity

Η παράμετρος **solidity** (σ) αποτελεί μία βασική παράμετρο κατά τον σχεδιασμό ενός υδροστροβίλου καθώς καθορίζει την αντίσταση που συναντά η ροή καθώς διέρχεται από τον στρόβιλο ενώ ταυτόχρονα φανερώνει και την αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων της μηχανής.

Η παράμετρος Solidity ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους του πτερυγίου προς την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων. Το παρακάτω σχέδιο υποδεικνύει το πλάτος του πτερυγίου καθώς και την απόσταση μεταξύ των πτερυγίων για τις περιπτώσεις που η χορδή των αεροτομών που συνθέτουν το πτερύγιο είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη.

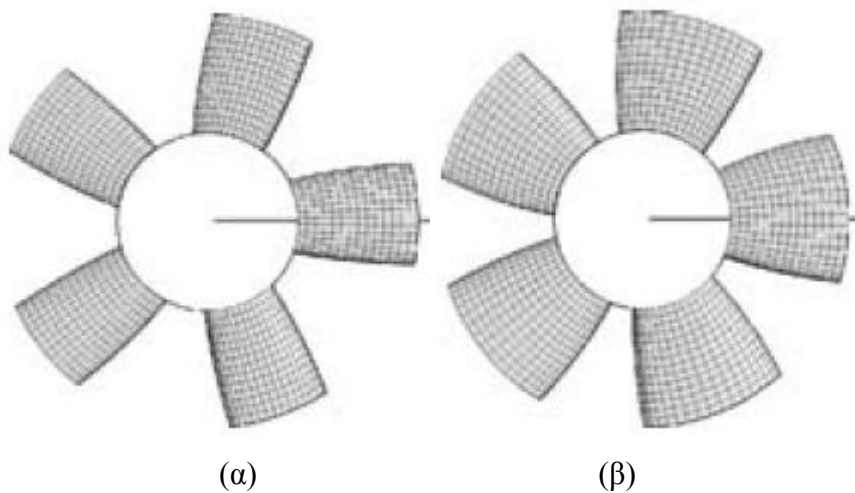
$$\sigma = \frac{L}{t}$$



Εικόνα 4.6 - Προσδιορισμός των παραμέτρων L και t για τον ορισμό του solidity

Για υψηλές τιμές της παραμέτρου solidity, παρατηρείται μείωση της απόδοσης της μηχανής Wells ενώ ταυτόχρονα σημειώνεται αύξηση της πτώσης πίεσης κατά τη διέλευσης της ροής αέρα

διαμέσου του ρότορα. Η μείωση στην απόδοση των μηχανών με υψηλό solidity οφείλεται στις αυξημένες απώλειες κινητικής ενέργειας στην έξοδο που συσχετίζονται με στροβιλισμούς. Επιπλέον στις μηχανές με υψηλό solidity, τα πτερύγια λόγω της μικρότερης απόστασης μεταξύ τους αλληλεπιδρούν εντονότερα με το οριακό στρώμα στην περιοχή κοντά στον άξονα (hub) και έτσι προωθείται η αποκόλληση του οριακού στρώματος. Σύμφωνα με τον Raghunathan, για τιμές $\sigma > 0.5$ παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση στην απόδοση. Στην Εικόνα 4.7 (α) απεικονίζεται ο ρότορας μίας μηχανής Wells με μικρότερο solidity από την μηχανή της Εικόνας 4.7 (β). Ο λόγος hub to tip είναι ίδιος, όπως και ο αριθμός των πτερυγίων, αυτό που διαφέρει είναι το μήκος της χορδής των πτερυγίων. Παρατηρείται ότι αυτό που μεταβάλλεται με το solidity είναι ο φραγμός στη ροή.



Εικόνα 4.7 - Μηχανές με διαφορετικό Solidity

2) Λόγος διαμέτρου πλήμνης προς διάμετρο ρότορα - hub to tip ratio

Ο παράγοντας **hub to tip ratio (h)** ορίζεται ως:

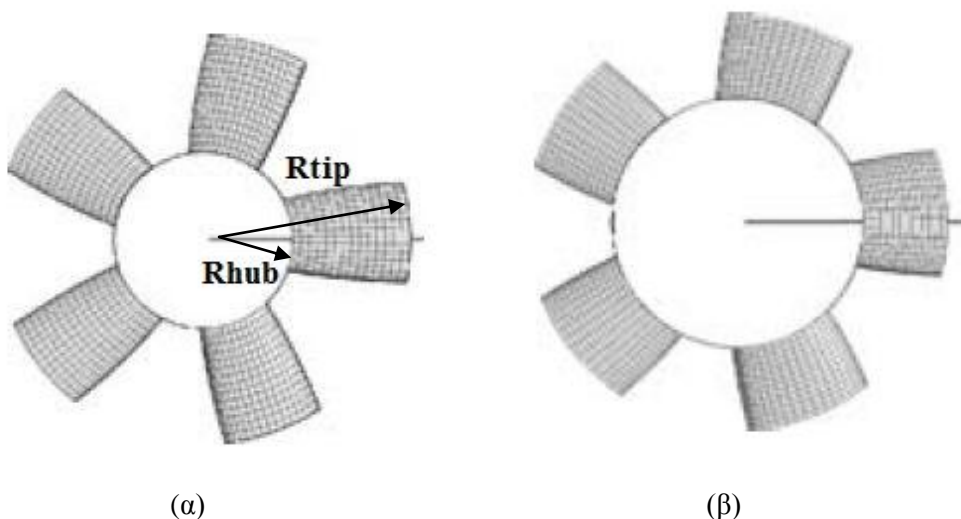
$$h = \frac{\text{ακτίνα πλήμνης}}{\text{ακτίνα στο άκρο του πτερυγίου}}$$

Αποτελεί σημαντική γεωμετρική παράμετρο καθώς για σταθερή τιμή solidity και παροχή αέρα Q , η μέση τιμή της αξονικής ταχύτητας V_x εισόδου του αέρα στον στρόβιλο Wells είναι συνάρτηση του h και δίνεται από τη σχέση:

$$V_x = \frac{Q}{\pi \frac{D_t^2}{4} (1-h^2)}$$

Η συμβολή του παράγοντα hub to tip ratio στην απόδοση της μηχανής είναι καθοριστική. Το hub to tip ratio επιδρά στην απόδοση της μηχανής Wells καθώς: (1) επηρεάζει τη γωνία πρόσπτωσης του αέρα στην περιοχή κοντά στον άξονα της μηχανής (2) επηρεάζει τις απώλειες λόγω της ροής

(leakage losses) στο άκρο του πτερυγίου (3) τη σχετική αλληλεπίδραση στην περιοχή κοντά στο Hub. Για τη λειτουργία μίας μηχανής σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής, η γωνία πρόσπτωσης του αέρα στην περιοχή κοντά στον άξονα της μηχανής είναι μεγαλύτερη από ότι στο άκρο (tip) του πτερυγίου. Για μικρότερες τιμές της παραμέτρου hub to tip ratio η κλίση αυξάνει και ως εκ τούτου η μηχανή οδηγείται σε πρόωρο stall με μειωμένη συνολική απόδοση. Για ένα δεδομένο διάκενο (Tip clearance), για παράδειγμα 2% της χορδής, το hub to tip ratio καθορίζει το λόγο του μεγέθους του διακένου προς το ύψος του πτερυγίου. Μείωση στο h επιφέρει αύξηση στο λόγο αυτό, περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο τις απώλειες ροής στο άκρο του πτερυγίου (Tip leakage losses) και ως εκ τούτου βελτιώνεται η αεροδυναμική απόδοση της μηχανής. Από την άλλη πλευρά η μείωση της ροή του αέρα στο άκρο του πτερυγίου αποτρέπει την εμφάνιση του ονομαζόμενου "relief effect" το οποίο συμβάλλει στη βελτίωση του Stall. Τέλος για μικρότερο hub to tip ratio η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων μικραίνει και έτσι η μεταξύ τους αλληλεπίδραση είναι εντονότερη. Φαινόμενα αποκόλλησης στο οριακό στρώμα του πτερυγίου στην περιοχή του Hub περιορίζονται και έτσι η απόδοση αυξάνει. Έπειτα από πειραματικές προσομοιώσεις, είναι γεγονός ότι ο παράγοντας hub to tip ratio και το διάκενο (tip clearance) έχουν συνέπεια στην απόδοση της μηχανής Wells και για το λόγο αυτό προτεινόμενη τιμή είναι $h = 0.6$. Στην Εικόνα 4.8 (α) απεικονίζεται ο ρότορας της μηχανής Wells με μικρότερη τιμή της παραμέτρου hub to tip ratio σε σύγκριση με την Εικόνα 4.8 (β). Αυτό που αλλάζει στις δύο περιπτώσεις είναι η ακτίνα του άξονα της μηχανής, η ακτίνα έως το άκρο του πτερυγίου παραμένει η ίδια.



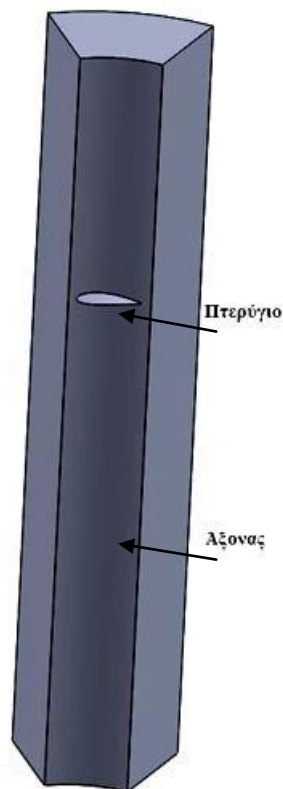
Εικόνα 4.8 - Μηχανές με διαφορετικό hub to tip ratio

5. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΗΣ WELLS

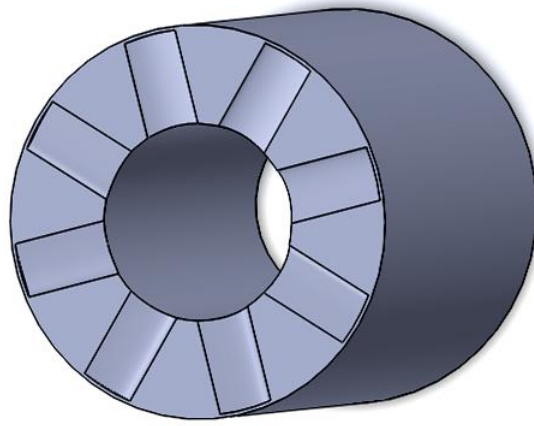
5.1. Υπολογιστική προσομοίωση

Αρχικά σχεδιάζεται με τη χρήση του CAD λογισμικού Solidworks η γεωμετρία του στροβίλου Wells. Χάρη της απόλυτης συμμετρίας της μηχανής Wells γύρω από τον άξονα περιστροφής, αρκεί να σχεδιαστεί και να μελετηθεί η ροή αέρα γύρω από το ένα πτερύγιο. Στις Εικόνες 5.1 - 5.4 απεικονίζεται η γεωμετρία όπως σχεδιάζεται στο Solidworks. Το χωρίο (domain) που απεικονίζεται αποτελεί τη περιοχή διέλευσης του αέρα. Από το χωρίο αφαιρείται το πτερύγιο, όπου αποτελεί το στερεό τμήμα της μηχανής. Για την μελέτη της εξέλιξης της ροής από την είσοδο στην έξοδο της μηχανής, το εξεταζόμενο χωρίο (domain) εκτείνεται 4 και 8 φορές το μήκος της χορδής ανάντη και κατάντη του πτερυγίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1.

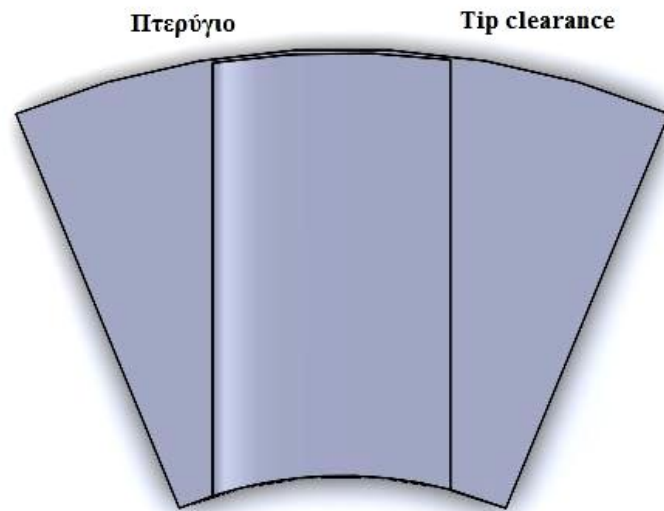
Η Εικόνα 5.2 απεικονίζει ολόκληρη τη μηχανή σε τομή ώστε να διακρίνονται τα πτερύγια. Στην Εικόνα 5.3 απεικονίζεται ξανά τομή κάθετη στο πτερύγιο από το κέλυφος προς τον άξονα ώστε να φανεί το διάκενο (tip clearance). Η Εικόνα 5.4 παρουσιάζει το χωρίο (domain) που στη συνέχεια θα διακριτοποιηθεί με δομημένο εξαεδρικό πλέγμα και θα επιλυθεί με χρήση κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.



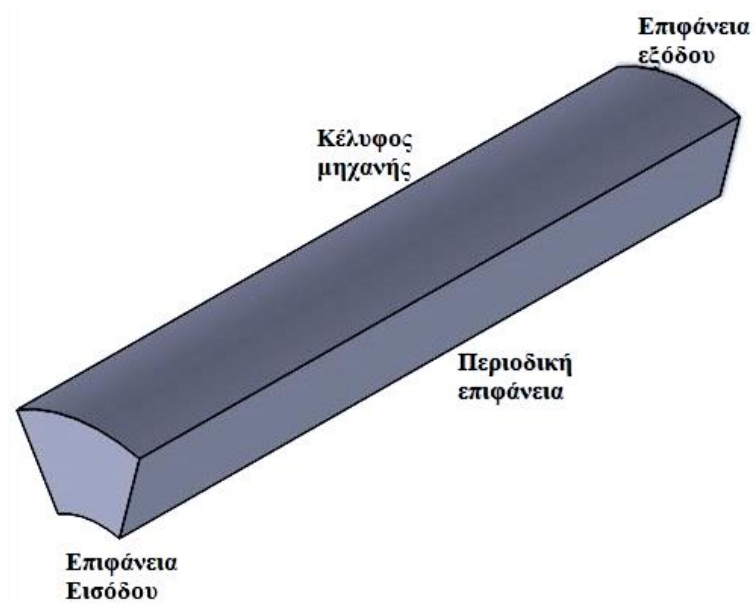
Εικόνα 5.1 - Εξεταζόμενο χωρίο για ένα πτερύγιο



Εικόνα 5.2 - Τομή μηχανής Wells



Εικόνα 5.3 - Τομή πτερυγίου

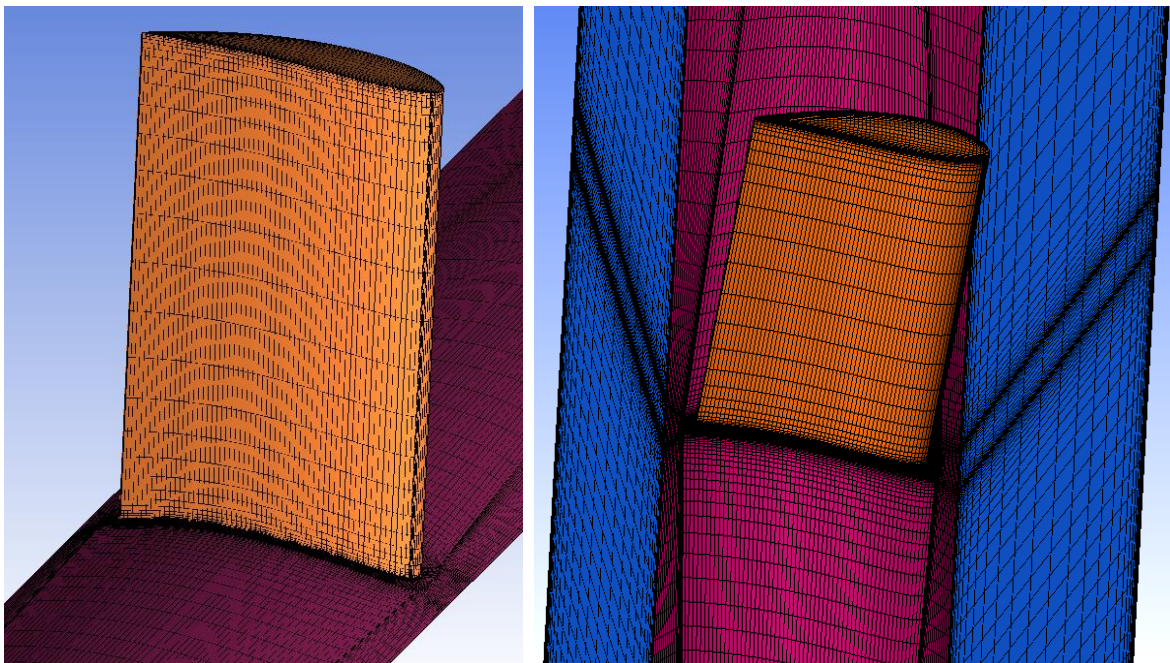


Εικόνα 5.4 - Εξεταζόμενο χωρίο για ένα πτερύγιο

Στην παρούσα εργασία, η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου έγινε με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου της Ansys: ICM που υποστηρίζει την κατασκευή δομημένου εξαεδρικού πλέγματος (structured hex mesh). Ακόμα και στις πολύ στενές περιοχές (για παράδειγμα στο tip clearance) γίνεται χρήση αυτής της μορφής πλέγματος για την ακριβέστερη επίλυση της ροής. Γενικότερα επιλέγεται το δομημένο πλέγμα έναντι του μη δομημένου καθώς η επίλυση δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα και ταχύτερη λύση. Γύρω από το πτερύγιο εμφανίζεται πύκνωση πλέγματος της μορφής O-grid. Η επιλογή πλέγματος O-grid γύρω από το πτερύγιο γίνεται ώστε τα κελιά να βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το πτερύγιο ώστε να επιτυγχάνεται y^+ της τάξης του 30. Η πύκνωση των στοιχείων του πλέγματος σε εκείνη την περιοχή εξασφαλίζει ακρίβεια στα αποτελέσματα. Το πεδίο ροής συνολικά έχει πλέγμα της μορφής H.

Έπειτα από διερεύνηση μέσω ανεξαρτησίας πλέγματος, που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.2, προκύπτει ότι 550000 έως 650000 κελιά μπορούν να αποδώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Στην περιοχή του O - grid εφαρμόζονται 20 υποστρώματα γύρω από το πτερύγιο ενώ η απόσταση του πρώτου κόμβου από το τοίχωμα του πτερυγίου επιλέγεται ώστε να πληρείται ο περιορισμός $y^+ = 30$. Η στενή περιοχή του tip clearance χωρίζεται σε 10 υποστρώματα, καθώς απαιτείται μεγάλη ακρίβεια λόγω της εμφάνισης λιμνάζουσας ροής που στροβιλίζεται.

Κατά την κατασκευή του πλέγματος ενδιαφέρουν κυρίως δύο παράγοντες: το Aspect Ratio και το Skewness. Το Aspect Ratio ορίζεται ως ο λόγος της μεγαλύτερης προς την μικρότερη πλευρά ενός στοιχείου. Ιδανικά πρέπει να ισούται με τη μονάδα για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων. Σε ροές που είναι αδύνατο να επιτευχθεί αυτός ο περιορισμός τουλάχιστον η διαφορά μεταξύ των πλευρών δεν πρέπει να ξεπερνά το 20%. Το skewness σχετίζεται με την στρεβλότητα κάθε στοιχείου και ένας από τους τρόπους για να οριστεί είναι το equiangle skewness.



Εικόνα 5.5 - Πλεγματοποίηση domain

Το εμπορικό λογισμικό Fluent χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα υπολογιστική προσομοίωση για την επίλυση της ροής. Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής θεωρεί μόνιμη ροή (steady) και ασυμπιέστη (incompressible). Η επίλυση γίνεται για τις τρισδιάστατες εξισώσεις Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) όπου διακριτοποιούνται με την Μέθοδο Πεπερασμένων Όγκων

(Finite Volume Method, FVM). Η μέθοδος αυτή είναι εξορισμού μία συντηρητική μέθοδος και έχει το πλεονέκτημα να μην παρουσιάζει προβλήματα σύγκλισης με αποτέλεσμα οι επαναληπτικοί υπολογισμοί να μειώνονται οδηγώντας σε σχετικά συντομότερους υπολογιστικούς χρόνους. Για τη σύζευξη του πεδίου πίεσης και του πεδίου ταχυτήτων χρησιμοποιείται ο επαναληπτικός αλγόριθμος SIMPLE. Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν τη ροή επιλύονται σε ένα μη αδρανειακό χώρο ο οποίος περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, ενώ η σχετική ταχύτητα του ρευστού είναι η εξαρτημένη μεταβλητή του προβλήματος. Τα σχήματα διακριτοποίησης (scheme discretizations) που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση είναι: standard για την πίεση, Second Order Upwind για τη ροπή και τα μοντέλα τύρβης.

Για την επίλυση των τάσεων Reynolds που εμφανίζονται στις RANS χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Boussinesq και στην παρούσα επίλυση γίνεται χρήση μοντέλων δύο εξισώσεων και συγκεκριμένα των k-ε μοντέλων τύρβης. Χρησιμοποιείται το μοντέλο k-ε Realizable καθώς αποδίδει καλύτερα σε ροή που εμπεριέχει περιστροφή, οριακά στρώματα με αντίστροφα διανύσματα πίεσης, αποκόλληση και ανακυκλοφορία. Το k-ε realizable προτιμάται σε αρκετές περιπτώσεις έναντι του Standard k-ε μοντέλου τύρβης. Τέλος, σχετικά με τα Wall Function, χρησιμοποιείται το Non-equilibrium Wall Function για την προσομοίωση της ροής κοντά στα τοιχώματα του περυγίου καθώς έχει τη δυνατότητα να επιλύει σύνθετες ροές που περιλαμβάνουν φαινόμενα αντίστροφης κλίσης του διανύσματος της πίεσης στο οριακό στρώμα, την αποκόλληση της ροής κ.α. Η επιλογή του συγκεκριμένου Wall Function δικαιολογείται στην παράγραφο 5.3.

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας έγινε στο σχεδιαστικό πακέτο Solidworks και ουσιαστικά απεικονίζεται το τμήμα του στροβίλου Wells από το οποίο διέρχεται ο αέρας. Λόγω αξονικής συμμετρίας της συγκεκριμένης μηχανής σχεδιάζεται και επιλύεται μόνο ένα μέρος της. Εξετάζονται διάφορες γεωμετρίες μηχανών με έξι και οκτώ πτερύγια, άρα κάθε φορά σχεδιάζεται το ένα έκτο ή το ένα όγδοο της γεωμετρίας αντίστοιχα. Το πεδίο ορισμού της ροής περιορίζεται τέσσερις και οκτώ φορές το μήκος της χορδής ανάντη και κατάντη του περυγίου αντίστοιχα.

Τα πτερύγια των Wells είναι συμμετρικά ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν την αμφίδρομη διαδρομή του αέρα και συνήθως οι αεροτομές είναι της σειράς NACA00XX. Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η αεροτομή NACA0020 η οποία συνίσταται από τη βιβλιογραφία. Το πρώτο ψηφίο ορίζει την επί τοις εκατό μέγιστη καμπυλότητα της χορδής, το δεύτερο ψηφίο ορίζει το σημείο με την μέγιστη καμπυλότητα και δηλώνει την επί της εκατό απόσταση της χορδής από το σημείο προσβολής. Τα δύο τελευταία ψηφία καθορίζουν το μέγιστο πάχος της αεροτομής ως ποσοστό της χορδής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η αεροτομή δεν έχει μέγιστη καμπυλότητα λόγω συμμετρίας και το μέγιστο πάχος της είναι το 20% του μήκους της χορδής. Για το σχεδιασμό της αεροτομής χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση που ορίζει της αεροτομής και είναι η εξής:

$$y = \pm c \left(0.2969 \left(\frac{x}{c} \right)^{0.5} - 0.126 \frac{x}{c} - 0.3516 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0.1036 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right) \quad (5.1)$$

όπου y είναι η κατακόρυφη συντεταγμένη, x είναι η οριζόντια συντεταγμένη και c είναι το μήκος της χορδής.

Ο όγκος που περιβάλλεται από το ρευστό ορίζεται σαν ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς που κινείται με μία ταχύτητα περιστροφής ίση με του άξονα. Ως οριακή συνθήκη (boundary

condition) στην επιφάνεια εισόδου (inflow), που είναι κάθετη στην ροή του αέρα, ορίζεται η ταχύτητα εισόδου (inlet velocity). Αντίστοιχα στην επιφάνεια εξόδου (outflow) ορίζεται ως συνθήκη η στατική πίεση (static pressure). Οι περιφερειακές επιφάνειες ορίζονται ως περιστρεφόμενα περιοδικές (rotational periodic), ενώ οι επιφάνειες που αποτελούν τον άξονα, το κέλυφος και το πτερύγιο ορίζονται ως τοιχώματα (wall). Ο άξονας και το πτερύγιο κινούνται μαζί με το ρευστό έχοντας την ίδια γωνιακή ταχύτητα ενώ το κέλυφος παραμένει σταθερό ενώ θεωρείται ότι το ρευστό που έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα λόγω του ιξώδους (viscous effects) έχει μηδενική σχετική ταχύτητα ως προς αυτό, κινείται δηλαδή κολλάει στο τοίχωμα και αποκτά την ταχύτητά του. No slip conditions εφαρμόζονται στις επιφάνειες του άξονα, του κελύφους και του πτερυγίου.

Για τη ροή αέρα στην είσοδο, εφαρμόζεται ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας που είναι κάθετο στην επιφάνεια εισόδου με ένταση τύρβης (turbulence intensity, I) ίση με 5% και υδραυλική διάμετρο (hydraulic diameter) ίση με την διαφορά της εξωτερικής διαμέτρου του ρότορα μείον την διάμετρο του άξονα.

Η σύγκλιση της λύσης ελέγχεται από τα residuals μεγεθών που επιλύουν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή. Η τιμή τους πρέπει να είναι της τάξης 10^{-4} - 10^{-6} για να υπάρχει σύγκλιση της λύσης. Ταυτόχρονα γίνεται έλεγχος της σύγκλισης της ροπής αλλά και διατήρησης της μάζας όπου πρέπει να υπάρχει διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου της τάξης 0.001%.

5.2. Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος

Όπως έχει αναφερθεί, το πλέγμα επηρεάζει το υπολογιστικό κόστος και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το υπολογιστικό κόστος αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιλογής της διαδικασίας της διερεύνησης και συνεπώς απαιτείται ενδελεχής μελέτη για τη ελαχιστοποίησή του χωρίς να επηρεαστεί σημαντικά η ακρίβεια της επίλυσης. Η ανάλυση αυτή αποτελεί τυπική διαδικασία, ονομάζεται μελέτη ανεξαρτησία πλέγματος (mesh independence study) και περιλαμβάνει την επανειλημμένη προσομοίωση μιας συγκεκριμένης περίπτωσης με υπολογιστικά πλέγματα διαφορετικής και προοδευτικά αυξανόμενης πυκνότητας.

Η γεωμετρία της μηχανής σχεδιάστηκε με τη χρήση του πακέτου CAD: Solidworks. Καθώς η μηχανή Wells είναι πλήρως συμμετρική, αρκεί ο σχεδιασμός και η ανάλυση της ροής γύρω από ένα μόλις πτερύγιο. Το υπολογιστικό χωρίο που μελετάται έχει μήκος ίσο 4 φορές το μήκος της χορδής ανάντη του ρότορα και 8 φορές το μήκος της χορδής κατάντη του ρότορα. Το πλέγμα κατασκευάστηκε με τη χρήση του πακέτου της Ansys ICEM που υποστηρίζει την ανάπτυξη δομημένου πλέγματος (structure mesh). Η εξεταζόμενη γεωμετρία διακριτοποιήθηκε χρησιμοποιώντας δομημένο εξαεδρικό πλέγμα. Λόγω της απλής γεωμετρίας της μηχανής Wells είναι εφικτή η διακριτοποίηση του ολόκληρου του χωρίου με τη χρήση του συγκεκριμένου πλέγματος. Όπως έχει αναφερθεί, το δομημένο εξαεδρικό πλέγμα συμβάλλει στην καλύτερη επίλυση της ροής δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι περιοχές της ροής με ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι εκείνες κοντά στα στερεά τοιχώματα της μηχανής Wells. Η ροή κοντά στον άξονα και στο κέλυφος της μηχανής, αλλά και γύρω από το πτερύγιο δημιουργεί οριακό στρώμα. Λόγω του οριακού στρώματος αναμένεται η εμφάνιση του φαινομένου της αποκόλλησης στις περιοχές αυτές καθώς και η δημιουργία στροβιλισμών. Η πύκνωση του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα επιτρέπει την λεπτομερή επίλυση της ροής και τη

πρόβλεψη της αποκόλλησης του οριακού στρώματος. Για το λόγο αυτό πλέγμα τύπου O-grid εφαρμόζεται γύρω από το πτερύγιο ενώ πλέγμα τύπου H εφαρμόζεται στο σύνολο της γεωμετρίας.

Σύμφωνα με τη θεωρία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, για την επίλυση της ροής γύρω από τοίχωμα χρησιμοποιείται ο αδιάστατος συντελεστής y^+ που υποδηλώνει την απόσταση του πρώτου κελιού του πλέγματος από το τοίχωμα. Ανάλογα με την τιμή του y^+ τα μοντέλα τύρβης είτε επιλύουν κατευθείαν τις εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή είτε χρησιμοποιούν κάποιες βοηθητικές εξισώσεις (wall functions). Στην περίπτωση που μελετάται επιλέγεται ο αδιάστατος συντελεστής απόστασης από το τοίχωμα, y^+ , να ισούται με 30.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν τέσσερις περιπτώσεις πλέγματος για την ίδια γεωμετρία. Κάθε φορά οι κόμβοι του πλέγματος αυξάνουν με αποτέλεσμα να δημιουργούνται περισσότερα κελιά. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει η ανάλυση της γεωμετρίας με τη χρήση του CFD κώδικα FLUENT. Η πτώση πίεσης στο πτερύγιο, η αναπτυσσόμενη ροπή καθώς και ο βαθμός απόδοσης είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη που ενδιαφέρουν περισσότερο στην ανάλυση αυτή.

Για τη διεξαγωγή της μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος σχεδιάστηκε η μηχανή Wells χωρίς την παρουσία διακένου (tip clearance = 0%). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η δημιουργία πλέγματος σε μία τόσο στενή περιοχή, γεγονός που δυσκολεύει την διαδικασία της πλεγματοποίησης.

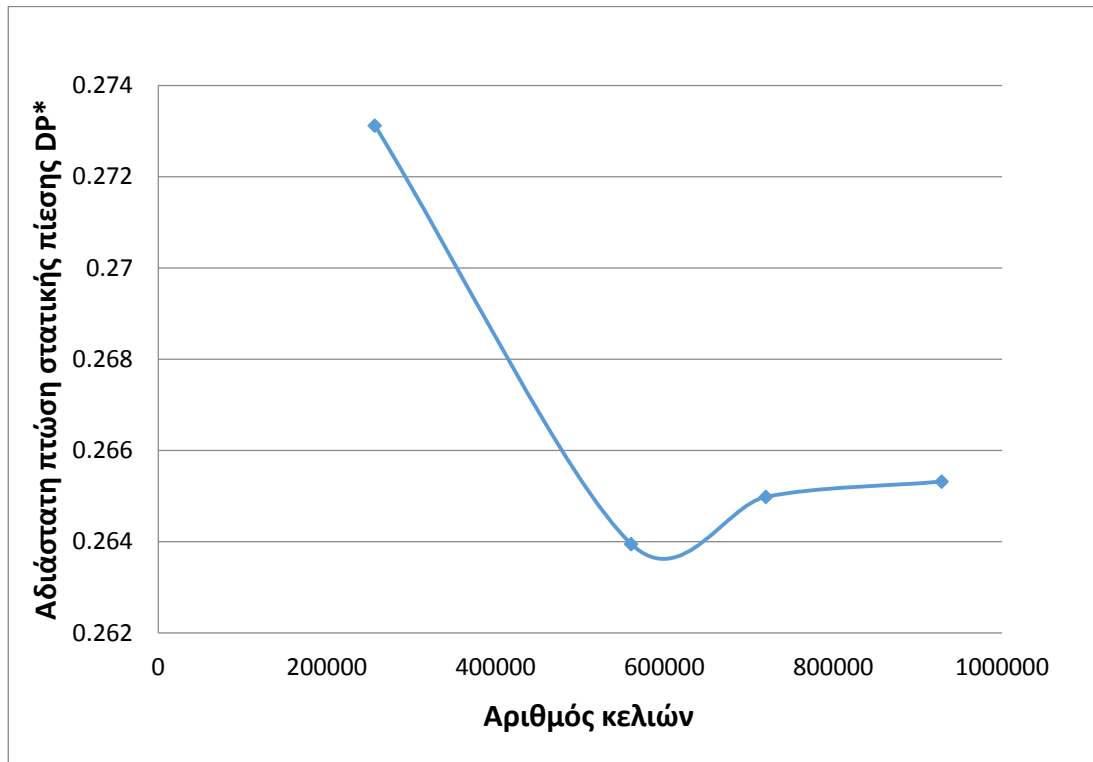
Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας της ανεξαρτησίας πλέγματος (mesh independence study). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό τη μορφή αδιάστατης πτώσης στατικής πίεσης και ροπής.

ΠΛΕΓΜΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΛΙΩΝ	DP*	T*	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
GRID 1	260000	0.27312	0.00884	0.495
GRID 2	560000	0.26395	0.00789	0.457
GRID 3	720000	0.26498	0.00786	0.454
GRID 4	930000	0.26532	0.00791	0.456

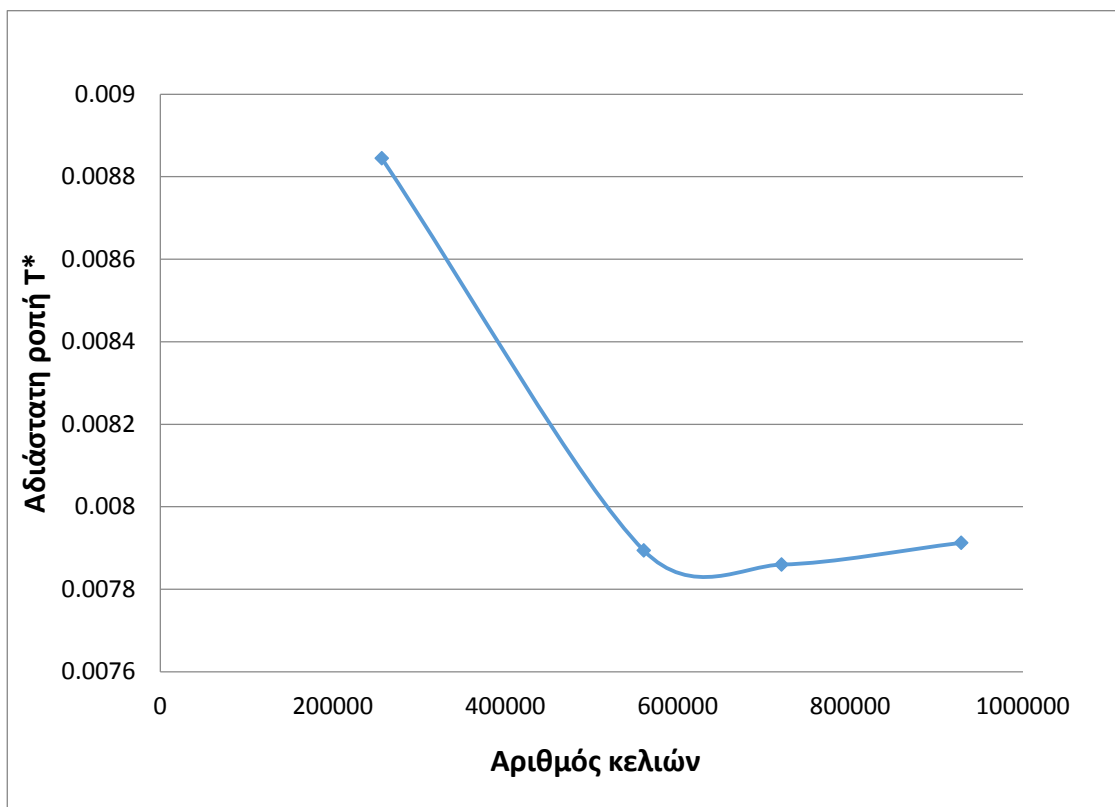
Πίνακας 5. 1- Σύνοψη αποτελεσμάτων ανεξαρτησίας πλέγματος

Από τα διαγράμματα που ακολουθούν προκύπτει ότι για αριθμό κελίων περισσότερα από 560000 κελιά, τα εξεταζόμενα μεγέθη τείνουν να έχουν μικρή απόκλιση. Όσον αφορά τη ροπή (Διάγραμμα 3) και τον βαθμό απόδοσης (Διάγραμμα 4) οι τιμές για την περίπτωση του GRID 2 με τα 560000 κελιά έχουν μία απόκλιση της τάξης του 2.3% και 2.8% σε σχέση με την περίπτωση του GRID 4 με τα 930000 κελιά. Όσον αφορά την πτώση πίεσης εδώ η απόκλιση είναι λίγο μεγαλύτερη της τάξης του 5.2%. Η απόκλιση που παρατηρείται στα εξεταζόμενα μεγέθη είναι αρκετά μικρή καθώς πρόκειται για περιπτώσεις όπου ο αριθμός των κελίων αυξάνεται κατά 65%.

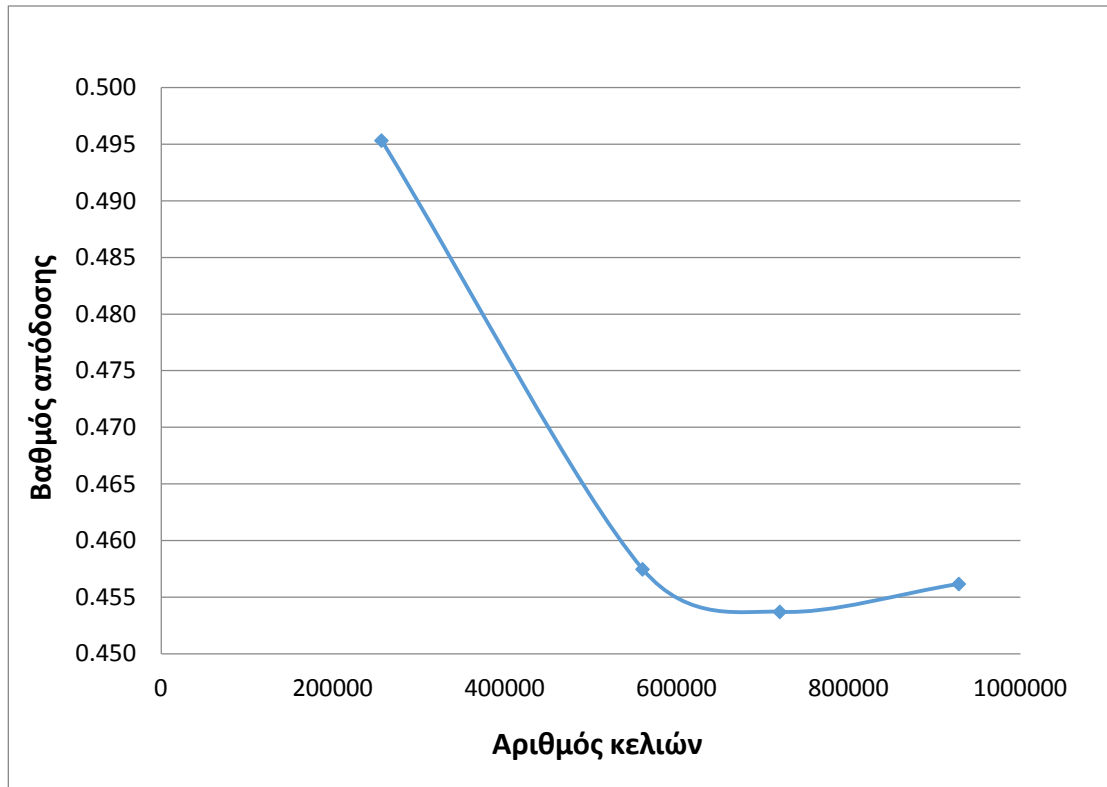
Στη συνέχεια, για τις γεωμετρίες που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται πλέγμα της τάξης των 560000 έως 650000 κελιών. Σε επόμενες γεωμετρίες εμφανίζεται το διάκενο (tip clearance) συνεπώς αυξάνει ο αριθμός των κελιών του πλέγματος ώστε να γίνει σωστή απεικόνιση της ροής στην περιοχή του διακένου.



Διάγραμμα 5.1 - Πτώση στατικής πίεσης στο περύγιο συναρτήσει αριθμού κελιών



Διάγραμμα 5.2 - Ροπή που αναπτύσσεται στο περύγιο συναρτήσει αριθμού κελιών



Διάγραμμα 5.3 - Βαθμός απόδοσης μηχανής συναρτήσει αριθμού κελιών

5.3. Επιλογή Wall Function

Κοντά στα τοιχώματα αναπτύσσονται έντονα φαινόμενα τύρβης με αποτέλεσμα να παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις της ταχύτητας στην περιοχή αυτή και η τιμή της μεταβάλλεται ραγδαία (Διάγραμμα 5.4). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε μία στρώση ρευστού πάχους δ πάνω από το τοίχωμα και είναι το λεγόμενο οριακό στρώμα (boundary layer). Το οριακό στρώμα αποτελείται από: το εσωτερικό στρώμα (inner layer) και το εξωτερικό στρώμα (outer layer). Στην συνέχεια το ρευστό αποκτά την ταχύτητα του μακρινού πεδίου (freestream velocity) και το οριακό στρώμα παύει να υφίσταται.

Εντός του εσωτερικού στρώματος αναπτύσσονται δύο υποπεριοχές: Το οριακό υπόστρωμα (sublayer) και η περιοχή ανάπτυξης πλήρους τυρβώδους ροής ή λογαριθμικό στρώμα (log-layer). Το οριακό υπόστρωμα (sublayer) εντός του οποίου η ταχύτητα του ρευστού που διέρχεται πάνω από το στερεό τοίχωμα αυξάνει από μηδενική τιμή σχεδόν γραμμικά. Στην περιοχή ανάπτυξης πλήρους τυρβώδους ροής η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει λογαριθμικά. Η Εικόνα 5.6 αποτελεί σχηματική απεικόνιση της ροής πάνω από τοίχωμα και πώς κατανέμεται η ταχύτητα.

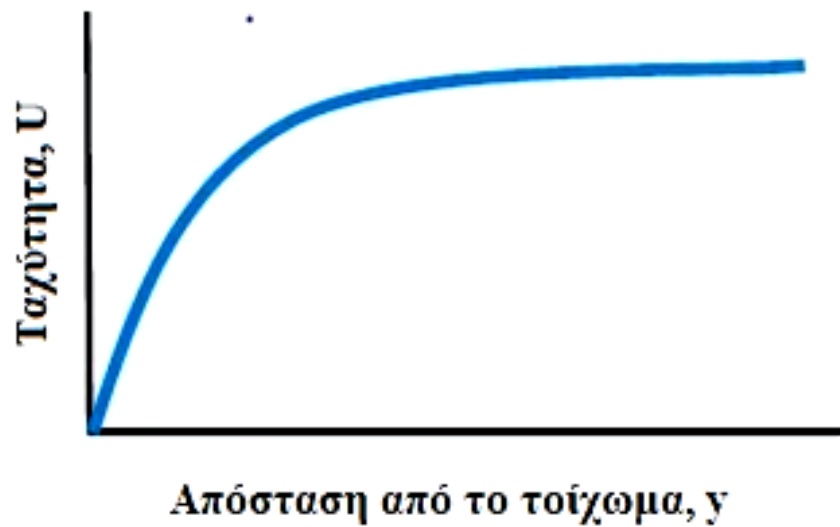
Αν το Διάγραμμα 5.4 σχηματιστεί ξανά με τις εξής προδιαγραφές:

- Οι άξονες είναι λογαριθμικής κλίμακας

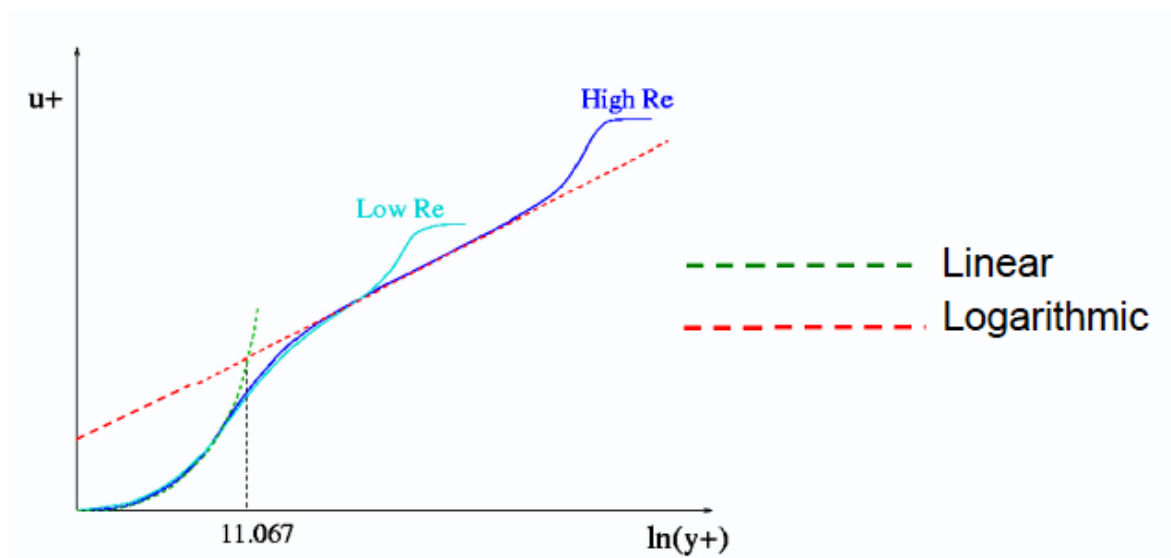
- Η ταχύτητα είναι αδιάστατη, U/u_T ($u_T = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}}$) (5.2)

- Η απόσταση από το τοίχωμα ορίζεται από το αδιάστατο μέγεθος, $y^+ = \frac{y u_T}{\nu}$ (5.3)

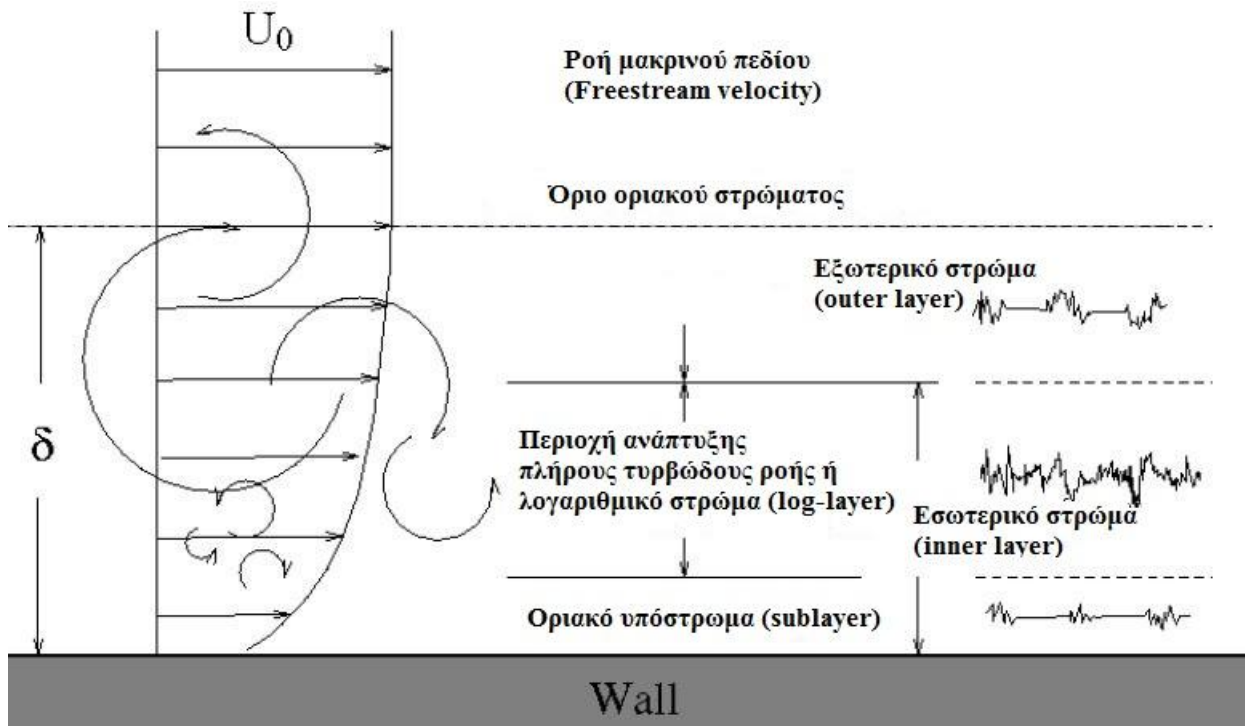
Τότε προκύπτει το Διάγραμμα 5 στο οποίο παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας εντός του οριακού στρώματος, σε απόσταση από το τοίχωμα σε λογαριθμική μορφή. Είναι φανερό πώς η ταχύτητα μεταβαίνει από γραμμική σε λογαριθμική μορφή.



Διάγραμμα 5.4 - Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα συναρτήσει της απόστασης από το τοίχωμα



Διάγραμμα 5.5 - Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα συναρτήσει της απόστασης από το τοίχωμα σε λογαριθμική κλίμακα



Εικόνα 5.6 - Σχηματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής κοντά στο τοίχωμα

Για την επίλυση της ροής κοντά στο τοίχωμα μπορούν να ακολουθηθούν δύο τεχνικές: Η μία τεχνική αφορά την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή κοντά στο τοίχωμα. Για την τεχνική αυτή απαιτείται πυκνό και καλής ποιότητας πλέγμα. Η απόσταση του πρώτου κελιού πρέπει να είναι πολύ μικρή της τάξης του $y^+ = 1$. Η δεύτερη τεχνική αφορά τη χρήση συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το προφίλ της ροής κοντά στο τοίχωμα. Εδώ δεν απαιτείται τόσο μικρή απόσταση του πρώτου κελιού από το τοίχωμα, το όριο είναι $30 < y^+ < 300$. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται Wall functions και χρησιμοποιούνται για την επίλυση του ροϊκού πεδίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

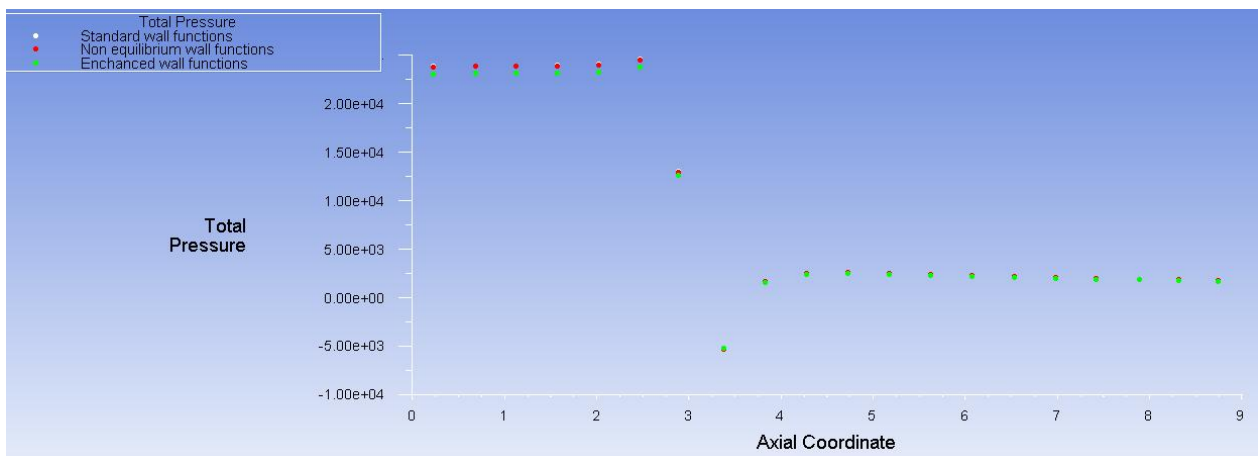
Υπάρχουν κυρίως τρεις Wall Functions που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την περίπτωση:

- **Standard Wall Functions:** Αυτή η επιλογή απευθύνεται σε ροές με υψηλό αριθμό Reynolds. Στην πραγματικότητα η περιοχή κοντά στο τοίχωμα δεν επιλύεται και το πλέγμα αντίστοιχα είναι χονδροειδές.
- **Non equilibrium Wall Functions:** Προβλέπει καλύτερα τις απότομες αλλαγές στην κλίση της ροής και το φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος. Το πλέγμα κοντά στο τοίχωμα μπορεί να είναι σχετικά χονδροειδές.
- **Enhanced Wall Functions:** Χρησιμοποιείται για ροές με χαμηλό αριθμό Reynolds ή σε περιπτώσεις όπου επικρατούν ροϊκά φαινόμενα κοντά στο τοίχωμα. Απαιτεί πυκνό πλέγμα και με μικρή απόσταση του πρώτου κόμβου από το τοίχωμα αν και μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιπτώσεις πιο χονδροκομμένο πλέγμα.

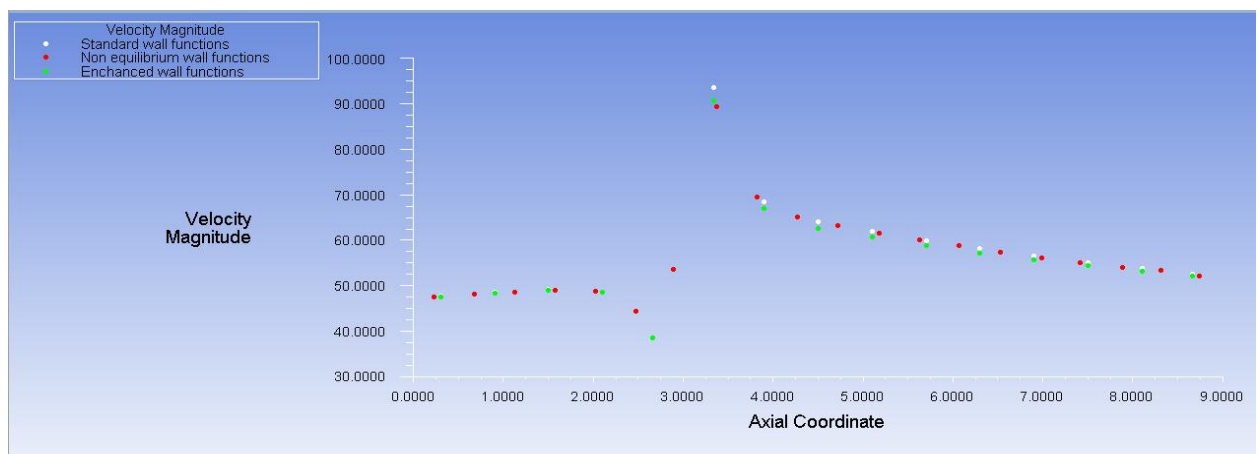
Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την επίλυση της ροής χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Reynolds Average Navier-Stokes σε συνδυασμό με το k-ε μοντέλο τύρβης. Αρχικά γίνεται μία σύγκριση προτού επιλεγεί το κατάλληλο Wall Function που θα δοθεί ως παράμετρος στο εμπορικό λογισμικό Fluent για την επίλυση της ροής. Επιλύεται η ίδια γεωμετρία διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους και το μόνο που αλλάζει κάθε φορά είναι το Wall Function που

χρησιμοποιείται. Στα Διαγράμματα 5.6 και 5.7 γίνεται σύγκριση των μεγεθών της πίεσης και της ταχύτητας κατά την αξονική διεύθυνση της ροής. Επίσης μελετάται η πίεση και η ταχύτητα του αέρα κατά την ακτινική διεύθυνση σε περιοχή ελάχιστα πριν και ελάχιστα μετά από το πτερύγιο (Διαγράμματα 5.8, 5.9, 5.10, 5.11). Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα που δίνει το Enhanced Wall Function αποκλίνουν αρκετά από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δύο άλλων περιπτώσεων (Standard και Non-equilibrium). Η απόκλιση ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι το πλέγμα που επιλύεται δεν είναι αρκετά πυκνό όσο θα έπρεπε ώστε να επιλυθεί σωστά από το Enhanced Wall Function.

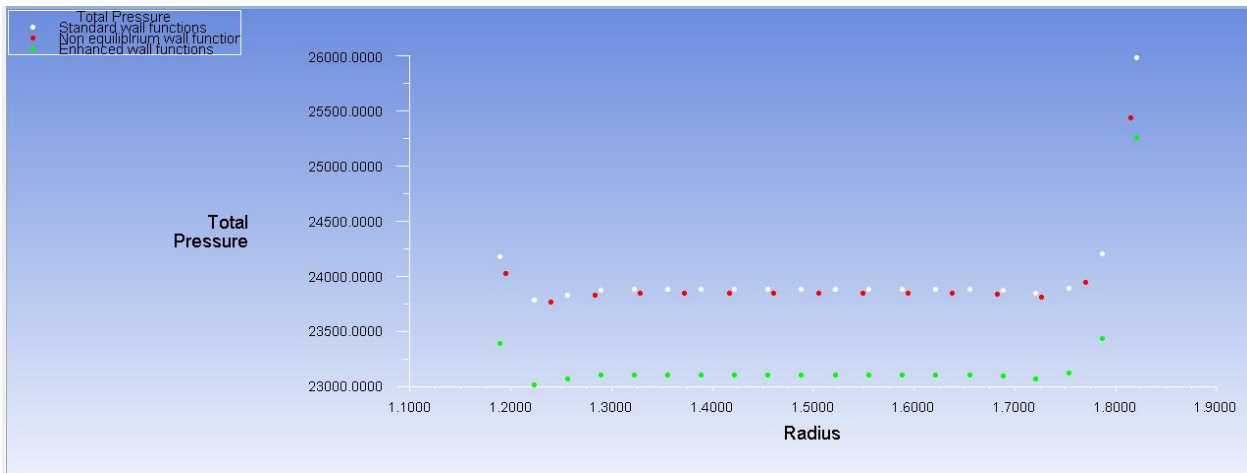
Όσον αφορά το Standard και το Non-equilibrium Wall Function, τα αποτελέσματα που δίνουν είναι αρκετά κοντά, σχεδόν ταυτίζονται. Τελικά επιλέγεται η χρήση του Non-equilibrium Wall Function διότι όπως αναφέρεται και παραπάνω αποδίδει καλύτερα τα τυρβώδη ροϊκά φαινόμενα ενώ ταυτόχρονα το πλέγμα που χρησιμοποιείται έχει μικρή απόσταση κόμβων από τα τοιχώματα, δηλαδή $30 < y^+ < 300$.



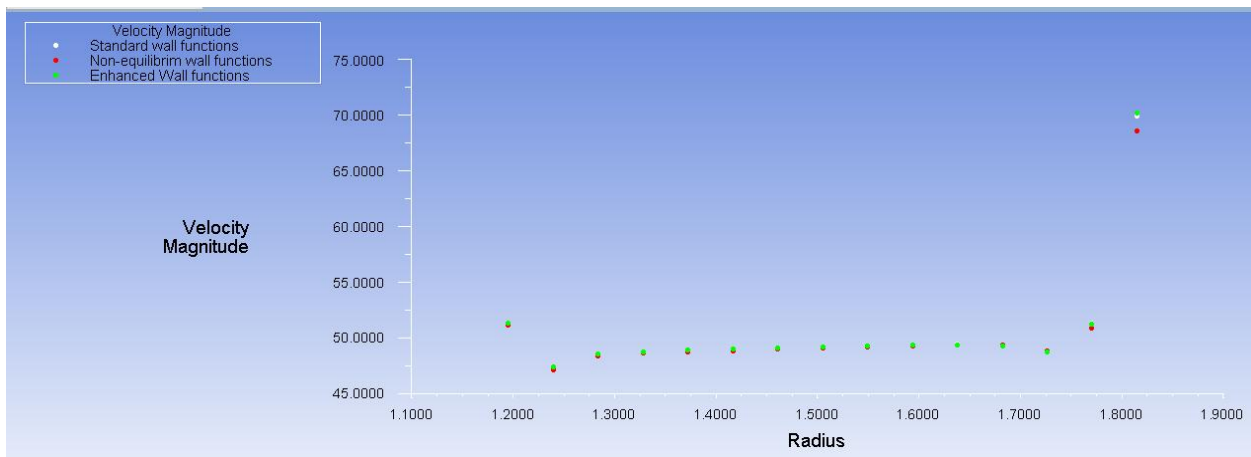
Διάγραμμα 5. 6 - Ολική πίεσης κατά την αξονική διεύθυνση για τα τρία Wall Functions



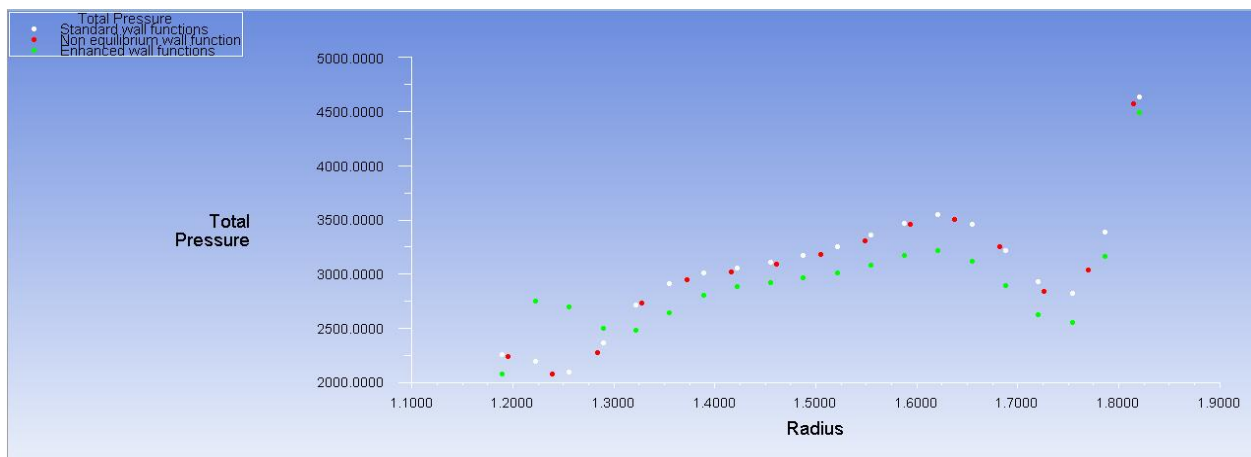
Διάγραμμα 5.7 - Μέγεθος ταχύτητας κατά την αξονική διεύθυνση για τα τρία Wall Functions



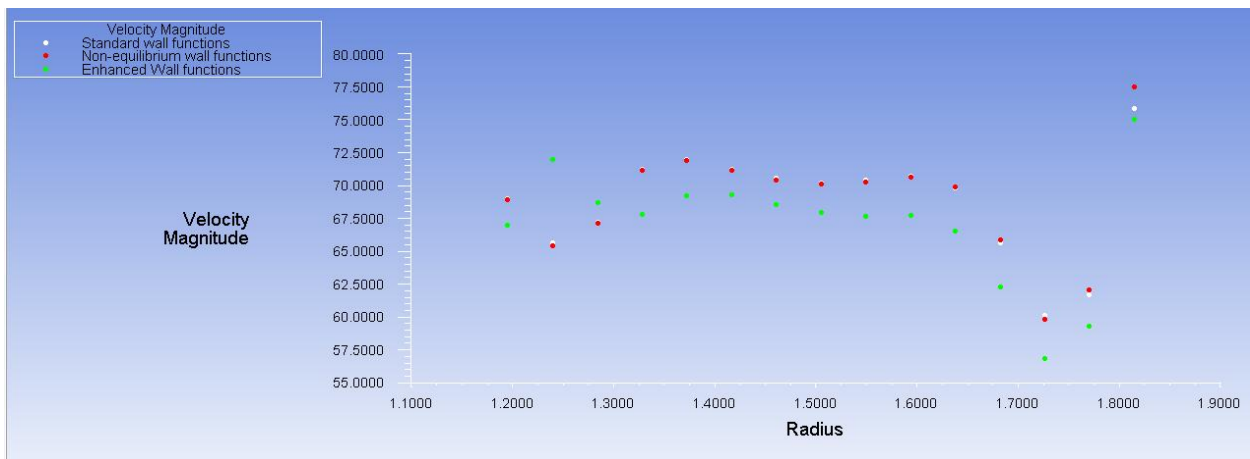
Διάγραμμα 5.8 - Ολική πίεση κατά την ακτινική διεύθυνση ελάχιστα πριν το περύγιο



Διάγραμμα 5.9 - Μέγεθος ταχύτητας κατά την ακτινική διεύθυνση ελάχιστα πριν το περύγιο



Διάγραμμα 5. 10 - Ολική πίεση κατά την ακτινική διεύθυνση ελάχιστα μετά το περύγιο



Διάγραμμα 5.11 - Μέγεθος ταχύτητας κατά την ακτινική διεύθυνση ελάχιστα μετά το περύγιο

5.4. Σχεδιασμός στροβιλομηχανής Wells

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προκαταρκτικός σχεδιασμός μίας στροβιλομηχανής Wells. Στην Εικόνα 5.7 απεικονίζεται η ταλαντευόμενη στήλη ύδατος (OWC), συσκευή για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας. Οι διαστάσεις που φαίνονται στην Εικόνα αποτελούν δεδομένα από υπολογισμούς που έγιναν από το τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών του ΕΜΠ. Οι συσκευές αποτελούν τις στηρίξεις της Wind Wave Float (WWF) εγκατάστασης και έχουν διάταξη όπως φαίνονται στην Εικόνα 27, δηλαδή σχηματίζουν ένα τρίγωνο.

Ο σχεδιασμός της μηχανής Wells βασίζεται σε πειραματικές μετρήσεις στη θαλάσσια περιοχή που πρόκειται να τοποθετηθεί η εγκατάσταση. Οι μετρήσεις αφορούν την παροχή αέρα και την στατική πίεση εντός του θαλάμου της OWC συσκευής για διάφορες τιμές της συχνότητας του κύματος (Διάγραμμα 5.12 και 5.13). Η γωνία β αποτελεί την κλίση που σχηματίζει η διεύθυνση του κύματος με τον άξονα x και μπορεί να πάρει διάφορες τιμές από 0 έως 180 μοίρες.

Στην παρούσα εργασία, για τον αρχικό σχεδιασμό της μηχανής Wells θεωρείται ότι το κύμα έχει διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα x , δηλαδή η γωνία β ισούται με 0 μοίρες ενώ τα δεδομένα των πραγματικών μετρήσεων που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό αναφέρονται στην OWC συσκευή με τον δείκτη 1 όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 27.

Όπως παρατηρείται από τα Διαγράμματα 5.12 και 5.13, η συχνότητα του κυματισμού κυμαίνεται από περίπου 0 έως 3 rad/sec. Η επικρατέστερη κυματική συχνότητα στη θαλάσσια περιοχή των μετρήσεων είναι η $\omega=1$ rad/sec και για τη συγκεκριμένη τιμή θα γίνει ο σχεδιασμός του υδροστρόβιλου Wells. Ταυτόχρονα το ύψος του κύματος (H) είναι 2m. Οι διαστάσεις της OWC συσκευής, με βάση τις οποίες προκύπτουν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων φαίνονται στην Εικόνα 5.8.

Από Διάγραμμα 5.12 και 5.13, για συχνότητα κύματος $\omega = 1$ rad/sec και γωνία πρόσπτωσης κύματος β ίση με 0° , οι αδιάστατες τιμές της στατικής πίεσης και της παροχής αέρα στο θάλαμο της συσκευής αντιστοιχούν σε $P_{st}^* = 0.18$ και $Q^* = 1.5$. Το αδιάστατο μέγεθος της στατικής πίεσης και της παροχής ορίζεται ως:

$$P_{st}^* = \frac{P_{st}}{\rho_w g \frac{H}{2}} \quad (5.4)$$

$$Q^* = \frac{Q}{\omega b^2 \frac{H}{2}} \quad (5.5)$$

P_{st} : στατική πίεση (Pa)

Q : Παροχή αέρα (m^3/sec)

ρ_w : πυκνότητα νερού ($1025 \text{ kg}/m^3$)

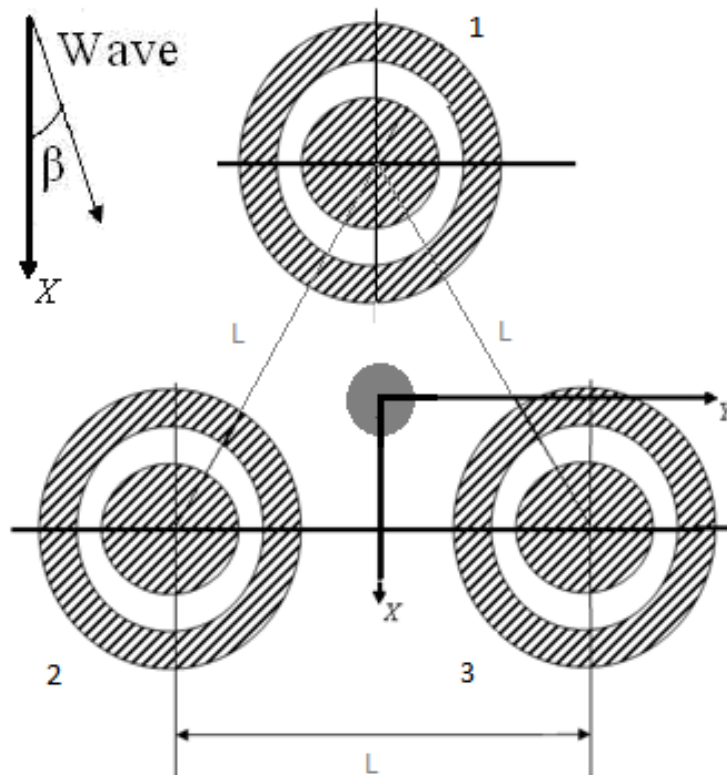
g : $9.81 \text{ m}/sec^2$

H : ύψος κύματος (m)

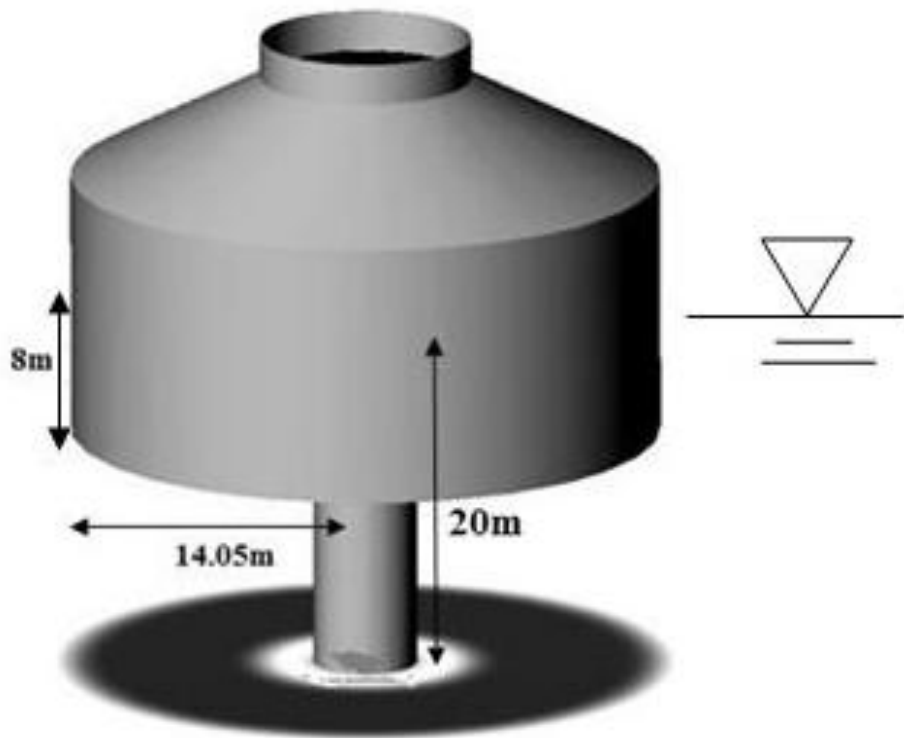
ω : συχνότητα κυματισμού (rad/sec)

b : ακτίνα θαλάμου OWC συσκευής (14.05 m)

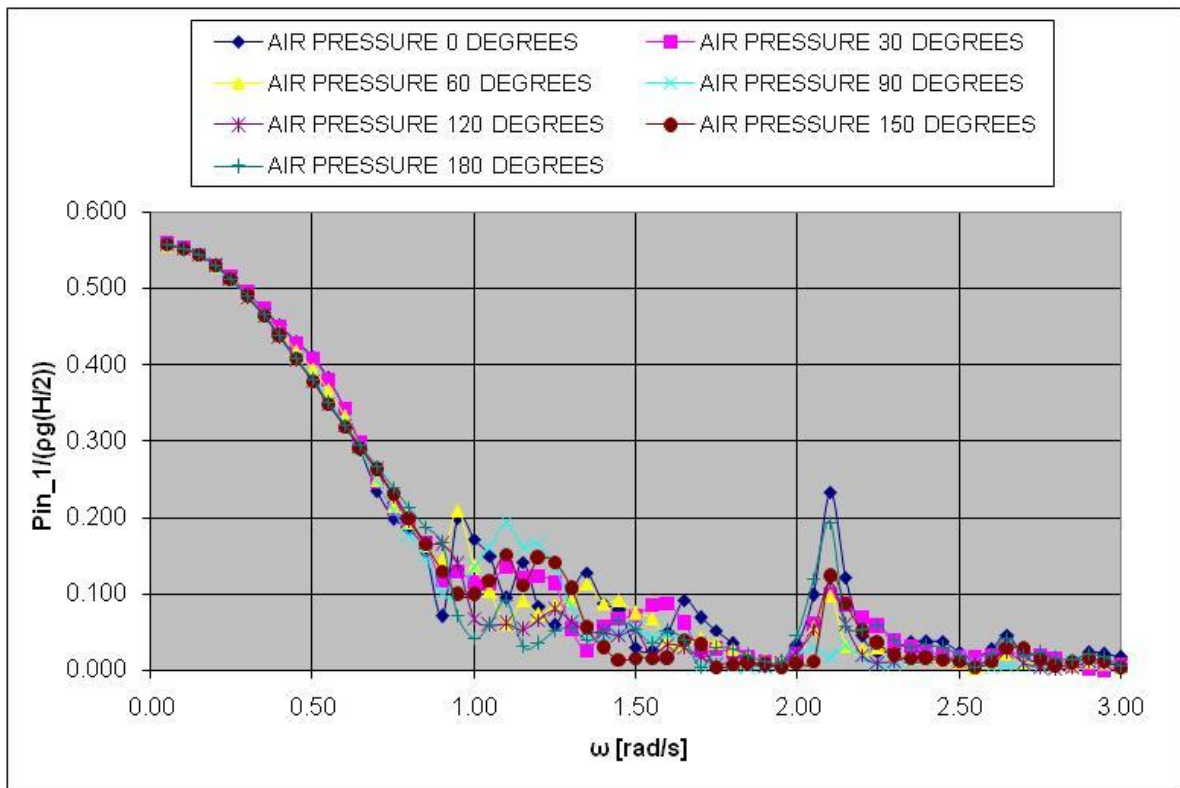
Από τις σχέσεις 5.4 και 5.5 προκύπτει ότι τα αδιάστατα μεγέθη πίεσης και παροχής ισοδυναμούν με $DP_{st_design} = 1810 \text{ Pa}$ και $Q_{design} = 296.1 \text{ m}^3/sec$ αντίστοιχα.



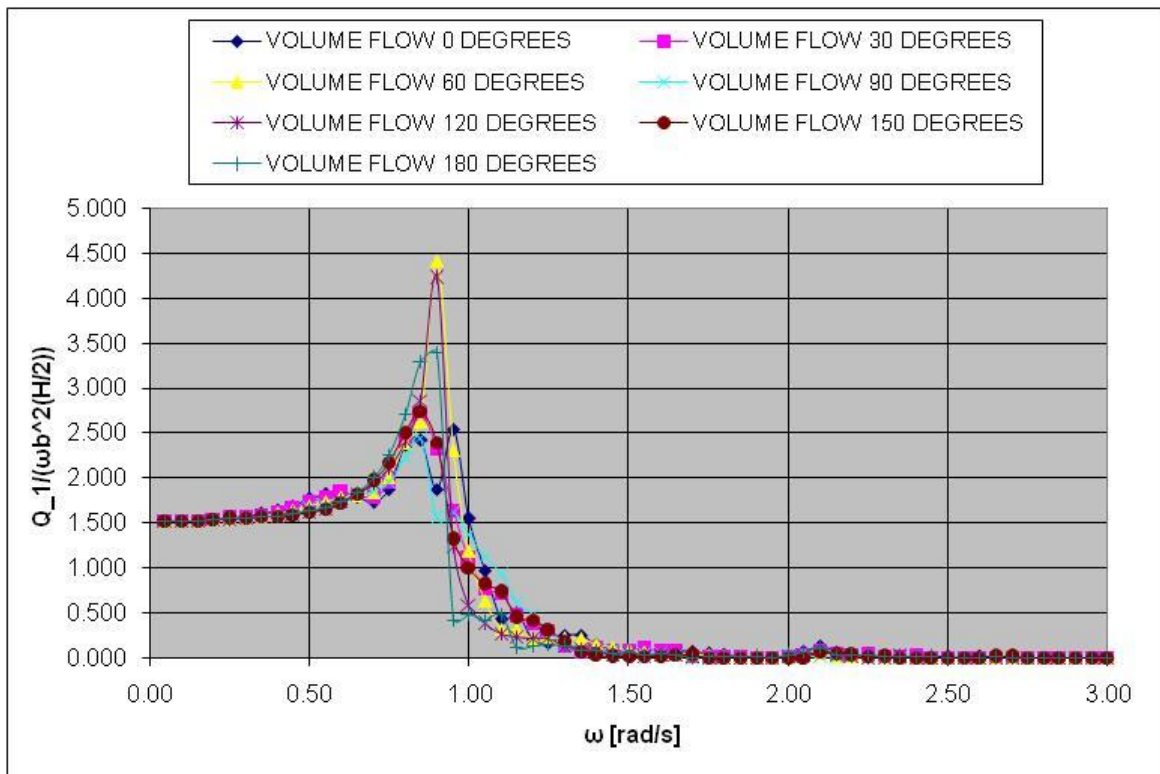
Εικόνα 5.7 - Σχηματική απεικόνιση τοποθέτησης OWC συσκευών σε παράκτια εγκατάσταση



Εικόνα 5.8 - Σχηματική απεικόνιση OWC συσκευής



Διάγραμμα 5.12 - Αδιάστατη πίεση συναρτήσει των συχνοτήτων κυματισμού για την OWC συσκευή 1



Διάγραμμα 5. 13 - Αδιάστατη πίεση παροχής αέρα συναρτήσει των συχνοτήτων κυματισμού για την OWC συσκευή 1

5.5. Αρχική διαστασιολόγηση μηχανής Wells

Για OWC συσκευές ισχύει γραμμική σχέση μεταξύ της πτώσης στατικής πίεσης (DP_{st}) και της παροχής αέρα (Q). Υπό τη μορφή αδιάστατων μεγεθών η αδιάστατη χαρακτηριστική σταθερά αεροστροβίλου K αντιστοιχεί σε:

$$K = \frac{\Psi}{\varphi} \quad (5.6)$$

όπου Ψ και φ η αδιάστατη πίεση και παροχή.

Από τη δημοσίευση των Martins-Rivas προκύπτει ότι η χαρακτηριστική σταθερά αεροστροβίλου ή damping coefficient (Λ) αποδίδεται από τη σχέση:

$$\Lambda = \frac{K \cdot D}{\rho_{air} \cdot N} \quad (5.7)$$

Για τον σχεδιασμό της στροβιλομηχανής Wells, δεδομένα σχετικά με την σταθερά της μηχανής διατίθενται από τη σχολή Ναυπηγών Μηχανικών του ΕΜΠ. Για τις κυματικές συχνότητες που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον που πρόκειται να εγκατασταθεί η OWC συσκευή αποδίδεται η αδιάστατη χαρακτηριστική σταθερά K (Διάγραμμα 5.14). Η κυματική συχνότητα σχεδιασμού για την οποία γίνεται η διερεύνηση είναι ίση με $\omega_{design} = 1 \text{ rad/sec}$. Έτσι από προκύπτει ότι για τη συγκεκριμένη συχνότητα η σταθερά είναι: $K_{opt} = 9$. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.14, ο τύπος που δίνει τη χαρακτηριστική αδιάστατη σταθερά της μηχανής είναι:

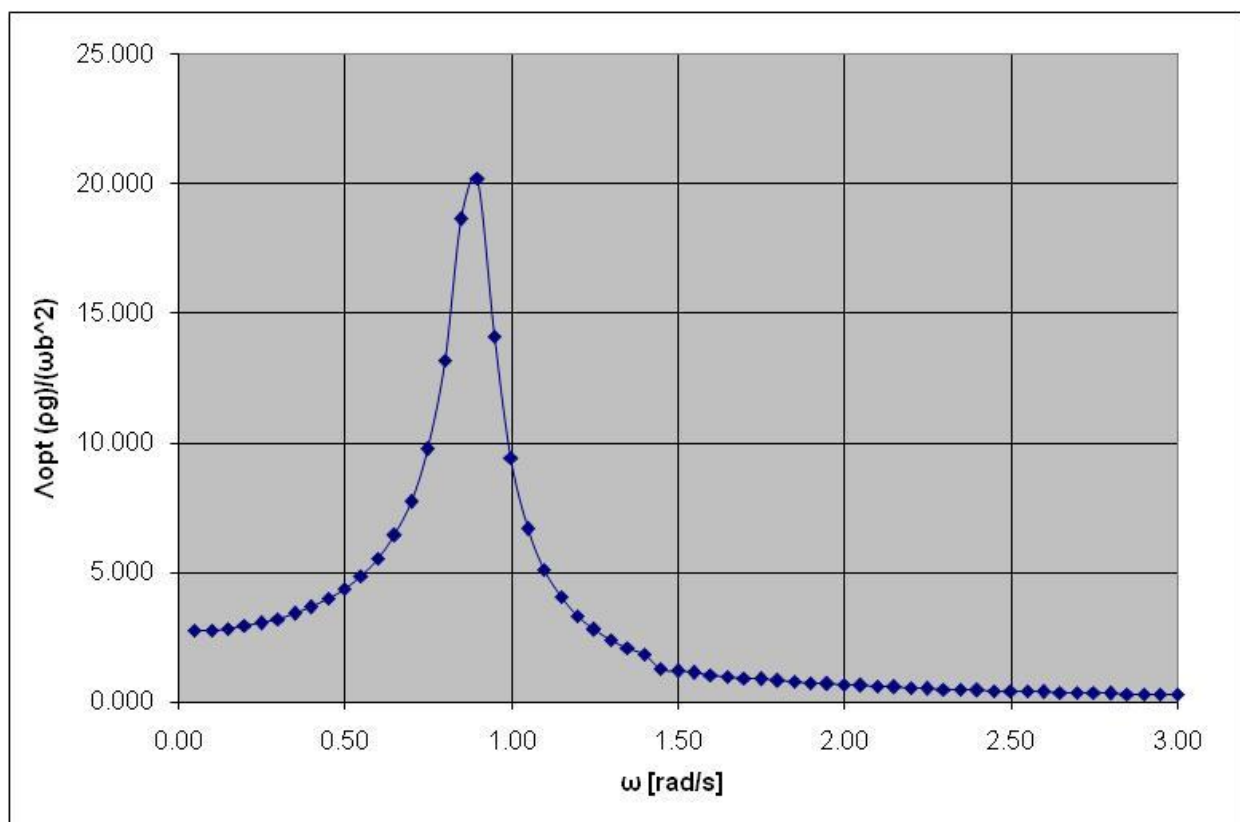
$$K_{opt} = \frac{\Lambda_{opt} \cdot (\rho_{water} \cdot g)}{\omega \cdot b^2} \quad (5.8)$$

Από τη (5.8) και για $K_{opt}=9$, $\rho_{water} = 1025 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$, $\omega = 1 \text{ rad/sec}$, $b = 14.05 \text{ m}$:

$$\Lambda_{opt} = 0.1767 \frac{\text{m}^4 \cdot \text{sec}}{\text{kg}}$$

Η σχέση (5.7) γίνεται:

$$0.1767 = \frac{9 \cdot D}{1,225 \cdot N} \quad (5.9)$$



Διάγραμμα 5.14 - Αδιάστατη χαρακτηριστική σταθερά αεροστροβίλου συναρτήσει των συχνοτήτων κυματισμού για την OWC συσκευή 1

Από τη σχέση που δίδεται από τη δημοσίευση των Martin-Rivas [25] (σχέση 5.7 και 5.9), μπορεί να γίνει μία πρώτη εκτίμηση της εξωτερικής διάστασης της μηχανής καθώς και των στροφών λειτουργίας της.

Έπειτα από βιβλιογραφική επισκόπηση για την εύρεση ενδεικτικής διαμέτρου μηχανής Wells, θεωρείται ότι $D = 3.5\text{m}$. Από σχέση Martin-Rivas (σχέση 5.9) υπολογίζεται ότι η ταχύτητα περιστροφής είναι $N = 145 \text{ rad/sec}$ ή 1385rpm .

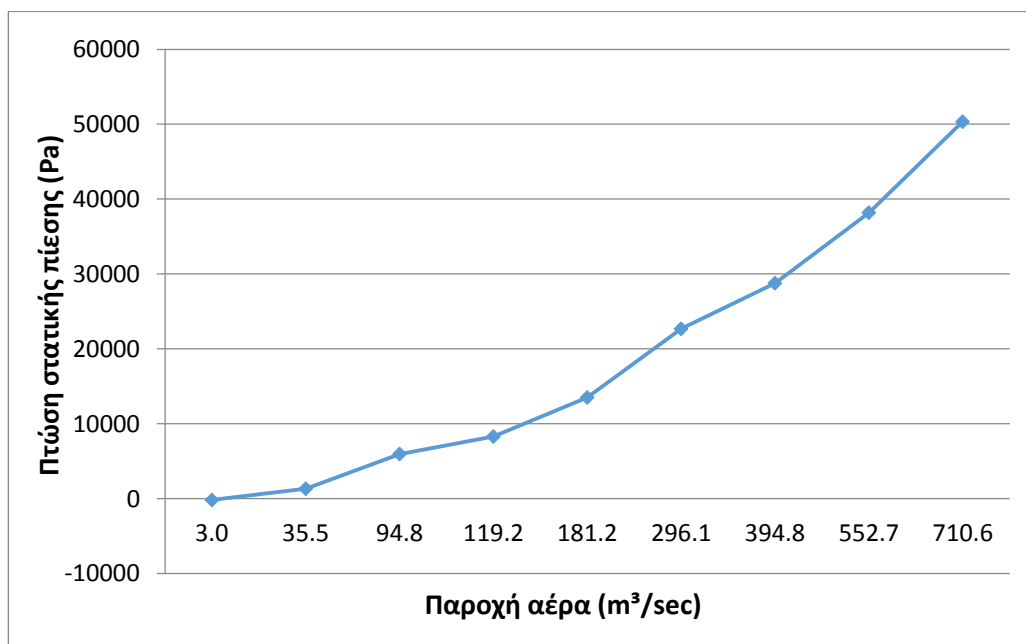
5.6. Αποτελέσματα πρώτης σχεδίασης

Με τη χρήση του CAD λογισμικού Solidworks σχεδιάζεται το χωρίο που απεικονίζει τη ροή του αέρα γύρω από ένα πτερύγιο της μηχανής. Λόγω της απόλυτης συμμετρίας της μηχανής Wells αρκεί ο σχεδιασμός και η ανάλυση μόλις ενός πτερυγίου. Έτσι ο όγκος υπολογισμός και ο χρόνος περιορίζεται σημαντικά.

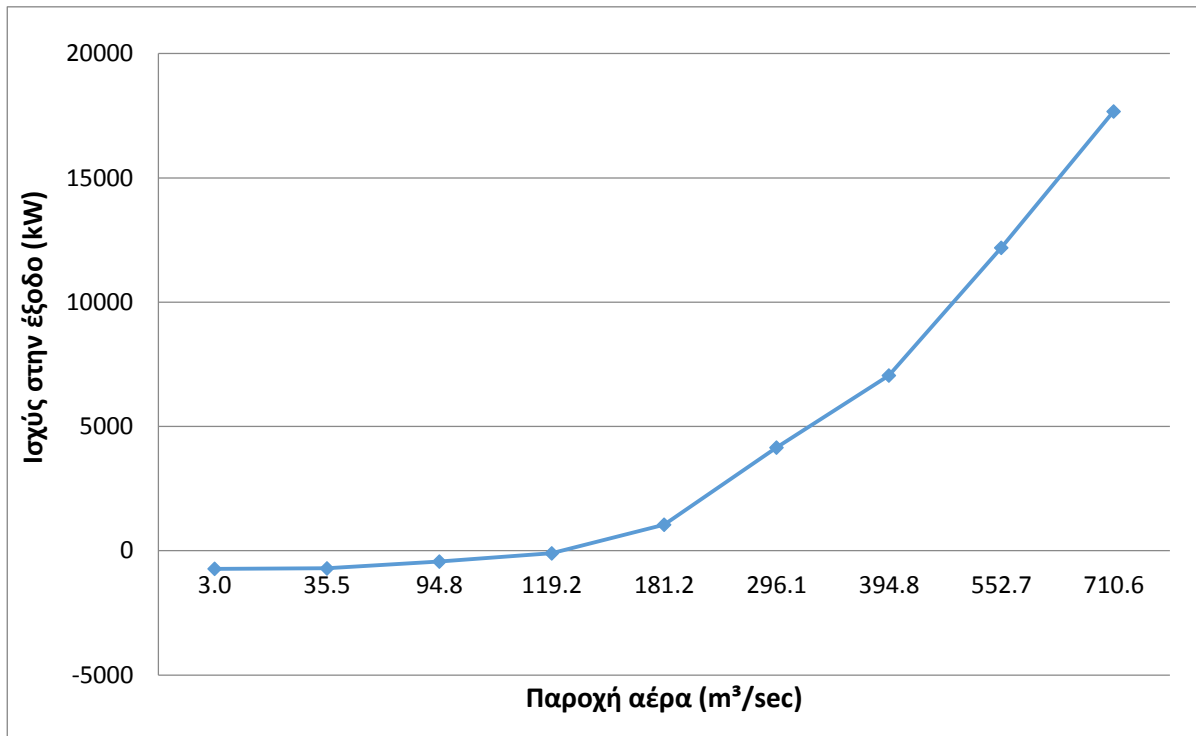
Για την αρχική θεώρηση των γεωμετρικών παραμέτρων, hub to tip ratio και solidity, έγινε βιβλιογραφική επισκόπηση. Τα χαρακτηριστικά της μηχανής Wells συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.2. Τα Διαγράμματα 5.15 (α), (β), (γ) αποτελούν τα διαγράμματα λειτουργίας της μηχανής Wells για διάφορες παροχές.

Προφίλ πτερυγίου	NACA0020
Διάμετρος ρότορα	3.5m
Blade sweep ratio	0.50
Διάκενο (Tip clearance)	0%
Solidity	0.64
Hub to tip ratio	0.67
Αριθμός πτερυγίων	6
Ταχύτητα περιστροφής	1385rpm

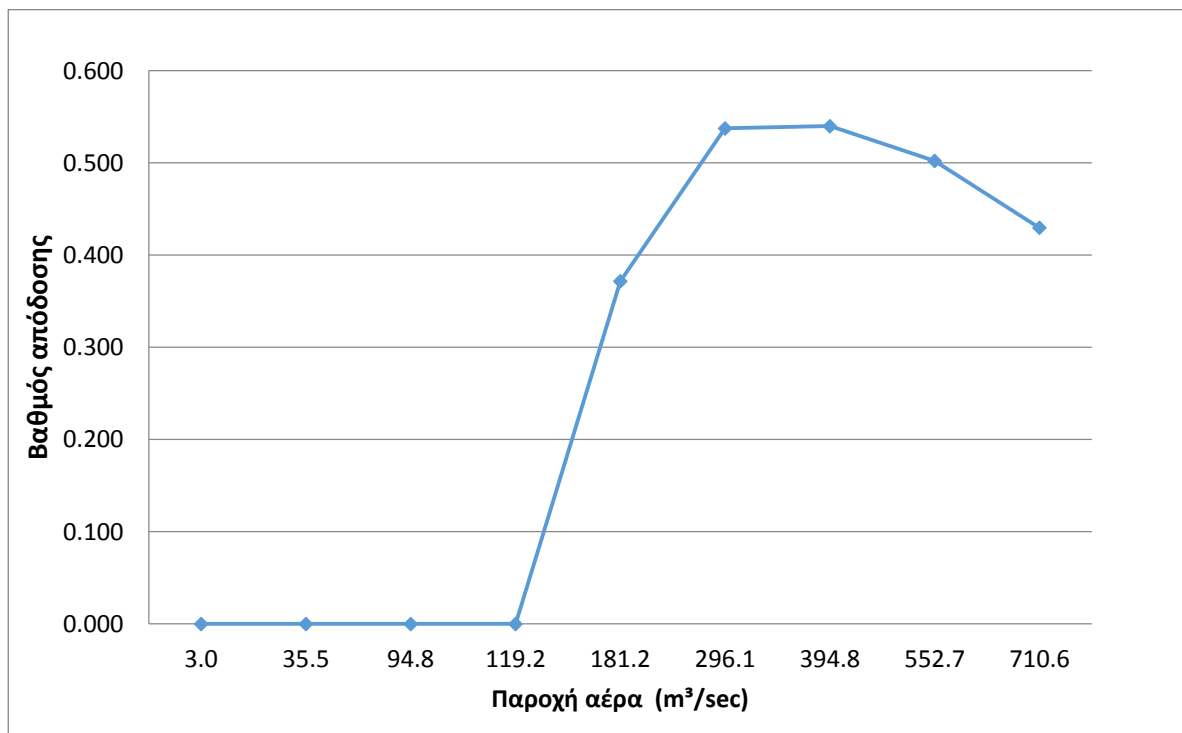
Πίνακας 5. 2 - Χαρακτηριστικά μηχανής Wells



(α)



(β)



(γ)

Διάγραμμα 5. 15 - Διαγράμματα λειτουργίας μηχανής Wells

Η μηχανή Wells που σχεδιάστηκε δεν ανταποκρίνεται στις συνθήκες λειτουργίας που προβλέπονται. Για την παροχή του σημείου λειτουργίας ($Q = 296.1 \text{ m}^3/\text{sec}$) η πτώση στατικής πίεσης θα έπρεπε να είναι ίση με 1810 Pa σύμφωνα με όσα υπολογίστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Από Διάγραμμα 5.15 (α) προκύπτει ότι DP_{st} είναι περίπου ίση με 22600 Pa. Συνεπώς η συγκεκριμένη γεωμετρία απέχει αρκετά από το επιθυμητό σημείο λειτουργίας.

Σε επόμενο στάδιο προβλέπεται η αλλαγή της εξωτερικής διαμέτρου της μηχανής καθώς και της ταχύτητας περιστροφής. Για κάθε μεταβολή των δύο παραμέτρων εξετάζεται η πτώση πίεσης για τη παροχή λειτουργίας αλλά και ο βαθμός απόδοσης της μηχανής. Προς χάρη διευκόλυνσης και αποφυγής επαναληπτικού σχεδιασμού γεωμετριών και διακριτοποίησης του χωρίου (meshing), το λογισμικό επίλυσης της ροής (Fluent) παρέχει τη δυνατότητα αύξησης της συνολικής γεωμετρίας κατά ένα ποσοστό. Επιλέγεται ότι η γεωμετρία θα αυξάνει κατά 20% ενώ η ταχύτητα περιστροφής θα μειώνεται κατά 20%. Συγκεκριμένα οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν από την επίλυση στο Fluent παρατίθενται στους Πίνακες 5.3 - 5.6.

a/a	n (rpm)	n (rad/sec)	DP_{st} (Pa)	Ροπή (Nm)	Βαθμός απόδοσης
1	1385	145	22687.7	4150.5	0.54
2	363	38	7056.5	1601.9	0.17

Πίνακας 5. 3 - Εξωτερική διάμετρος μηχανής ίση με 3.5m

a/a	n (rpm)	n (rad/sec)	DP_{st} (Pa)	Ροπή (Nm)	Βαθμός απόδοσης
1	1385	145	18476.1	2219.6	0.35
2	1108	116	15059.4	2955.9	0.46
3	886.4	92.8	11827.2	3192.2	0.51
4	709.12	74.3	9544.4	3422.1	0.54
5	567.3	59.4	7139.8	3187.8	0.54
6	453.8	47.5	5529.3	2926.5	0.51
7	363.1	38	4459.3	2460.2	0.43
8	300	31.4	3839.3	2153.3	0.36

Πίνακας 5. 4 - Αύξηση εξωτερικής διαμέτρου κατά 20%, D = 4.2m

a/a	n (rpm)	n (rad/sec)	DP_{st} (Pa)	Ροπή (Nm)	Βαθμός απόδοσης
1	1385	145	14056.6	-1793.8	-0.38
2	1108	116	11785.4	142.8	0.03
3	886.4	92.8	9683.2	1376.6	0.27
4	709.1	74.3	7925.9	2168.2	0.41

5	567.3	59.4	6349.5	2571.5	0.49
6	453.8	47.5	5054.6	2760.7	0.53
7	363.1	38	3853.1	2642.1	0.53
8	290.5	30.4	2965.2	2576.3	0.54
9	230	24.1	2323.7	2149.3	0.45
10	200	20.9	2059.2	1904.0	0.40

Πίνακας 5.5 - Αύξηση εξωτερικής διαμέτρου κατά 20%, D = 5.04m

a/a	n (rpm)	n (rad/sec)	DP_{st} (Pa)	Ροπή (Nm)	Βαθμός απόδοσης
1	886.4	92.8	8314.36	-563.6	-0.13
2	709.1	74.3	6862.04	783.0	0.17
3	567.3	59.4	5621.02	1648.6	0.35
4	453.8	47.5	4573.03	2177.3	0.46
5	363.1	38.0	3591.03	2348.1	0.50

Πίνακας 5.6 - Αύξηση εξωτερικής διαμέτρου κατά 20%, D = 6.05m

Στον Πίνακα 5.3 η διάμετρος της μηχανής είναι ίση με την αρχική θεώρηση, αυτό που μεταβάλλεται είναι ο αριθμός των στροφών της μηχανής. Παρατηρείται ότι ακόμα και για χαμηλές στροφές δεν επιτυγχάνεται η επιθυμητή πτώση στατικής πίεσης ενώ ταυτόχρονα ο βαθμός απόδοσης είναι ελάχιστος. Αυξάνοντας το συνολικό χωρίο κατά 20% η εξωτερική διάμετρος ισούται με 4.2m. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής ξεκινάει από 1385 rpm και μειώνεται κατά 20% μέχρι τα 300 rpm. Η συγκεκριμένη διάμετρος απορρίπτεται καθώς το σημείο λειτουργίας της απέχει αρκετά από το επιθυμητό. Για αύξηση κατά 20% ακόμη η εξωτερική διάμετρος ισούται με 5.04m ενώ η ταχύτητα περιστροφής έχει ένα μεγάλο εύρος. Στο σημείο αυτό παρατηρείται ότι για 200rpm η πτώση πίεσης προσεγγίζει την επιθυμητή τιμή ενώ ο βαθμός απόδοσης παίρνει μία μέτρια τιμή της τάξης του 40%. Τέλος για εξωτερική διάμετρο 6.05m, δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια σχεδιασμού και το μέγεθος της μηχανής είναι πλέον αρκετά ογκώδες. Στο σημείο αυτό προκύπτει ότι η στροβιλομηχανή Wells με εξωτερική διάμετρο περίπου ίση με 5m και 200 rpm ταχύτητα είναι κατάλληλη για το σημείο λειτουργίας που προβλέπεται. Προφανώς οι αλλαγές στις γεωμετρικές παραμέτρους μπορούν να οδηγήσουν στο να επιτευχθεί ακριβώς η πτώση πίεσης εξασφαλίζοντας καλύτερο βαθμό απόδοσης.

5.7. Διαστασιολόγηση με χρήση διαγράμματος Cordier

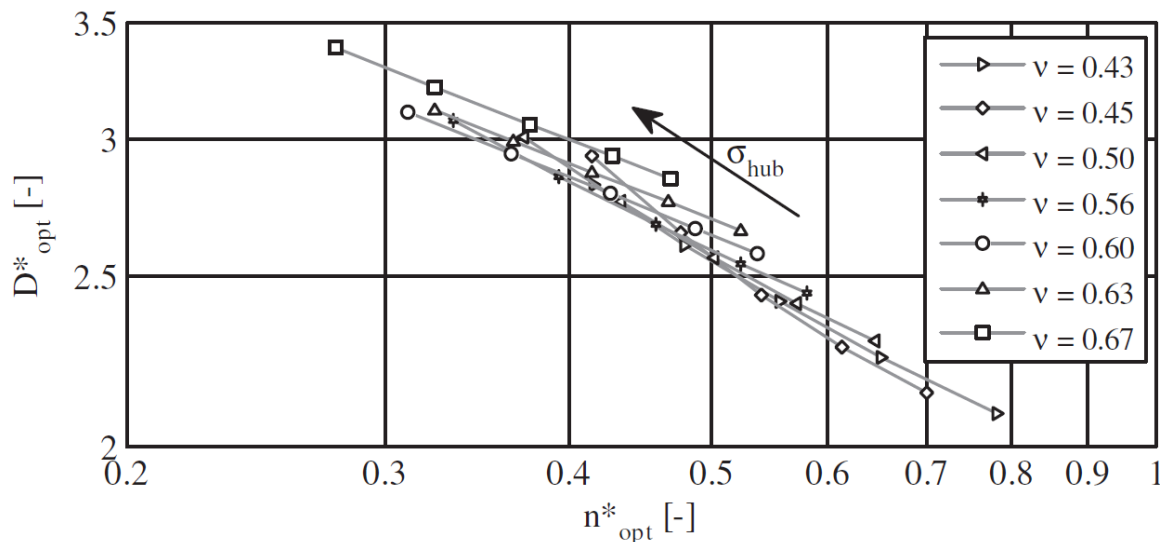
Για τη διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου Wells γίνεται με χρήση των διαγραμμάτων Cordier (Διάγραμμα 5.16). Η αρχική σχεδίαση αφορά μία μηχανή στην πιο απλή της μορφή, έχοντας μία σειρά πτερυγίων (monoplane), χωρίς οδηγητικά πτερύγια (guide vanes) [18]. Για την χρήση του διαγράμματος Cordier αρκεί να οριστούν οι τιμές της ειδικής γωνιακής ταχύτητας (specific speed):

$$n^* = \frac{\varphi^{1/2}}{\psi^{3/4}} \quad (5.10)$$

και της ειδικής διαμέτρου της μηχανής (specific diameter)

$$D^* = \frac{\psi^{1/4}}{\varphi^{1/2}} \quad (5.11)$$

Σαν πρώτες σχεδιαστικές παραμέτρους υποθέτουμε για την παράμετρο hub to tip ratio (h) ότι είναι ίση με 0.5 και τη παράμετρο solidity (σ) ότι είναι ίση με 0.5, όπως προτείνεται βιβλιογραφικά. Από το διάγραμμα Cordier (Διάγραμμα 4), προκύπτουν οι τιμές της ειδικής ταχύτητας και της ειδικής διαμέτρου.



Διάγραμμα 5.16 - Διάγραμμα Cordier για μηχανή Wells με μία σειρά πτερυγίων, χωρίς οδηγητικά πτερύγια στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας. σ_{hub} παίρνει τιμές από 0.6 έως 0.8 με βήμα 0.05 [18]

Για τον σχεδιασμό ενός νέου στροβίλου Wells, με τη χρήση του διαγράμματος Cordier, αρκεί να προσδιοριστεί η διαθέσιμη ισχύς του εγκλωβισμένου αέρα στο θάλαμο της συσκευής ($P_{pneumatic}$). Ο υπολογισμός γίνεται για μία συγκεκριμένη θαλάσσια κατάσταση (sea state) και όπως αναφέρθηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση ο υπολογισμός αφορά την θαλάσσια κατάσταση με συχνότητα κύματος 1rad/sec και γωνία πρόπτωσης κυματισμού β ίση με 0° .

$$P_{pneumatic} = Q \times DP_{st} = 535.94kW$$

(5.12)

Χαρακτηριστικό της μηχανής Wells είναι η γραμμική σχέση που συνδέει τα μεγέθη της παροχής του αέρα και της πτώσης πίεσης. Ο συντελεστής της συσκευής (damping coefficient) ορίζεται ως:

$$D_{ts} = \frac{\Delta P_{st}}{Q} = 6.11 \text{ kg/m}^4 \text{sec}$$

(5.13)

Καθώς πλέον όλα τα μεγέθη είναι γνωστά, οι παρακάτω σχέσεις δίνουν τη διάμετρο του ρότορα της μηχανής D_{tip} και της ταχύτητας περιστροφής n .

$$n = n^* (2\pi^2)^{-1/4} (1/\rho)^{3/4} P_{pneumatic}^{1/8} D_{ts}^{5/8}$$

(5.14)

$$D_{tip} = D^* \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^{1/4} (1/\rho)^{-1/4} P_{pneumatic}^{1/8} D_{ts}^{-3/8}$$

(5.15)

Έτσι σχεδιάζεται αρχικά στρόβιλος Wells διάμετρο ρότορα (D_{tip}) ίσο με **5.3m** που θα περιστρέφεται με ταχύτητα **200rpm**.

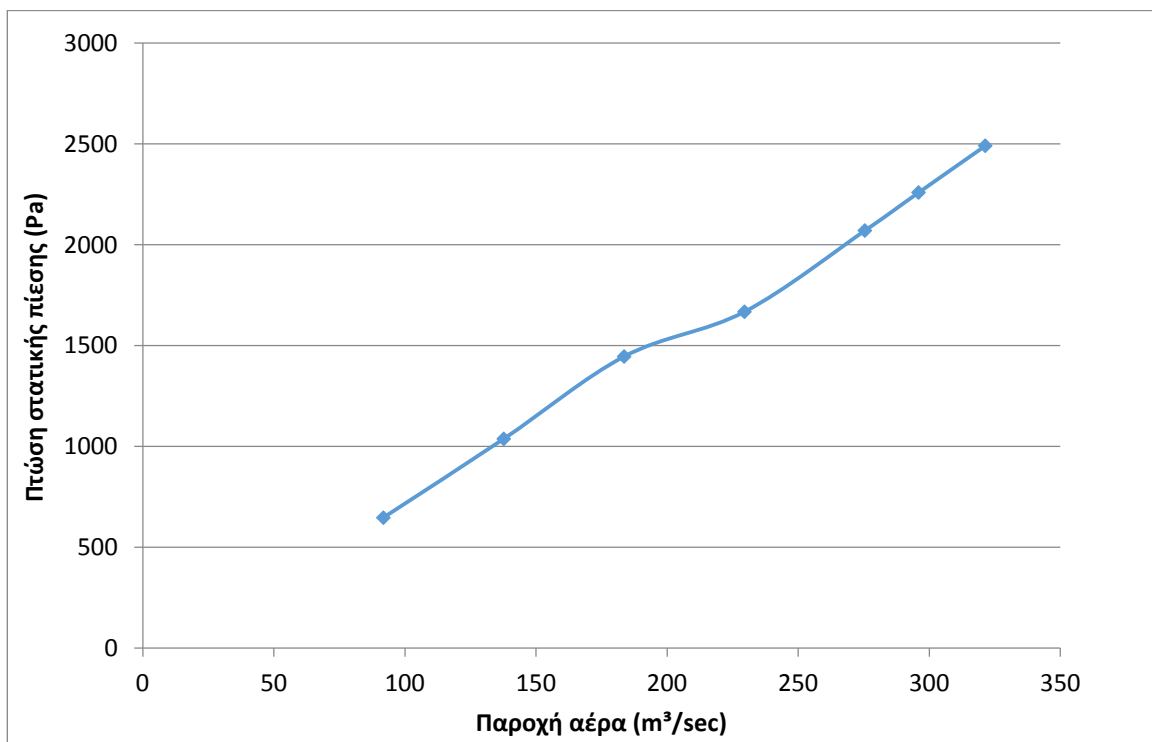
Η μεθοδολογία που ακολουθείται επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν στην προηγούμενη παράγραφο σχετικά με την εξωτερική διάμετρο του ρότορα και την ταχύτητα περιστροφής. Στον Πίνακα 5.7 συγκεντρώνονται τα χαρακτηριστικά της νέας μηχανής Wells που σχεδιάζεται και πρόκειται να μελετηθεί.

Προφίλ πτερυγίου	NACA0020
Διάμετρος ρότορα (m)	5.3
Blade sweep ratio	0.50
Διάκενο (Tip clearance)	1%
Solidity	0.50
Hub to tip ratio	0.50
Αριθμός πτερυγίων	8
Μήκος χορδής (m)	0.82
Ταχύτητα περιστροφής	200rpm

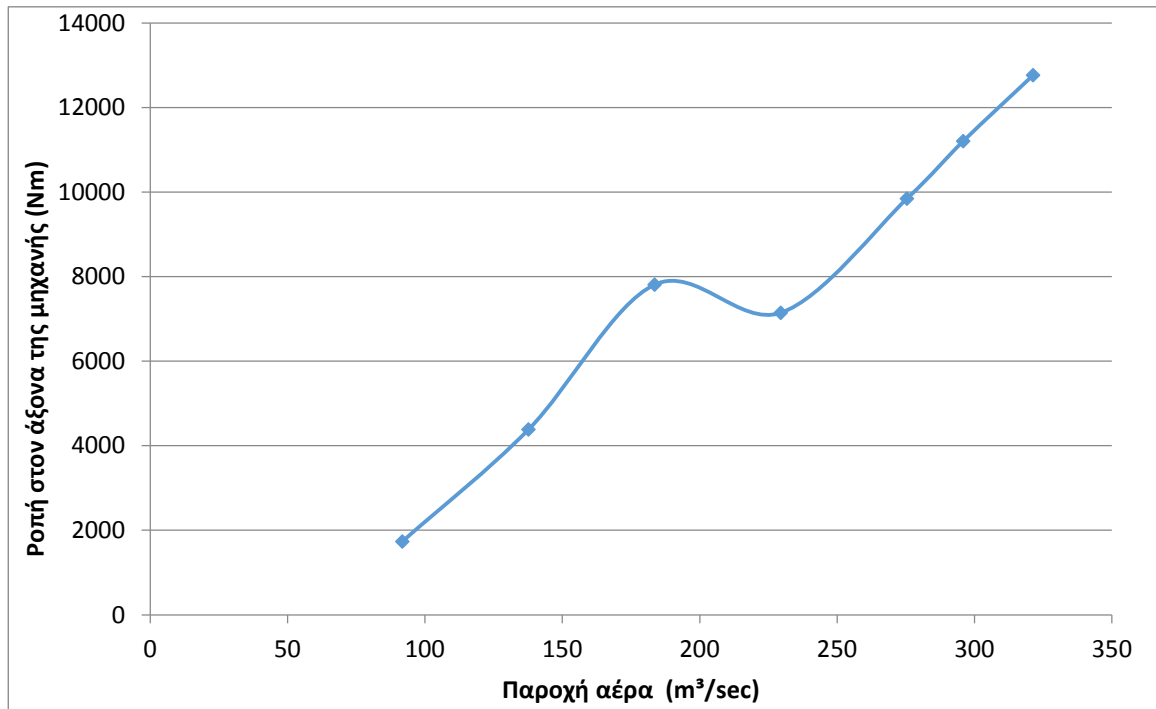
Πίνακας 5.7 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μηχανής Wells

5.8. Αποτελέσματα υπολογιστικής επίλυσης

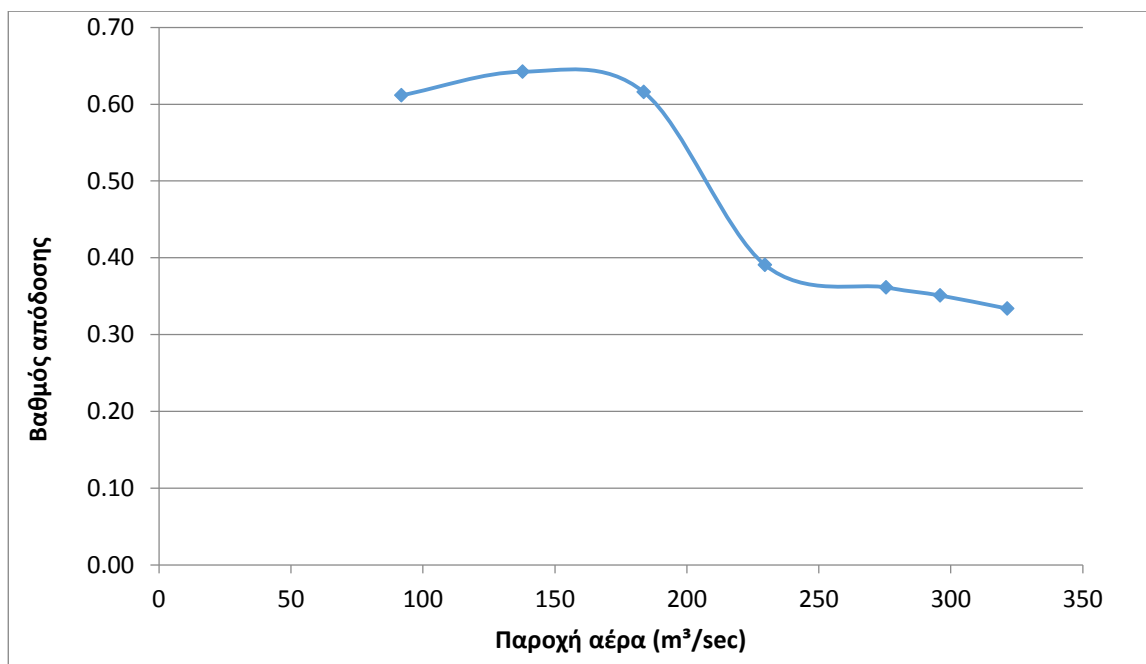
Το ροϊκό πεδίο που διέρχεται από τη γεωμετρία με τα χαρακτηριστικά που αναφέρεται στον Πίνακα 5.8, επιλύεται για διάφορες παροχές λειτουργίας ώστε να προκύψουν τα διαγράμματα λειτουργίας της μηχανής. Η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται σταθερή και αυτό που μεταβάλλεται κάθε φορά είναι η αξονική ταχύτητα εισόδου του αέρα. Από τα διαγράμματα λειτουργίας (Διαγράμματα 5.17) συμπεραίνεται ότι για το σημείο σχεδιασμού ($Q_{design} = 296.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $DP_{st_design} = 1810 \text{ Pa}$) η μηχανή βρίσκεται σε κατάσταση Stall. Το "στολάρισμα" ξεκινάει από το σημείο όπου η ροπή μεγιστοποιείται και στην συνέχεια μειώνεται απότομα ($Q_{cr} = 185 \text{ m}^3/\text{sec}$). Κανονικά η καμπύλη της ροής θα έπρεπε να έχει φθίνουσα πορεία αλλά στην προκειμένη περίπτωση μετά την απότομη μείωση ακολουθεί ξανά αύξηση. Στην πραγματικότητα το μοντέλο Reynolds Average Navier Stokes για μόνιμη ροή (steady RANS) αποτυγχάνει να αναπαραστήσει την κατάσταση έντονης αποκόλλησης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ανάλυση (k-ε realizable) καθώς δεν αποδίδουν σωστά την περιοχή της έντονης αποκόλλησης της ροής [31]. Όπως είναι λογικό από τη στιγμή που η μηχανή έχει "στολάρει" ο βαθμός απόδοσης μειώνεται δραματικά. Συνεπώς η συγκεκριμένη γεωμετρία δεν είναι κατάλληλη για τις συγκεκριμένες συνθήκες.



(α)



(β)



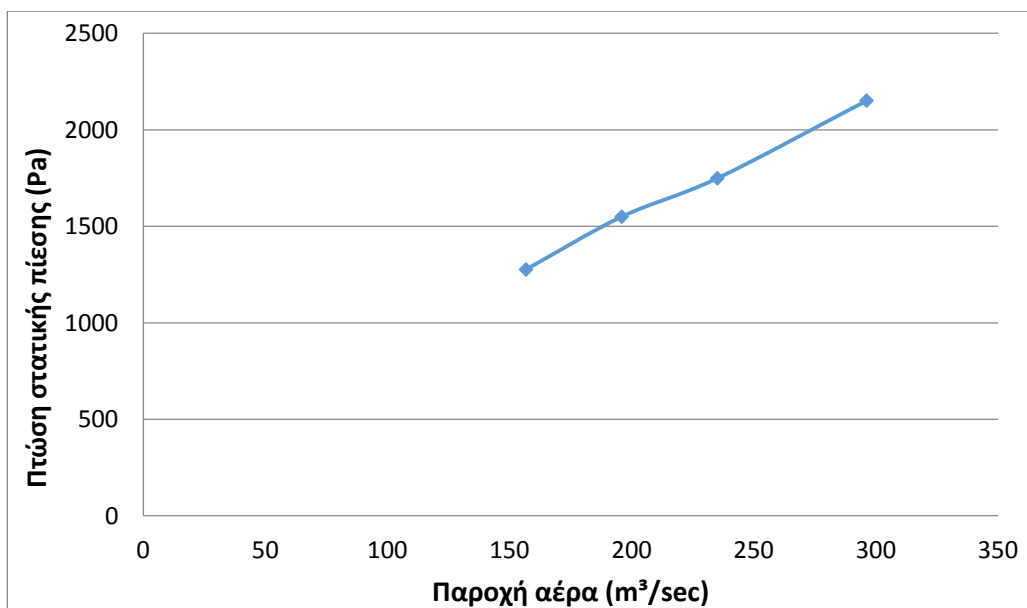
Διάγραμμα 5. 17 - Διαγράμματα λειτουργίας μηχανής Wells, $D = 5.3\text{m}$, $n=200\text{rpm}$, $h=0.5$, $s=0.50$

Στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση για το σχεδιασμό μηχανής Wells ώστε το σημείο λειτουργίας $Q_{design} = 296.1\text{m}^3/\text{sec}$ και $DP_{st_design} = 1810\text{ Pa}$ να βρίσκεται στην περιοχή κανονικής λειτουργίας. Έπειτα από βιβλιογραφική επισκόπηση προκύπτει ότι για σταθερό solidity, η αύξηση της παραμέτρου hub to tip ratio επιφέρει μεγαλύτερο εύρος παροχών λειτουργίας και καθυστερεί την αποκόλληση [20]. Διατηρώντας σταθερή την εξωτερική διάμετρο του ρότορα μεταβάλλεται η διάμετρος της πλήμνης. Η παράμετρος hub to tip ratio ισούται με 0.62. Στον Πίνακα 5.8 συγκεντρώνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης μηχανής.

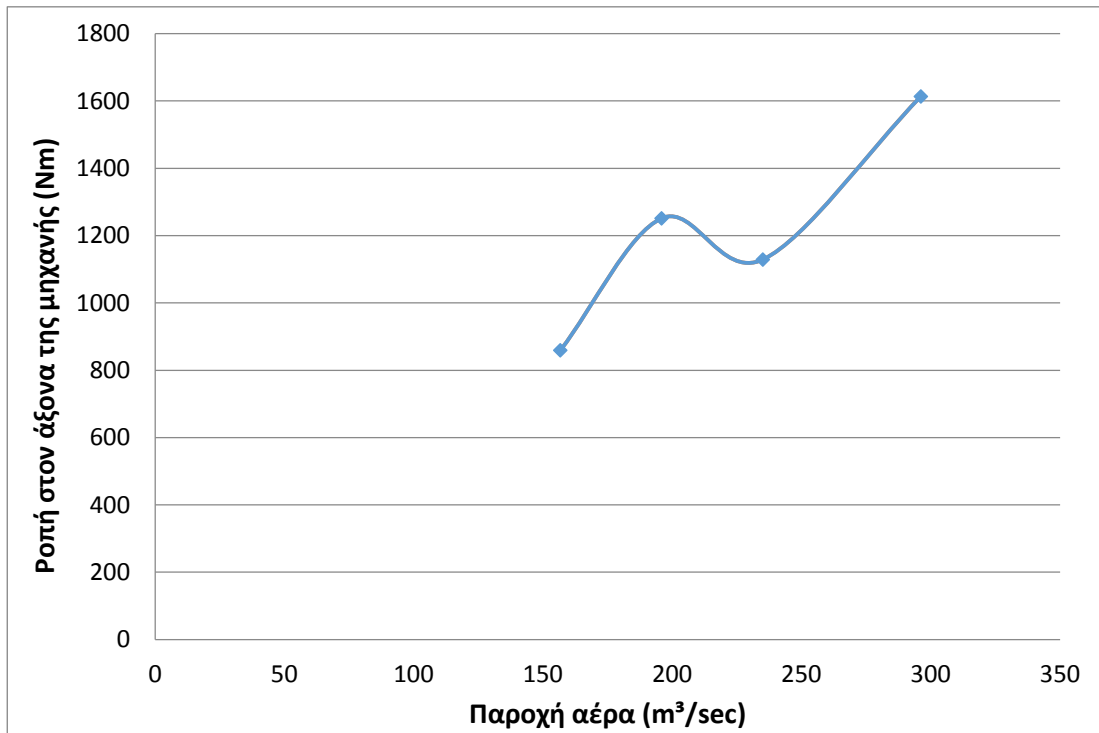
Προφίλ πτερυγίου	NACA0020
Διάμετρος ρότορα (m)	5.3
Blade sweep ratio	0.50
Διάκενο (Tip clearance)	1%
Solidity	0.50
Hub to tip ratio	0.62
Αριθμός πτερυγίων	6
Μήκος χορδής (m)	1.152
Ταχύτητα περιστροφής	200rpm

Πίνακας 5.8 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μηχανής Wells

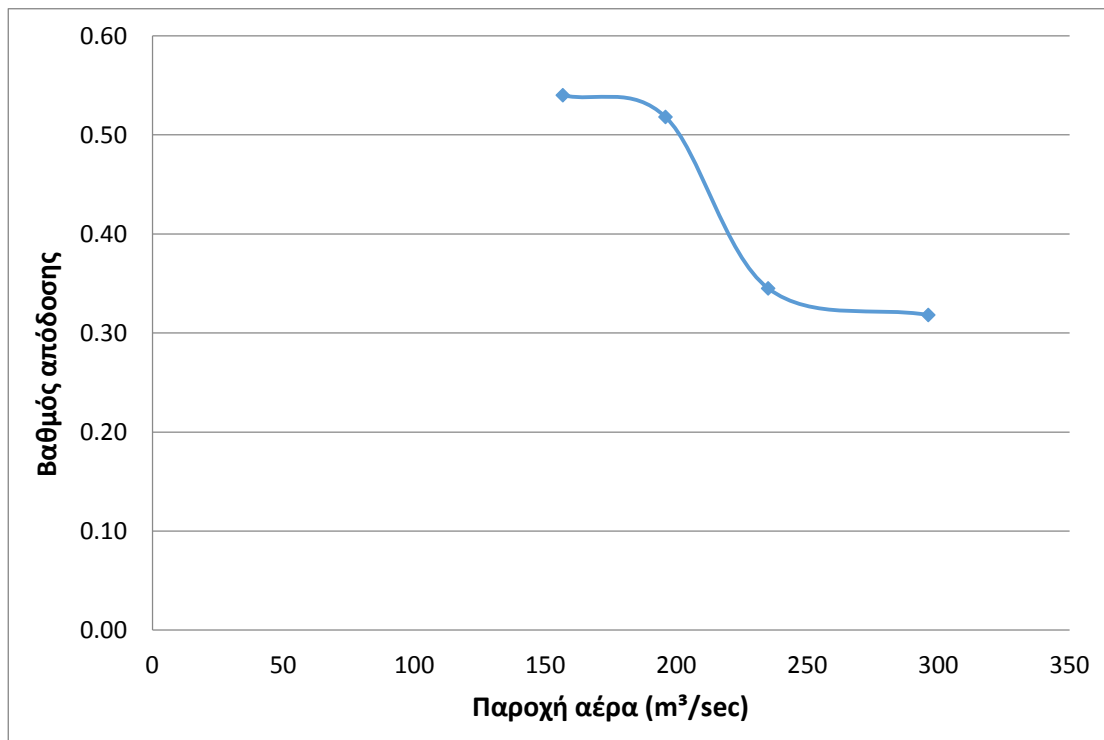
Τα Διαγράμματα 5.18(α), (β), (γ) αποτελούν τα διαγράμματα λειτουργίας της μηχανής. Η μηχανή αποδίδει τη μέγιστη ροπή για παροχή $Q_{cr} = 195\text{m}^3/\text{sec}$. Πράγματι υπάρχει μία μικρή καθυστέρηση στην έναρξη του "στολαρίσματος" αλλά η παροχή λειτουργίας για την οποία σχεδιάζεται η μηχανή βρίσκεται και πάλι στην περιοχή της έντονης αποκόλλησης. Συνεπώς ούτε αυτή η μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Ταυτόχρονα παρατηρείται αισθητή μείωση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με την περίπτωση όπου το hub to tip ratio είναι ίσο με 0.50. Για το λόγο αυτό δεν εξετάζεται περίπτωση με hub to tip ratio μεγαλύτερο από 0.62.



(α)



(β)



(γ)

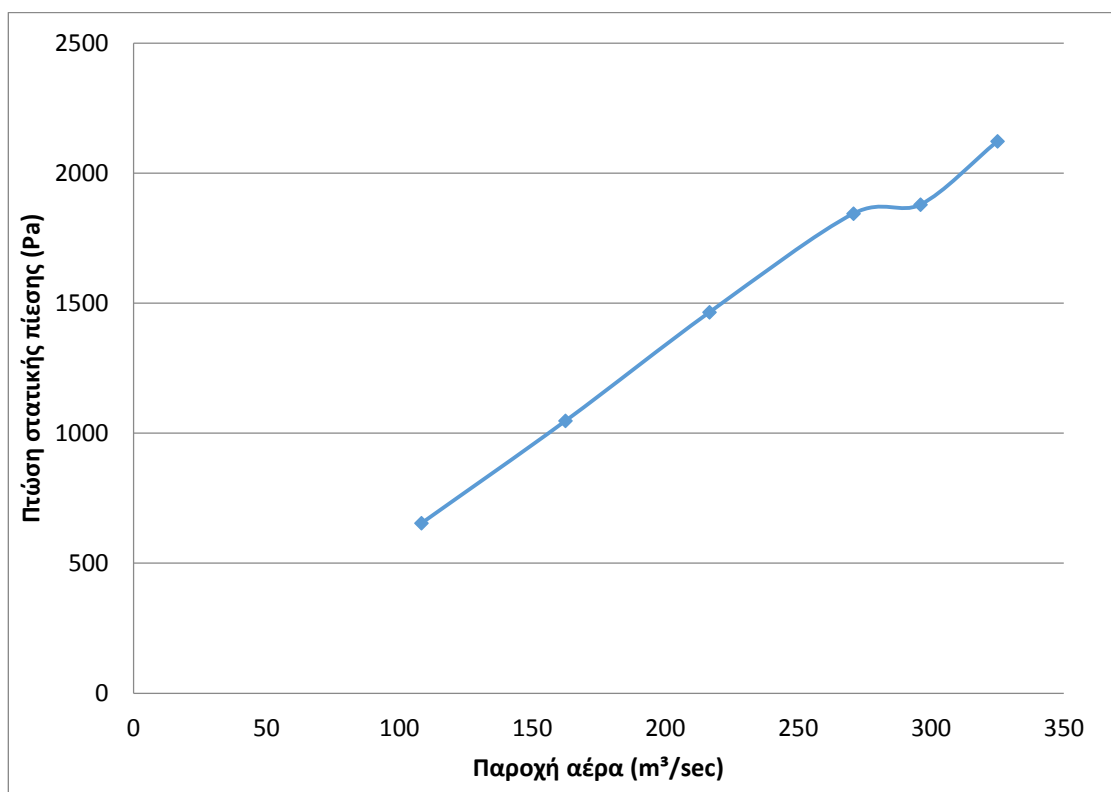
Διάγραμμα 5. 18 - Διαγράμματα λειτουργίας μηχανής Wells, $D = 5.3\text{m}$, $n=200\text{rpm}$, $h=0.5$, $s=0.62$

Τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα λειτουργίας (Διάγραμμα 5.19 (α), (β), (γ)) για την περίπτωση όπου η γεωμετρία έχει τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 5.9. Το solidity μειώνεται και αποκτά την τιμή 0.45 ενώ το hub to tip ratio είναι ίσο με 0.476. Από τα Διαγράμματα 5.20 και 5.21 είναι εμφανές ότι για $\text{solidity} = 0.45$, μπορεί να επιτευχθεί η πτώση πίεσης που προβλέπεται

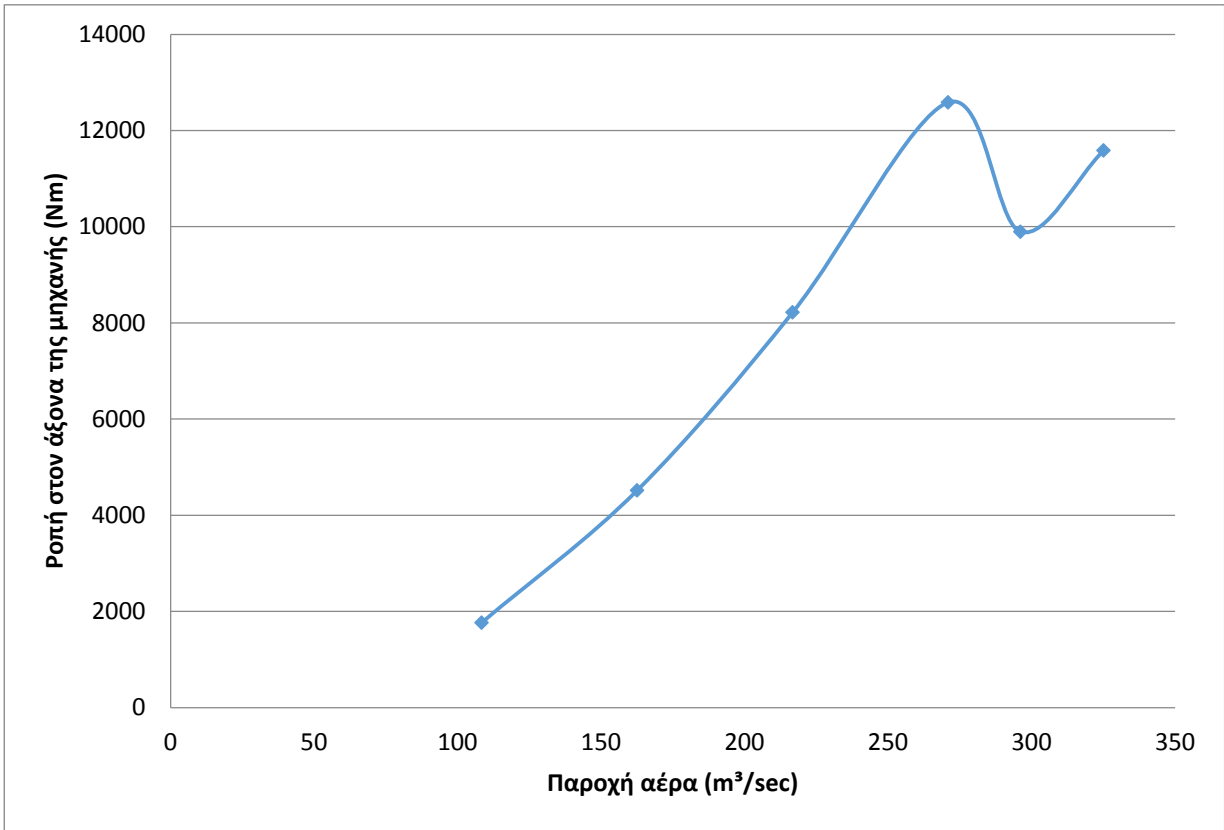
όμως η μηχανή λειτουργεί στην περιοχή αποκόλλησης. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από τα Διαγράμματα λειτουργίας (Διάγραμμα 5.19). Για παροχή αέρα ίση με $296 \text{ m}^3/\text{sec}$ η πτώση στατικής πίεσης είναι ίση με 1850 Pa όμως βρίσκεται σε περιοχή αποκόλλησης οριακού στρώματος με χαμηλό βαθμό απόδοσης.

Προφίλ πτερυγίου	NACA0020
Διάμετρος ρότορα (m)	5.3
Blade sweep ratio	0.50
Διάκενο (Tip clearance)	1%
Solidity	0.45
Hub to tip ratio	0.476
Αριθμός πτερυγίων	6
Μήκος χορδής (m)	0.98
Ταχύτητα περιστροφής	200rpm

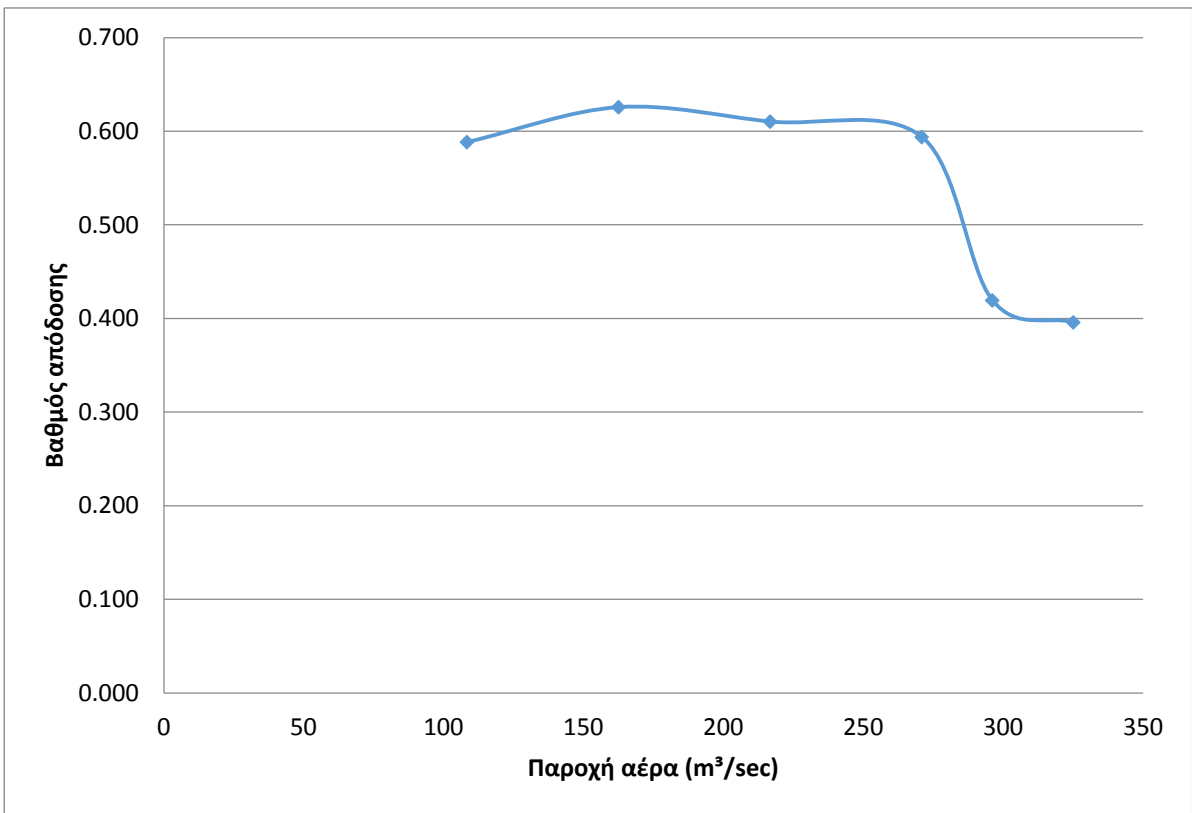
Πίνακας 1 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μηχανής Wells



(α)



(β)



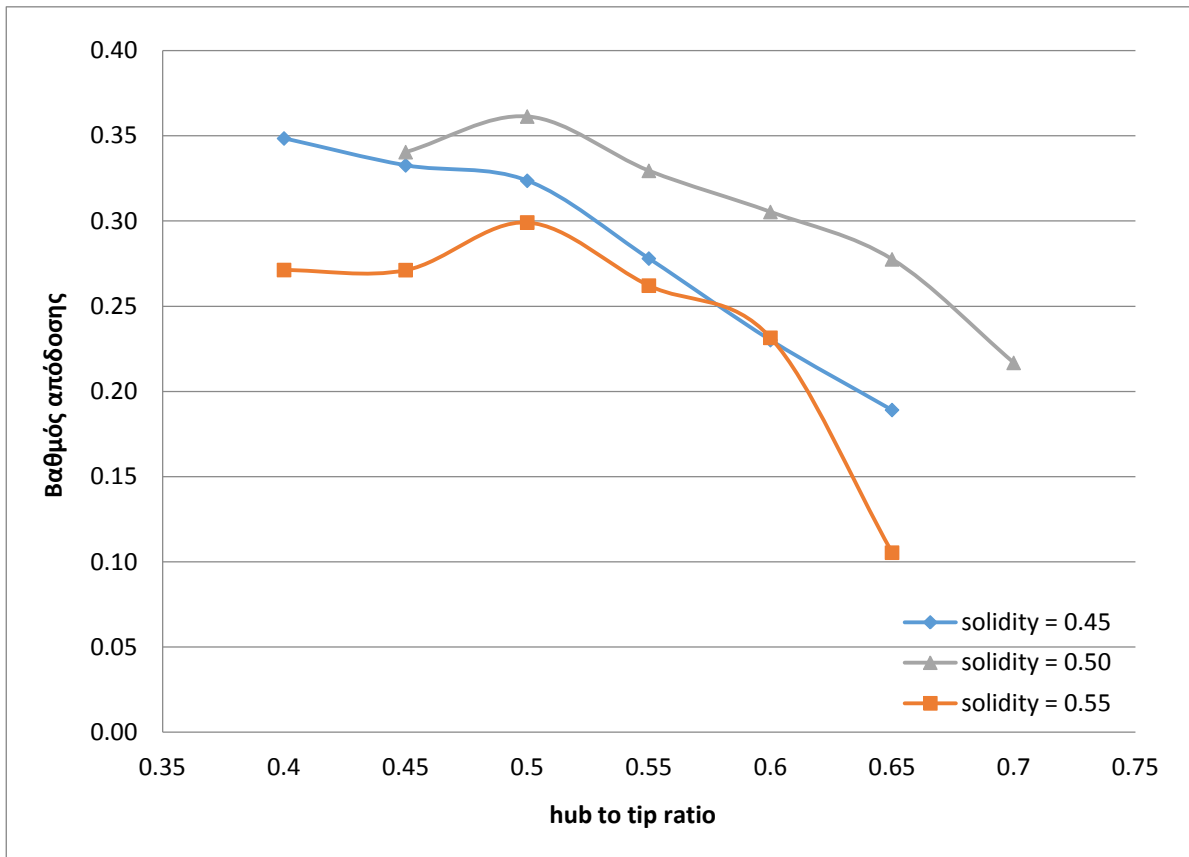
(γ)

Διάγραμμα 5. 19 - Διαγράμματα λειτουργίας μηχανής Wells, D = 5.3m, n=200rpm, h=0.476, s=0.45

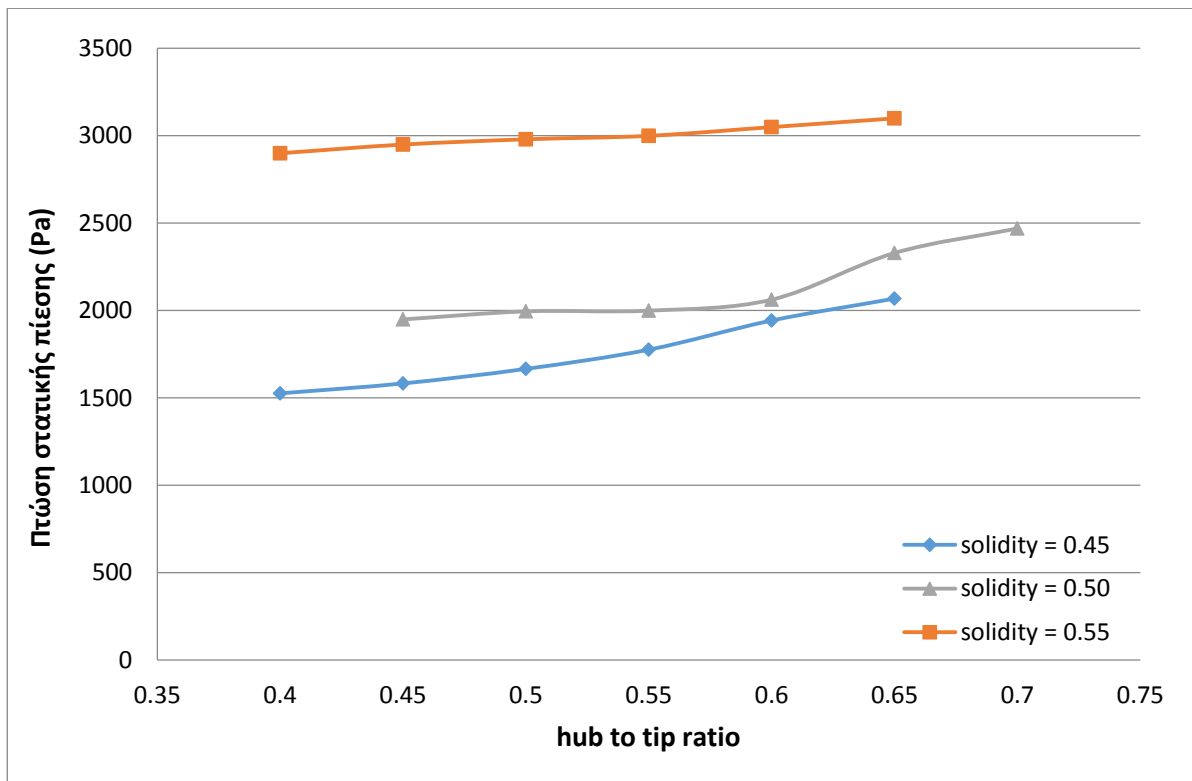
Στη συνέχεια εξετάζεται η συμπεριφορά της μηχανής για παροχή αέρα ίση με την παροχή σχεδιασμού ($Q = 296.1\text{m}^3/\text{sec}$) και ταχύτητα περιστροφής σταθερή και ίση με 200 rpm. Σχεδιάζονται μηχανές για τρεις διαφορετικές τιμές solidity (0.45, 0.50 και 0.55). Για κάθε μηχανή με σταθερό solidity μεταβάλλεται ο λόγος της διαμέτρου πλήμνης προς την εξωτερική διάμετρο του ρότορα (hub to tip ratio) παίρνοντας τιμές από 0.40 έως 0.70. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην πτώση στατικής πίεσης και στο βαθμό απόδοσης. Με άλλα λόγια η πτώση στατικής πίεσης πρέπει να έχει τιμή ίση 1810 Pa και ο βαθμός απόδοσης να είναι αρκετά ικανοποιητικός.

Στα Διαγράμματα 5.20 και 5.21 απεικονίζεται ο βαθμός απόδοσης της μηχανής και η πτώση στατικής πίεσης για τις τρεις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν. Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η παράμετρος solidity, αυξάνεται και η πτώση στατικής πίεσης. Για την γεωμετρία με solidity 0.55 και για ένα μεγάλο εύρος τιμών της παραμέτρου hub to tip ratio, η πτώση στατικής πίεσης είναι μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη πτώση στατικής πίεσης (1810Pa) για την παροχή σχεδιασμού ($296.1\text{m}^3/\text{sec}$). Για τις άλλες δύο περιπτώσεις solidity (0.45 και 0.50) για συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου hub to tip ratio μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή πτώση στατικής πίεσης. Όμως ο βαθμός απόδοσης είναι αρκετά μικρός (μικρότερος από 35%) γεγονός που αφενός υποδηλώνει την ύπαρξη έντονης αποκόλλησης οριακού στρώματος για τη συγκεκριμένη παροχή και πίεση και αφετέρου τη μη συμφέρουσα κατασκευή της μηχανής.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι για το σημείο λειτουργίας που γίνεται ο σχεδιασμός της μηχανής Wells οι γεωμετρίες που εξετάζονται δεν είναι κατάλληλες. Πιθανή εξήγηση είναι ότι η παροχή του αέρα είναι μεγάλη σε αντίθεση με την πτώση στατικής πίεσης που είναι αρκετά μικρή ($Q=296.1\text{m}^3/\text{sec}$ και $DP_{st} = 1810\text{ Pa}$).



Διάγραμμα 5. 20 - Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της παραμέτρου hub to tip ratio



Διάγραμμα 5. 21 - Πτώση στατικής πίεσης συναρτήσει της παραμέτρου hub to tip ratio

5.9. Τελικός σχεδιασμός μηχανής Wells

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, οι μηχανές Wells που εξετάστηκαν δεν είναι κατάλληλες. Το σημείο σχεδιασμού ανταποκρίνεται σε τιμές όπου υποδηλώνουν μεγάλη παροχή αέρα ενώ η αντίστοιχη πτώση στατικής πίεσης είναι μικρή ($Q_{design} = 296.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $DP_{st_design} = 1810 \text{ Pa}$).

Προτείνεται ο σχεδιασμός δύο στροβιλομηχανών Wells ώστε καθεμία να λειτουργεί στη μισή παροχή αέρα ($Q_{design_new} = 148.05 \text{ m}^3/\text{sec}$) ενώ η πτώση στατικής πίεσης διατηρεί την ίδια τιμή ($DP_{st_design} = 1810 \text{ Pa}$).

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων λειτουργίας των μηχανών Wells που μελετήθηκαν στον αρχικό σχεδιασμό προκύπτει το εξής συμπέρασμα: Η μηχανή Wells βρίσκεται σε περιοχή κανονικής λειτουργίας για παροχή αέρα που ισοδυναμεί με τιμές αδιάστατης παροχής από 0.13 έως 0.20.

Για σταθερή εξωτερική διάμετρο D_{tip} ίση με 5.3m και παροχή αέρα Q_{design_new} ίση με $148.05 \text{ m}^3/\text{sec}$, εξετάζονται διάφορες τιμές ταχύτητας περιστροφής και διαμέτρου πλήμνης ώστε η αδιάστατη παροχή να είναι έχει τιμές από $\varphi_{min} = 0.13$ έως $\varphi_{max} = 0.20$.

Ταχύτητα Περιστροφής n (rpm)	Αδιάστατη Παροχή φ	Ταχύτητα εισόδου αέρα V_x (m/sec)	Διάμετρος Πλήμνης D_{hub} (m)	Hub / Tip
200	0.13	7.2	1.4	0.26
	0.20	11.0	3.33	0.63
300	0.13	10.8	3.27	0.62
	0.20	16.6	4.10	0.77
400	0.13	14.4	3.88	0.73
	0.20	22.2	4.43	0.85
500	0.13	18.0	4.2	0.80
	0.20	27.8	4.6	0.88

Πίνακας 5. 9 - Επιλογή ταχύτητας περιστροφής και διάμετρο πλήμνης για νέα σχεδίαση Wells με μισή παροχή λειτουργίας

Από τον Πίνακα 5.9 επιλέγεται η περίπτωση όπου η μηχανή θα λειτουργεί με 300 rpm , για αδιάστατη παροχή φ ίση με 0.13 και η παράμετρος hub to tip ratio ισούται με 0.62. Από το διάγραμμα Cordier προκύπτει ότι η παράμετρος solidity ισούται με 0.55 (Διάγραμμα 5.16).

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής επιλύεται η ροή της μηχανής με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην πτώση στατικής πίεσης ανάντη και κατόντη του πτερυγίου και στον βαθμό απόδοσης. Για ταχύτητα περιστροφής 300 rpm, δεν επιτυγχάνεται ακριβώς η επιθυμητή τιμή στην πτώση στατικής πίεσης. Έτσι γίνονται δοκιμές μειώνοντας τον αριθμό των στροφών αλλά ταυτόχρονα ελέγχεται η αδιάστατη παροχή να είναι εντός των ορίων που αναφέρθηκαν. Τα χαρακτηριστικά της τελικής γεωμετρίας η οποία λειτουργεί σύμφωνα με τους περιορισμούς που αναφέρονται παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.

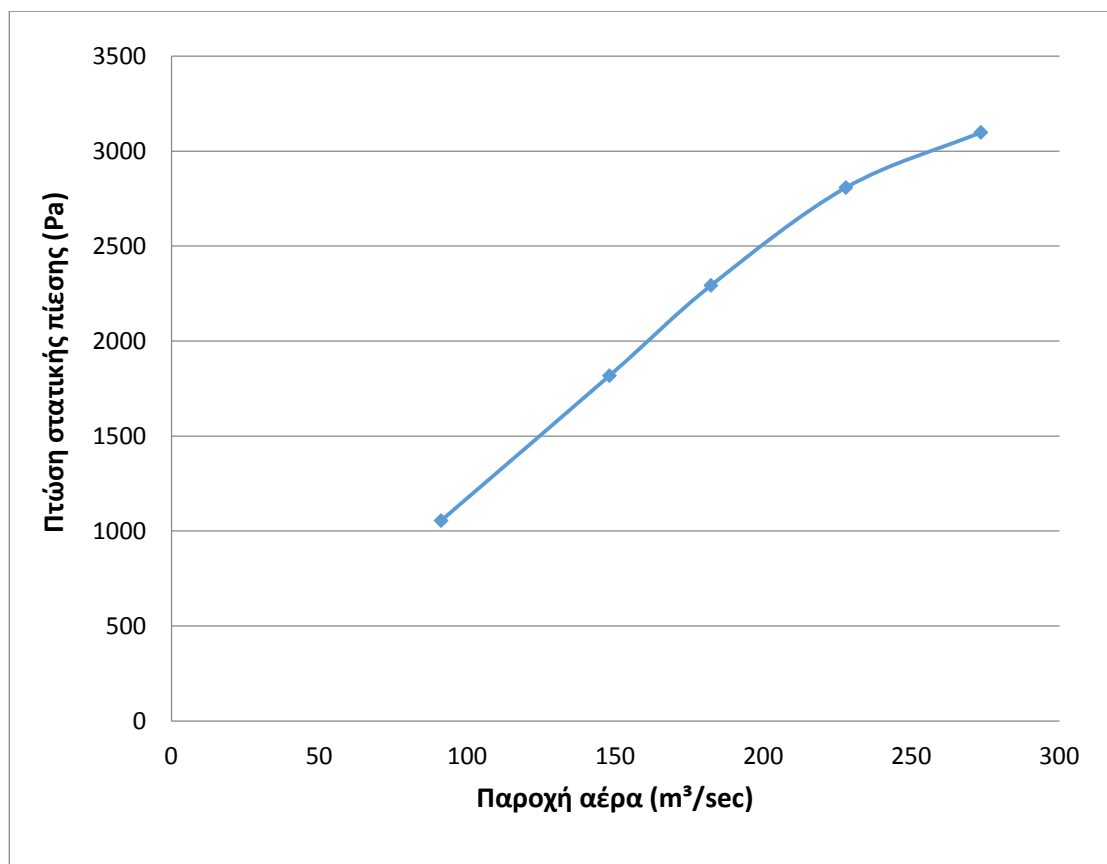
Προφίλ πτερυγίου	NACA0020
Διάμετρος ρότορα (m)	5.3
Blade sweep ratio	0.50
Διάκενο (Tip clearance)	1%
Solidity	0.55
Hub to tip ratio	0.62
Αριθμός πτερυγίων	8
Μήκος χορδής (m)	0.93
Ταχύτητα περιστροφής	240rpm

Πίνακας 5. 10 - Χαρακτηριστικά μηχανής Wells που λειτουργεί στη μισή παροχή

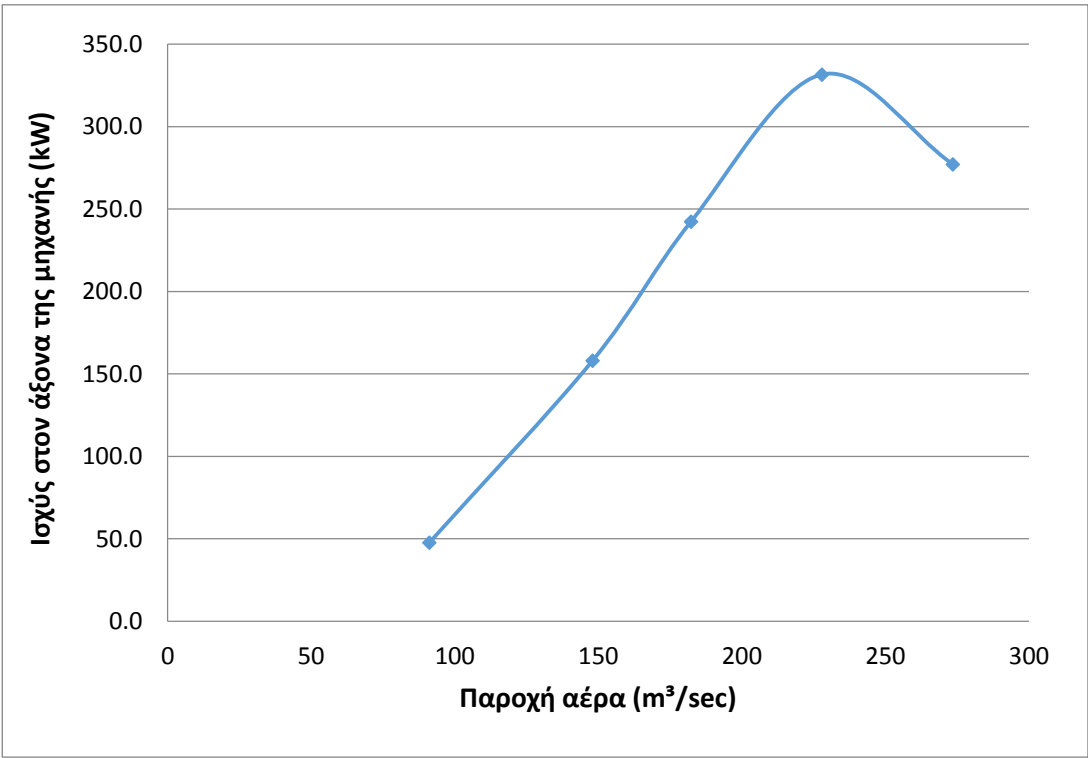
Στον Πίνακα 5.11 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής επίλυσης της ροής για διάφορες παροχές, πέρα από την παροχή σχεδιασμού. Τα Διαγράμματα 5.22 (α), (β), (γ) αποτελούν τα διαγράμματα λειτουργίας της μηχανής. Για την παροχή σχεδιασμού η μηχανή έχει βαθμό απόδοσης 60% και η ισχύς που παράγει είναι περίπου 160kW.

Αδιάστατη Παροχή φ	Παροχή αέρα Q (m^3/sec)	Ταχύτητα εισόδου αέρα V_x (m/sec)	Πτώση στατικής πίεσης (Pa)	Ισχύς στην έξοδο (kW)	Βαθμός απόδοσης
0.10	91.2	6.6	1055.46	47.7	0.50
0.16	148.05	10.8	1818.66	158.1	0.60
0.20	182.4	13.32	2293.86	242.3	0.58
0.25	228.0	16.7	2808.87	331.5	0.52
0.30	273.5	20.0	3099.33	277.1	0.33

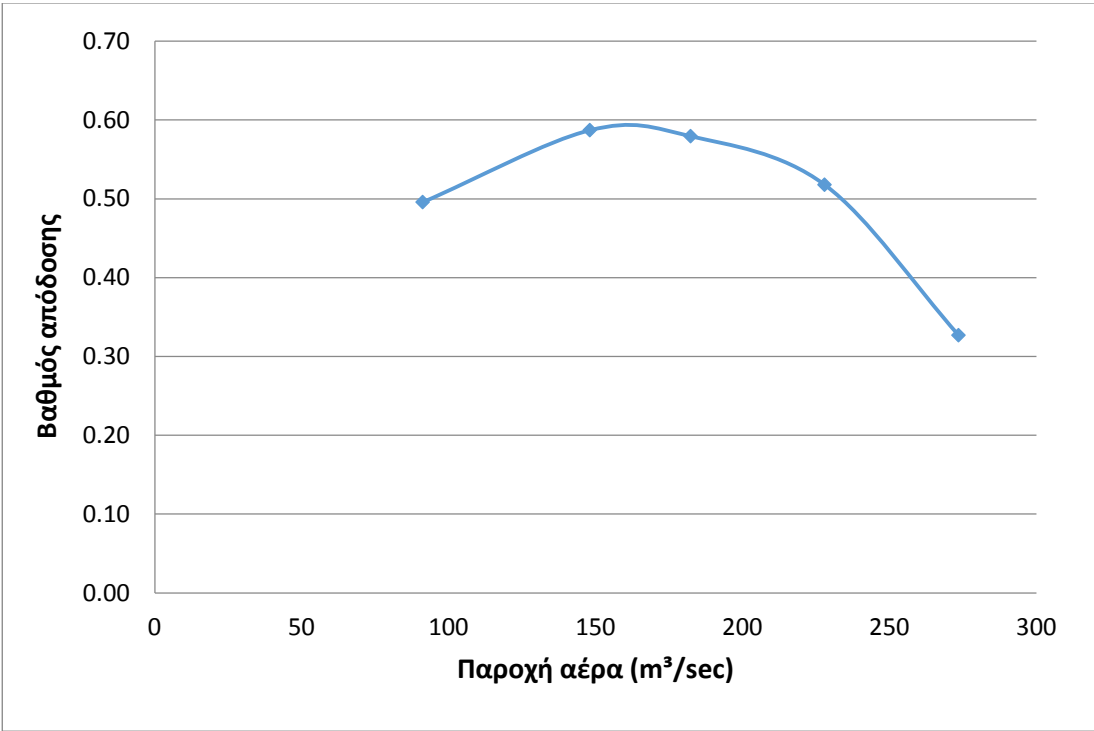
Πίνακας 5. 11 - Αποτελέσματα υπολογιστικής επίλυσης γεωμετρίας με μισή παροχή αέρα



(α)



(β)



(γ)

Διάγραμμα 5. 22 - Διαγράμματα λειτουργίας μηχανής Wells με μισή παροχή αέρα

6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ WELLS

6.1. Επίδραση γεωμετρικών παραμέτρων στην αεροδυναμική απόδοση των μηχανών Wells

Οι μηχανές Wells αποτελούν συσκευή εκμετάλλευσης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας σε χώρες με πλούσιο κυματικό δυναμικό. Σημαντικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή αεροδυναμική τους απόδοση που συνεπάγεται χαμηλή παραγόμενη ισχύ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζεται η επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων στη βελτίωση της απόδοσης των μηχανών Wells. Γενικότερα, η αεροδυναμική απόδοση της στροβιλομηχανής Wells είναι άμεσα εξαρτημένη από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτή. Οι δυνάμεις αυτές αποτελούν συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων όπως της παροχής του ρευστού, του solidity, του hub to tip ratio, της διαμέτρου της μηχανής, της γεωμετρίας των πτερυγίων αλλά και πολλών ακόμα.

Πρακτικά είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η βέλτιστη γεωμετρία μίας μηχανής Wells λόγω της δυσκολίας να συσχετιστούν μεταξύ τους σημαντικοί γεωμετρικοί παράμετροι. Ενδεικτικά αναφέρονται το solidity, ο λόγος της ακτίνας της πλήμνης προς την ακτίνα του πτερυγίου (hub to tip ratio), η τοποθέτηση του πτερυγίου στον άξονα (swept ratio) και ο λόγος της χορδής προς το μήκος του εκπετάσματος του πτερυγίου (aspect ratio).

Από τις παραπάνω γεωμετρικές παραμέτρους που αναφέρθηκαν, εξετάζονται το solidity και ο λόγος της ακτίνας της πλήμνης προς την ακτίνα του πτερυγίου (hub to tip ratio). Κατασκευάστηκαν διαφορετικές γεωμετρίες με τη χρήση του CAD λογισμικού Solidworks αλλάζοντας κάθε φορά τις τιμές των παραμέτρων αυτών. Με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού Fluent που αποτελεί εργαλείο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, επιλύεται η ροή σε κάθε γεωμετρία.

Υπενθυμίζεται η φυσική σημασία των παραμέτρων που εξετάζονται προκειμένου η ανάλυση που ακολουθεί να είναι κατανοητή στον αναγνώστη:

Η γεωμετρική παράμετρος solidity αποτελεί ένα μέτρο που περιγράφει κατά πόσο τα πτερύγια της μηχανής αποτελούν φραγμό στη ροή του αέρα. Επίσης, είναι ένα μέτρο της αμοιβαίας αλληλεπίδρασης μεταξύ των πτερυγίων της μηχανής και αποτελεί μία σημαντική μεταβλητή στον σχεδιασμό. Ιδανικά οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι από 0 έως 1, όμως στις μηχανές Wells οι τιμές του solidity είναι κοντά στο 0.50. Χαμηλές τιμές για το solidity αποφεύγονται αφού η μηχανή δυσκολεύεται να εκκινήσει (Διάγραμμα 2). Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της εν λόγω παραμέτρου είναι:

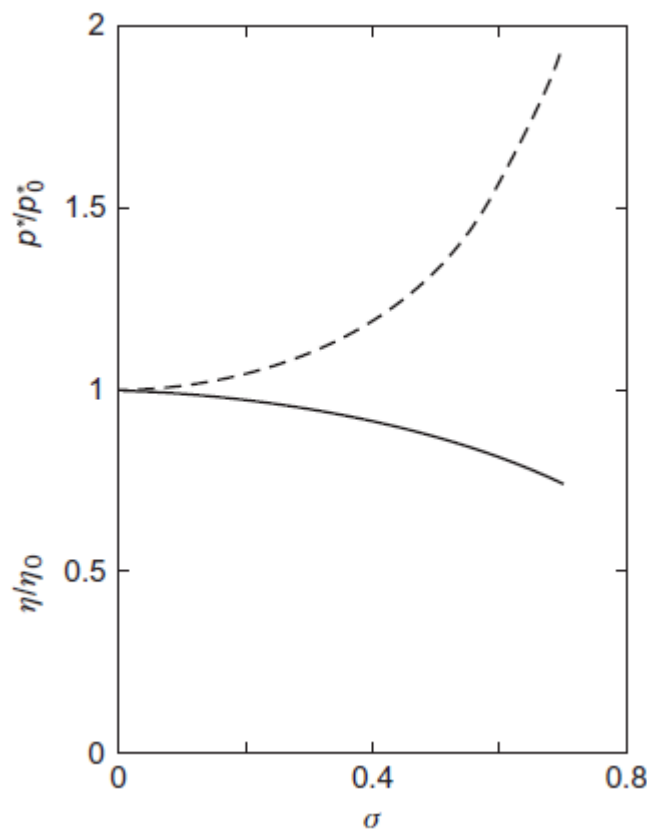
$$\sigma = \frac{Nc}{2\pi R_{mid}}$$

όπου N = αριθμός πτερυγίων μηχανής

c = μήκος χορδής πτερυγίου [m]

R_{mid} = η μέση ακτίνα της μηχανής [m]

Με την αύξηση του solidity αυξάνεται η πτώση στατικής πίεσης καθώς η ροή "βλέπει" μεγαλύτερη αντίσταση. Το Διάγραμμα 6.1 δείχνει πώς μεταβάλλεται η τιμή της μέγιστης απόδοσης και της πτώσης πίεσης συναρτήσει της τιμής του solidity [19].



Διάγραμμα 6.1 - Μεταβολή της μέγιστης απόδοσης και της αδιάστατης πτώσης πίεσης (σε σύγκριση με τιμές για μία απομονωμένη αεροτομή) σε σχέση με το solidity

[Raghunathan et al., 1995]

Ο Raghunathan δίνει μία συσχέτιση μεταξύ της πτώσης πίεσης και του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του solidity:

$$p^*/p_0^* = 1 - \sigma^2 \quad \text{και} \quad \eta/\eta_0 = \frac{1}{2} (1 - \sigma^2)$$

όπου ο δείκτης 0 αναφέρεται στην τιμή μίας διδιάστατης αεροτομής ($\sigma = 0$). Μία συσχέτιση μεταξύ της πτώσης πίεσης και του solidity (για $\sigma > 0$) εκφράζεται επίσης ως:

$$p^* = A\sigma^{1.6}$$

όπου το A είναι μία σταθερά.

Σύμφωνα με τον Raghunathan [17], οι μικρές τιμές της παραμέτρου solidity επηρεάζουν ελάχιστα τον βαθμό απόδοσης της μηχανής. Αξιοσημείωτη μείωση στην απόδοση παρατηρείται για solidity με τιμή μεγαλύτερη από 0.50 (Διάγραμμα 6.1). Η μείωση οφείλεται στην απώλεια κινητικής ενέργειας που παρατηρείται στην έξοδο της μηχανής λόγω των έντονων στροβιλισμών. Επίσης για μεγαλύτερο solidity, η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων είναι μικρότερη συνεπώς η μεταξύ τους αλληλεπίδραση είναι εντονότερη κυρίως στην περιοχή κοντά στην πλήμνη. Η

αλληλεπίδραση μπορεί να καθυστερήσει την αποκόλληση του οριακού στρώματος. Τέλος για μεγαλύτερα Solidity η αξονική ταχύτητα εισόδου του αέρα στη μηχανή μειώνεται με αποτέλεσμα η γωνία πρόσπτωσης του αέρα στη μηχανή είναι μικρότερη.

Η γεωμετρική παράμετρος hub to tip ratio (h), είναι ο λόγος της ακτίνας της πλήμνης της μηχανής προς την ακτίνα του ρότορα της μηχανής. Ο μαθηματικός τύπος υπολογισμού είναι:

$$h = \frac{R_{hub}}{R_{tip}}$$

όπου R_{hub} = ακτίνα πλήμνης

R_{tip} = ακτίνα ακροπερυγίου

Για μηχανές με σταθερό solidity και σταθερή παροχή αέρα αποτελεί σημαντικό παράγοντα επειδή καθορίζει την αξονική τιμή της ταχύτητας εισόδου του αέρα στη μηχανή που προκύπτει από τη σχέση:

$$V_x = \frac{Q}{\pi D_t^2 / 4 (1 - h^2)}$$

όπου V_x = αξονική ταχύτητα εισόδου αέρα στη μηχανή [m/sec]

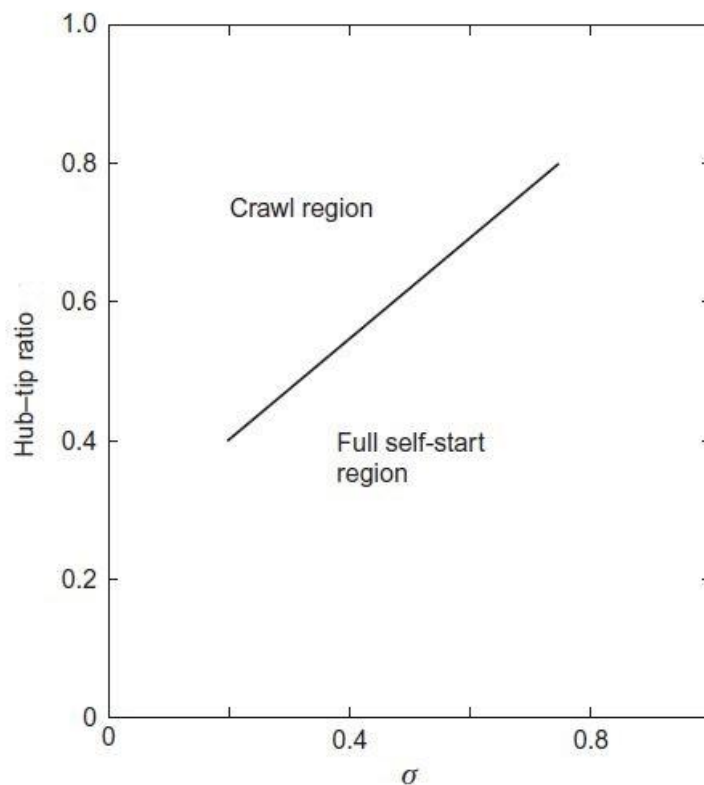
Q = παροχή αέρα [m³/sec]

D_t = διάμετρος ρότορα

Αποτελεί σημαντική παράμετρο καθώς για μία σταθερή παροχή αέρα επηρεάζει την εμφάνιση του φαινόμενου της αποκόλλησης της ροής (stall conditions). Επίσης επηρεάζει τις απώλειες λόγω της ροής του αέρα (tip leakage flow) μέσα από το διάκενο (tip clearance). Τέλος συνεισφέρει στο να αποκτήσει η μηχανή την προβλεπόμενη ταχύτητα λειτουργίας (Διάγραμμα 2).

Για το σχεδιασμό μίας μηχανής Wells, προτείνεται η παράμετρος Hub to tip ratio να έχει τιμή μικρότερη από 0.60, σύμφωνα με Raghunathan [17].

Ο συνδυασμός των παραμέτρων solidity και hub to tip ratio είναι σημαντικός για την εκκίνηση της μηχανής Wells. Όταν μία μηχανή Wells ξεκινάει την περιστροφή της ενώ βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, η εισερχόμενη ροή σχηματίζει γωνία 90° με τα πτερύγια του ρότορα. Ανάλογα με τη γεωμετρία της μηχανής, υπάρχει πιθανότητα σοβαρής αποκόλλησης με αποτέλεσμα η εφαπτομενική δύναμη στην οποία οφείλεται η περιστροφή της μηχανής να είναι αρκετά μικρή και η επιτάχυνση αμελητέα. Στην πραγματικότητα, σε αυτή την περίπτωση η μηχανή ίσως επιταχύνει μόνο μέχρι μία ταχύτητα πολύ μικρότερη από την ταχύτητα σχεδιασμού και το φαινόμενο αυτό καλείται στην αγγλική ορολογία crawling. Το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί είτε επιλέγοντας ένα κατάλληλο συνδυασμό hub to tip ratio και solidity στη φάση του σχεδιασμού είτε χρησιμοποιώντας άλλα μέσα όπως ενσωματώνοντας μίζα εκκίνησης (starter drive). Στο Διάγραμμα 6.2 παρουσιάζεται ο συνδυασμός των παραμέτρων hub-tip ratio και solidity ο οποίος επιτρέπει την εκκίνηση της μηχανής Wells χωρίς την ύπαρξη υποβοήθησης (self-starting).



Διάγραμμα 6.2 - Συνδυασμός παραμέτρων για την αυτόματη εκκίνηση της μηχανής Wells

(Raghunathan et al. [17])

Πρακτικό ενδιαφέρον της παρούσας μελέτης είναι το πώς οι γεωμετρικοί παράμετροι solidity και hub to tip ratio επιδρούν στην πτώση πίεσης που παρατηρείται στους στροβίλους Wells, στην αποδιδόμενη ροπή στον άξονα και τελικά στον βαθμό απόδοσης. Αξιοσημείωτο ενδιαφέρον αποτελεί το πώς οι παράμετροι αυτοί επιδρούν στην εμφάνιση και στην καθυστέρηση του φαινομένου της αποκόλλησης (stall), αυξάνοντας έτσι το εύρος λειτουργίας της στροβιλομηχανής Wells.

6.2. Υπολογιστική επίλυση

Για την επίλυση της ροής χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο Fluent και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων το πακέτο της Ansys: CFD Post. Για το σχεδιασμό του υπολογιστικού χωρίου χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Solidworks ενώ για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος το ICEM.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος που διακριτοποιεί τη γεωμετρία για την σωστότερη επίλυση. Επιλέχθηκε η κατασκευή δομημένου εξαεδρικού πλέγματος (hexa structured mesh) τύπου H με δημιουργία πλέγματος τύπου O (O-grid) γύρω από το πτερύγιο για τη λεπτομερή επίλυση της περιοχής καθώς το πτερύγιο αποτελεί περιοχή ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Το υπολογιστικό χωρίο διακριτοποιήθηκε περίπου σε 550000 κελιά τα οποία επαρκούν για μία σωστή επίλυση όπως έδειξε η μελέτη ανεξαρτησία πλέγματος - mesh independence study.

Ο κώδικας επίλυσης της ροής του πακέτου ANSYS FLUENT επιλύει τις διακριτοποιημένες τρισδιάστατες εξισώσεις Reynolds Average Navier - Stokes (RANS) για μόνιμη και ασυμπίεστη

ροή. Για την ολοκληρωμένη επίλυση χρησιμοποιείται το k-ε realizable μοντέλο τύρβης. Η λεπτομερής ρύθμιση των παραμέτρων περιγράφεται εκτενέστερα σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Για την εξέταση των παραμέτρων solidity και hub to tip ratio, έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του ρότορα της μηχανής Wells διατηρώντας σταθερά κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα μεγέθη που παραμένουν σταθερά καθώς και οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων που μεταβάλλονται σε κάθε επίλυση.

Προφίλ πτερυγίου	NACA0020
Διάμετρος ρότορα	5.3m
Blade sweep ratio	0.50
Διάκενο (Tip clearance)	0%
Solidity	0.465, 0.50, 0.55, 0.62
Hub to tip ratio	0.467, 0.50, 0.55, 0.60,0.65
Αριθμός πτερυγίων	6 ή 8
Ταχύτητα περιστροφής	200rpm

Πίνακας 6. 1 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής Wells

Ο σχεδιασμός της μηχανής γίνεται για παροχή αέρα ίση με $296.1 \text{ m}^3/\text{sec}$, όμως εξετάζεται η συμπεριφορά κάθε γεωμετρίας και σε άλλες παροχές διότι όπως είναι λογικό οι συνθήκες λειτουργίας στο θαλάσσιο περιβάλλον μεταβάλλονται συνεχώς. Η μεταβολή της παροχής εκφράζεται με τη μορφή του αδιάστατου συντελεστή παροχής ϕ . Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι ο αδιάστατος συντελεστής παροχής ορίζεται ως ο λόγος της αξονικής ταχύτητας εισόδου του αέρα στη μηχανή προς την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα μετρούμενη στο άκρο του πτερυγίου.

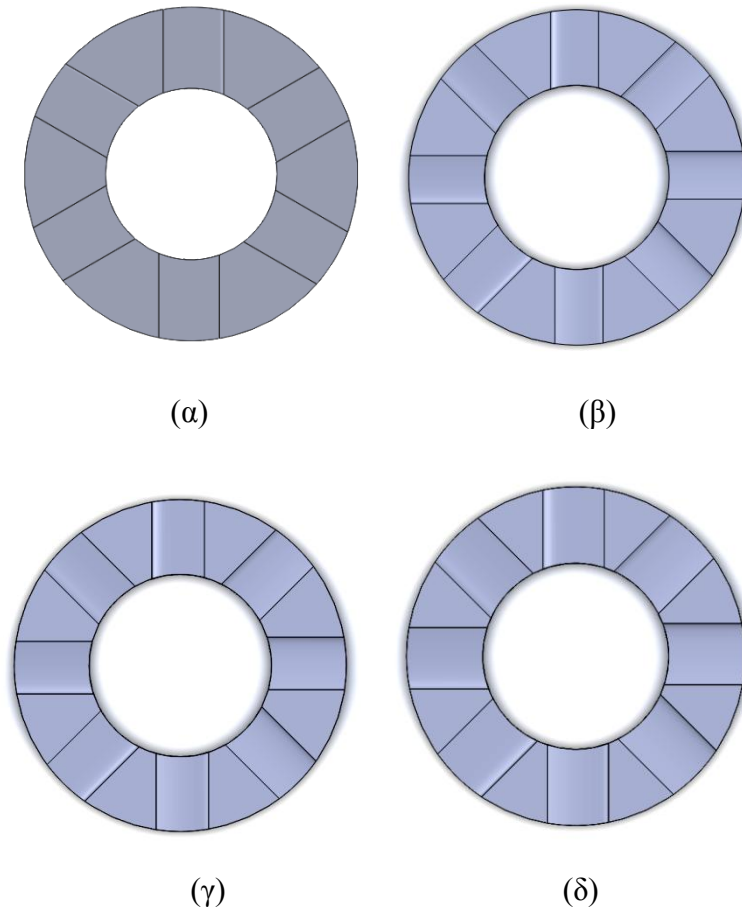
Έπειτα από βιβλιογραφική επισκόπηση προκύπτει ότι το εύρος του αδιάστατου συντελεστή παροχής ϕ που ενδιαφέρει έχει τιμές από 0.10 έως 0.30. Συνήθως σε αυτό το εύρος τιμών αδιάστατου συντελεστή παροχής εμφανίζεται η μέγιστη ροπή στη μηχανή καθώς επίσης και το σημείο στο οποίο γίνεται η έναρξη της αποκόλλησης (stall) της ροής γύρω από το πτερύγιο.

6.3. Επίδραση του solidity

Η γεωμετρική παράμετρος που υποδηλώνει τη "στερεότητα" του ρότορα της μηχανής είναι γνωστή στην ξένη βιβλιογραφία ως solidity. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση της παραμέτρου solidity στη λειτουργία του στροβίλου Wells. Για τη μελέτη του solidity, τα

γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής διατηρούνται σταθερά καθώς και η παράμετρος hub to tip ratio. Η τιμή της παραμέτρου solidity μεταβάλλεται παίρνοντας τις τιμές 0.465, 0.50, 0.55, 0.62. Όσον αφορά την παράμετρο hub to tip ratio εξετάζεται η περίπτωση που η τιμή της είναι ίση με 0.55.

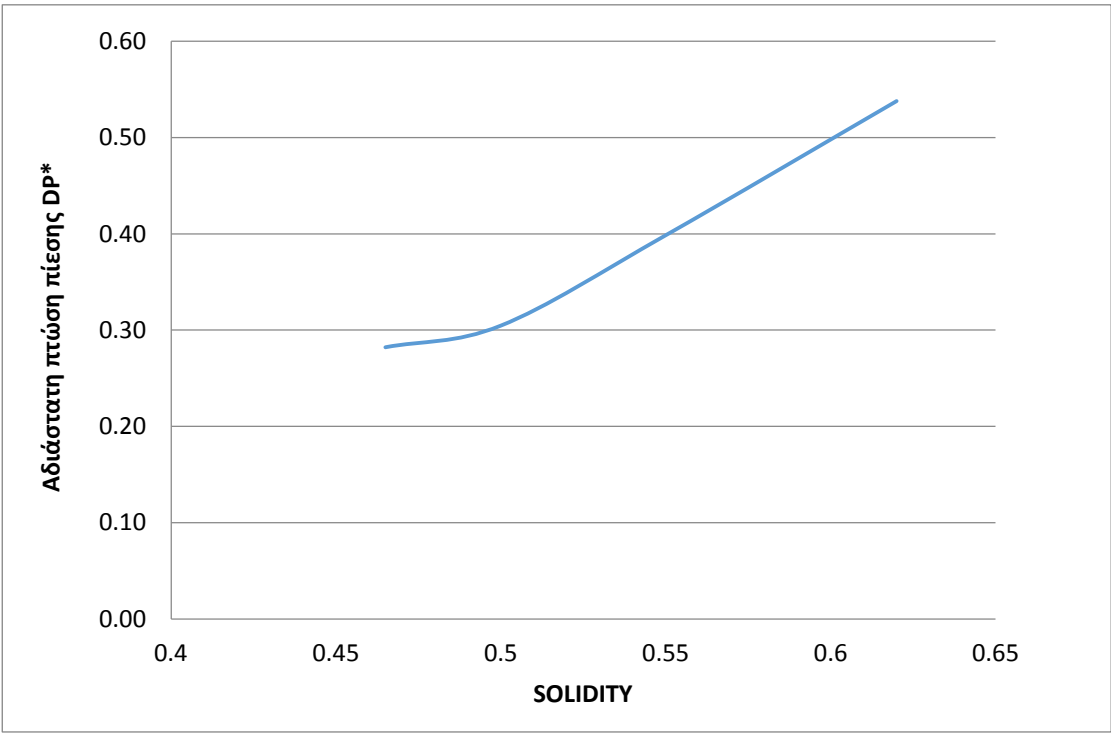
Στον Πίνακα 6.2 συγκεντρώνονται οι περιπτώσεις γεωμετρίας που μελετήθηκαν προκειμένου να προκύψουν τα Διαγράμματα 3 (α), (β), (γ). Εξετάζονται δύο διαφορετικές παροχές που ισοδυναμούν $\varphi = 0.17$ και 0.32 ενώ η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής ίση με 200rpm.



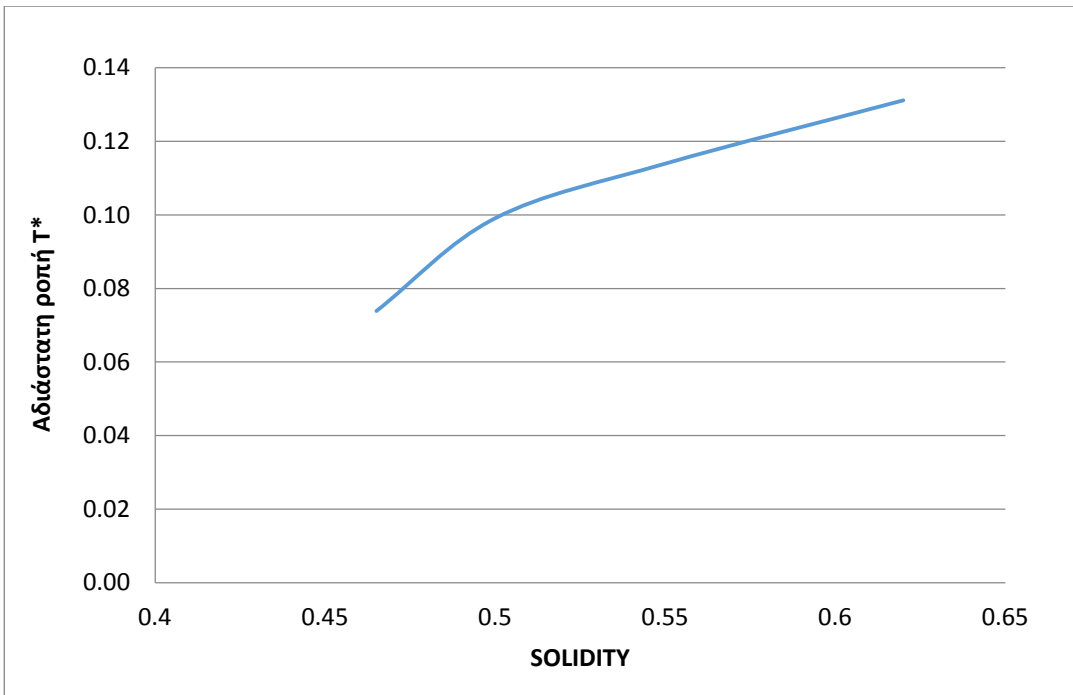
Εικόνα 6. 1 - Τομές με hub/tip = 0.55 και solidity (α) 0.465 (β) 0.50 (γ) 0.55 (δ) 0.62

Hub to Tip ratio	Solidity	Αριθμός πτερυγίων	Μήκος χορδής (m)
0.55	0.465	6	1.04
	0.50	8	0.84
	0.55	8	0.92
	0.62	8	1.04

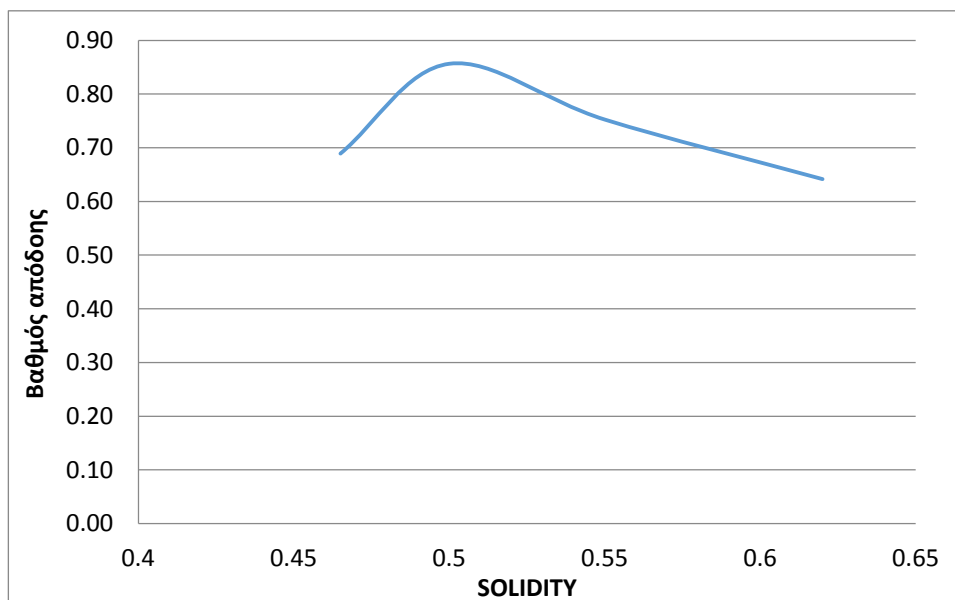
Πίνακας 6. 2 - Τιμές γεωμετρικών παραμέτρων



(α) Αδιάστατη πίεση



(β) Αδιάστατη ροπή



(γ) Βαθμός απόδοσης

Διάγραμμα 6. 3 - Μεταβολή των αδιάστατων μεγεθών συναρτήσει του solidity για δύο περιπτώσεις
hub to tip ratio

Τα Διαγράμματα 6.3 (α), (β), (γ) απεικονίζουν την αδιάστατη πτώση πίεσης, την αδιάστατη ροπή και τον βαθμό απόδοσης σε συνάρτηση με την παράμετρο solidity. Οι τιμές που αποδίδονται στα διαγράμματα αφορούν μία συγκεκριμένη παροχή και σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της παραμέτρου solidity επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πτώση πίεσης στη μηχανή Wells (Διάγραμμα 6.3(α)). Όπως είναι λογικό, καθώς αυξάνεται ο "φραγμός" στη ροή, που ισοδυναμεί με αύξηση της τιμής του solidity, η δυσκολία που αντιμετωπίζει το ρευστό κατά τη ροή του αυξάνεται.

Σύμφωνα με τη διδιάστατη θεωρία αλληλουχίας αεροτομών ισχύει ότι με την αύξηση του solidity ο συντελεστής άνωσης της αεροτομής αυξάνεται καθώς η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων είναι μικρότερη. Συγκεκριμένα ισχύει ότι:

$$c_L = k \cdot c_{L0}$$

όπου c_L είναι ο συντελεστής άνωσης αεροτομής που δέχεται την επίδραση από γειτονική αεροτομή.

k είναι συντελεστής που ορίζεται εξαρτάται από το μήκος της χορδής και την απόσταση μεταξύ των αεροτομών.

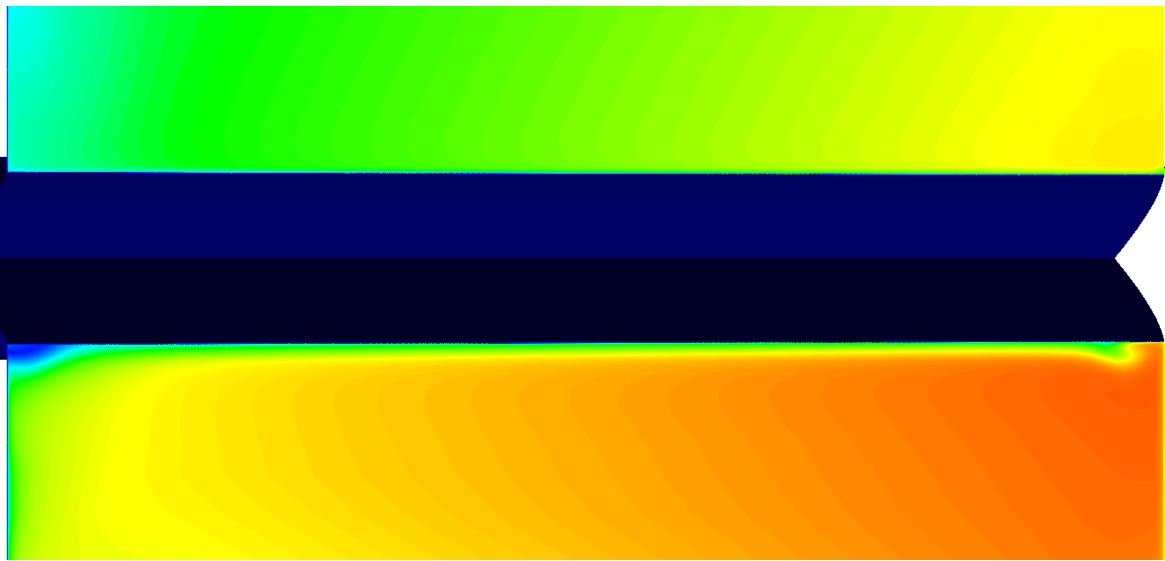
c_{L0} είναι ο συντελεστής άνωσης αεροτομής που εξετάζεται μόνη της.

Αποτέλεσμα της αυξημένης άνωσης που δέχεται το πτερύγιο καθώς αυξάνει το solidity, αναπτύσσεται μεγαλύτερη ροπή όπως επιβεβαιώνεται και στο Διάγραμμα 3(β).

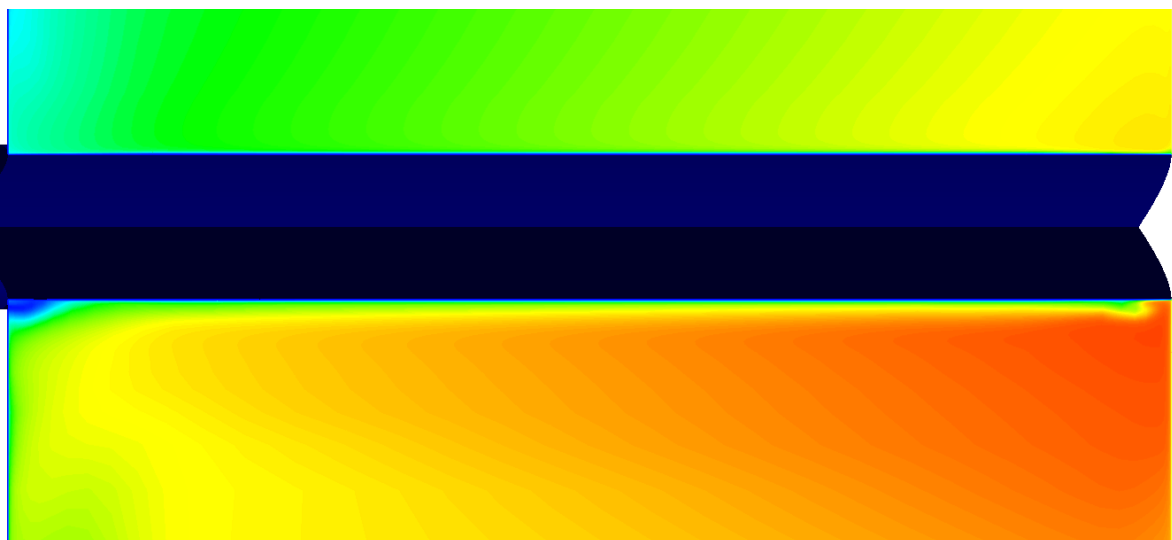
Τέλος, όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης παρατηρείται ότι (Διάγραμμα 3(γ)) μέχρι και για solidity 0.50 υπάρχει αύξηση στον βαθμό απόδοσης. Για τιμές μεγαλύτερες από 0.5 σημειώνεται μείωση λόγω απωλειών που οφείλονται στις υψηλές ταχύτητες με τις οποίες εγκαταλείπει ο αέρας τη μηχανή και η δημιουργία δινών όπως θα παρουσιαστεί στις εικόνες που ακολουθούν.

Επιβεβαιώνεται έτσι το συμπέρασμα που προκύπτει και από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα ο Raghunathan προτείνει το σχεδιασμό μηχανής με solidity με τιμή που δεν υπερβαίνει το 0.5.

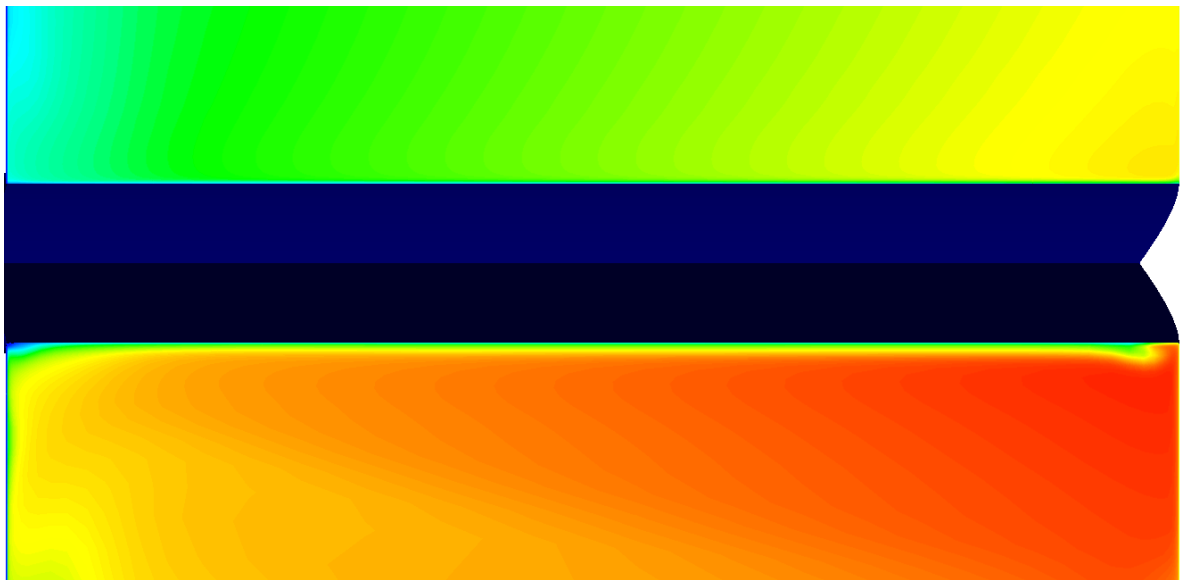
Στις Εικόνες 6.2 απεικονίζεται η κατανομή του μεγέθους της ταχύτητας του ρευστού για τις περιπτώσεις γεωμετρίας με διαφορετικό Solidity. Είναι εμφανές ότι η αποκόλληση ξεκινάει κοντά στο hub και εμφανίζεται σε μηχανές με μικρό solidity. Καθώς το solidity αποκτά μεγαλύτερη τιμή η αποκόλληση εξαφανίζεται καθώς η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων είναι μικρή με αποτέλεσμα η μεταξύ τους αλληλεπίδραση είναι εντονότερη γεγονός που αποτρέπει την αποκόλληση. Ταυτόχρονα, είναι εμφανές ότι κατά την κατόντη του πτερυγίου ο αέρας αποκτά μεγαλύτερη ταχύτητα όταν η τιμή του solidity αυξάνεται. Η αύξηση στον φραγμό της ροής επιφέρει αύξηση στην ταχύτητα του ρευστού.



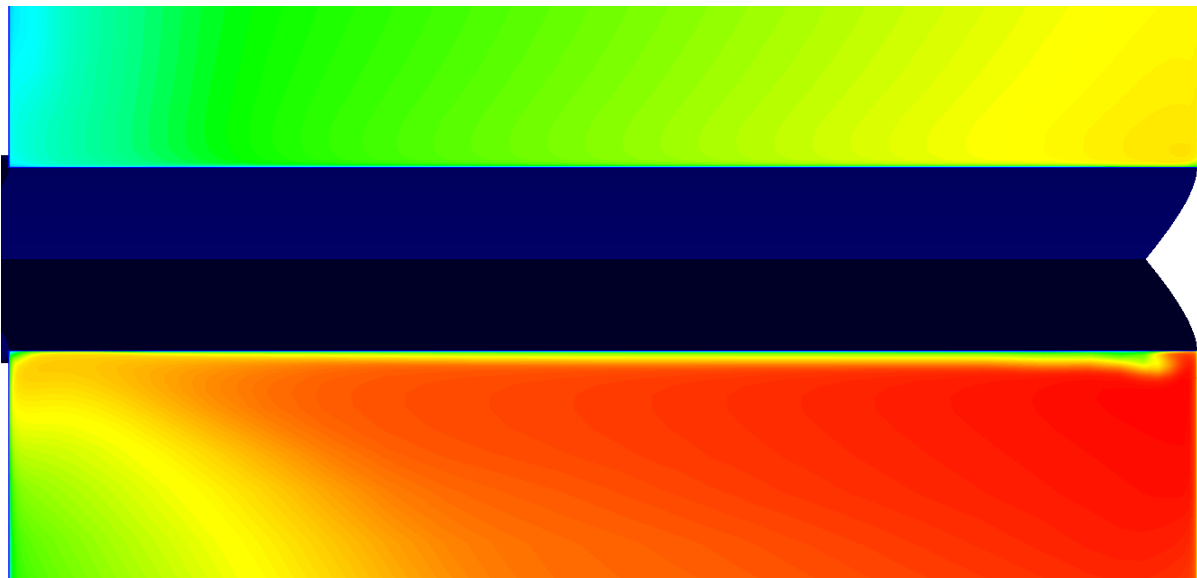
(α)



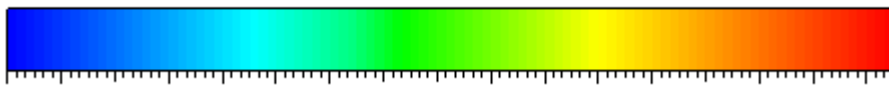
(β)



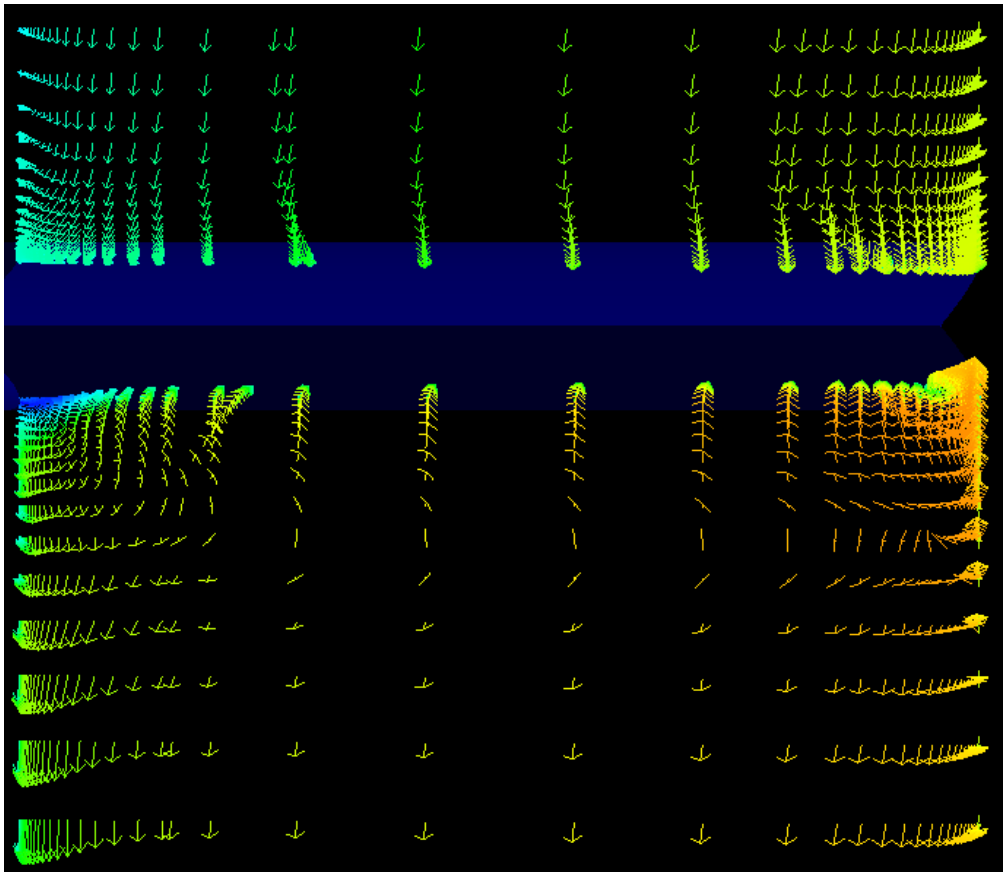
(γ)



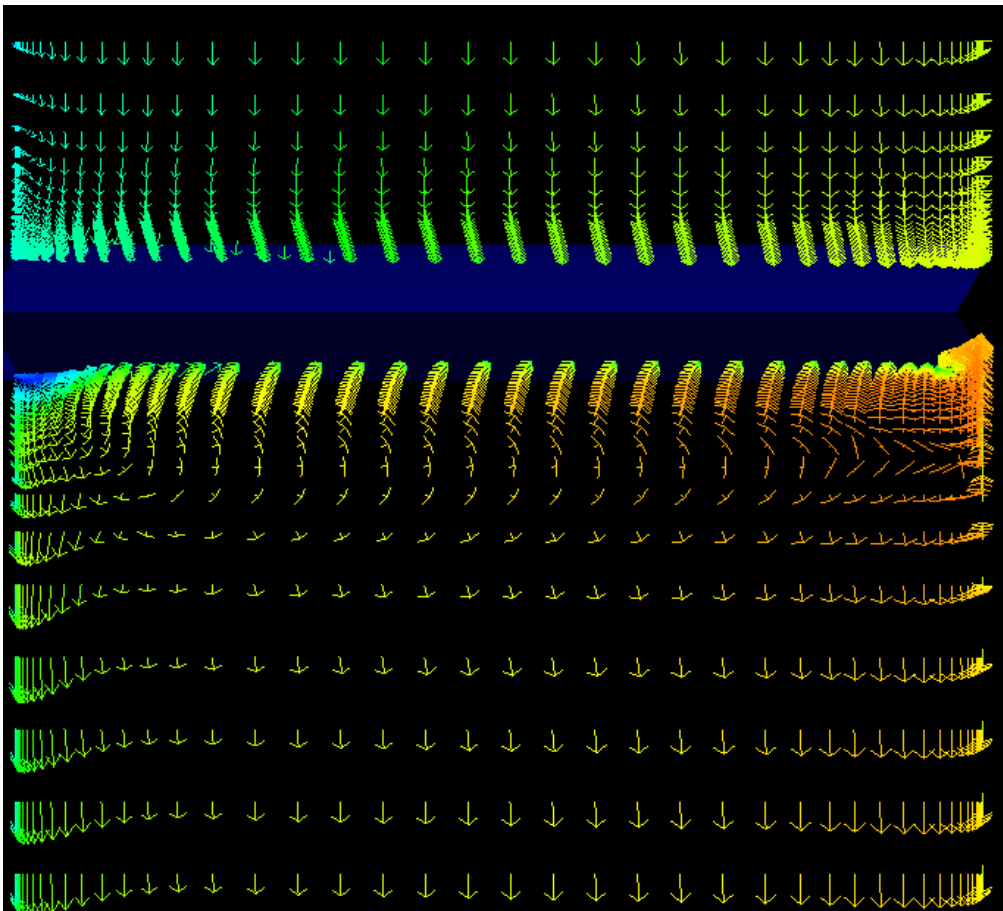
(δ)



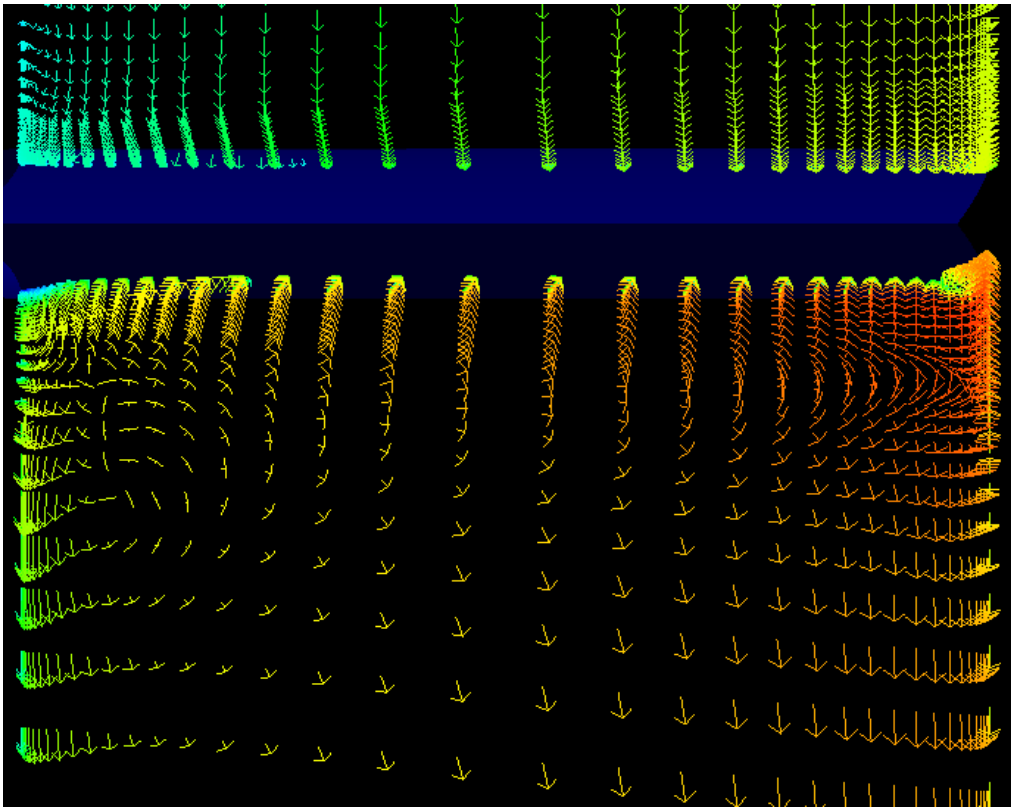
Εικόνα 6. 2 - Κατανομή μεγέθους ταχύτητας σε τομή κάθετη στη χορδή του πτερυγίου για solidity (α) 0.465, (β) 0.50, (γ) 0.55, (δ) 0.62



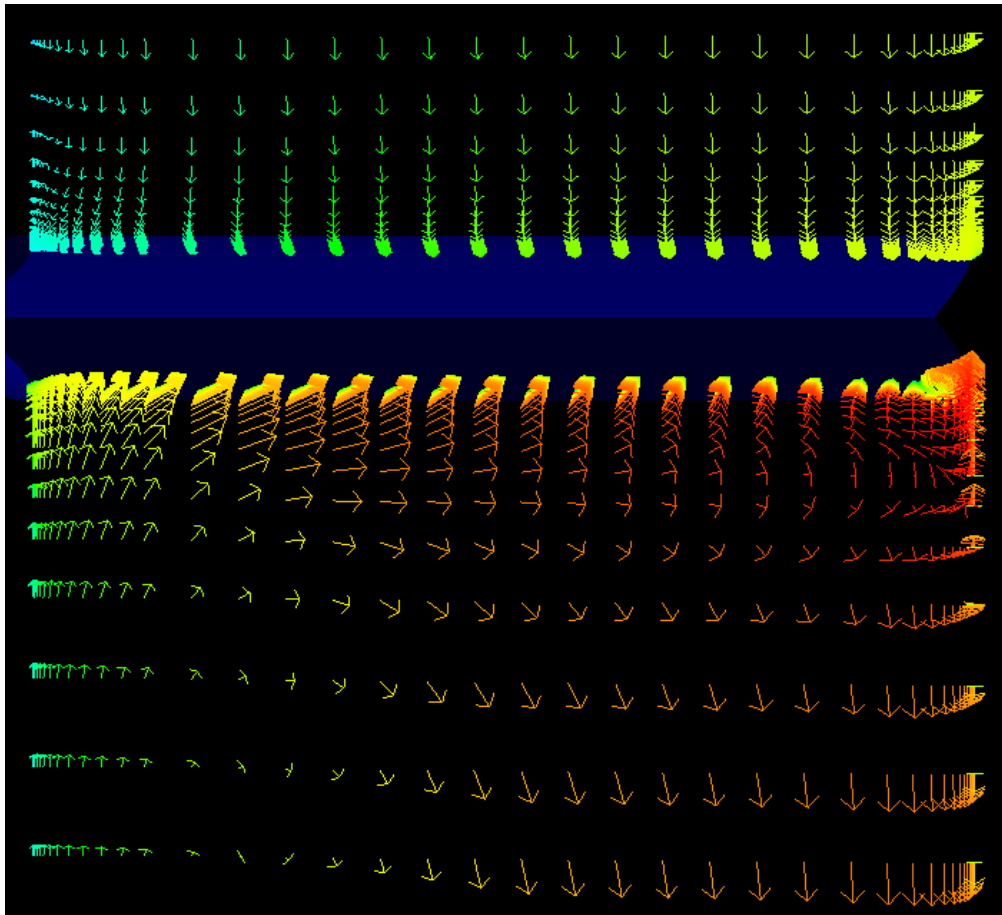
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 6. 3 - Διανύσματα ταχύτητας σε τομή κάθετα στη χορδή για solidity (α) 0.465, (β) 0.50, (γ) 0.55, (δ) 0.62

Στις Εικόνες 6.3 απεικονίζονται τα διανύσματα ταχύτητας του ρευστού για τις 4 περιπτώσεις μηχανής Wells με διαφορετικά solidity. Για solidity 0.465 και 0.50 όπως φαίνεται και στις Εικόνες 6.3 (α) και (β) τα διανύσματα της ταχύτητα του αέρα κατά την έξοδο έχουν φορά προς τα κάτω. Αντιθέτως για solidity 0.55 και 0.62 είναι εμφανή η δημιουργία δίνης που ξεκινάει από το hub και εξαπλώνεται προς το shroud (Εικόνες 6.3 (γ) και (δ)). Η δημιουργία δίνης σε συνδυασμό με την υψηλή κινητική ενέργεια του αέρα καθώς εγκαταλείπει το πτερύγιο στην περιοχή του tip συμβάλλουν στην αύξηση των απωλειών.

6.4. Επίδραση του hub to tip ratio

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η επίδραση που έχει ο λόγος της διαμέτρου της πλήμνης προς την εξωτερική διάμετρο του ρότορα (*hub to tip ratio*) στην λειτουργία και στην απόδοση της μηχανής Wells. Μελετώνται δύο διαφορετικά σενάρια, όπου στο κάθε σενάριο μεταβάλλεται η τιμή της παραμέτρου *hub to tip ratio* διατηρώντας όμως την γεωμετρική παράμετρο *solidity* σταθερή.

Το *solidity* υπολογίζεται σε ακτίνα στο μέσο του εκπετάσματος του πτερυγίου. Μεταβάλλοντας την παράμετρο *hub to tip ratio*, η μέση ακτίνα R_{mid} της μηχανής αλλάζει συνεπώς το *solidity* μπορεί να επηρεαστεί. Για να μπορέσει να παραμείνει σταθερό και ίσο με 0.50 πρέπει να αλλάξει είτε ο αριθμός των πτερυγίων ή το μήκος της χορδής του πτερυγίου.

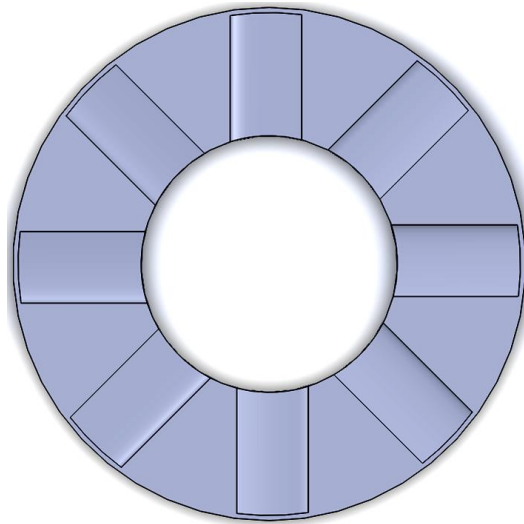
Η μηχανή που εξετάζεται έχει σταθερή εξωτερική διάμετρο ρότορα ίση με 5.3m και σταθερό αριθμό στροφών ίσο με 200rpm. Στο σενάριο I η τιμή του *hub to tip ratio* είναι 0.50 και στο σενάριο II είναι 0.60. Εφόσον η εξωτερική διάμετρος του ρότορα διατηρείται σταθερή, αυτό που μεταβάλλεται κάθε φορά είναι η διάμετρος πλήμνης. Στον Πίνακα 6.3 συγκεντρώνονται τα δύο εξεταζόμενα σενάρια μηχανών Wells με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

Οι δύο γεωμετρίες σχεδιάζονται με τη χρήση του λογισμικού CAD Solidworks και παρουσιάζονται σε τομή στην Εικόνα 6.4.

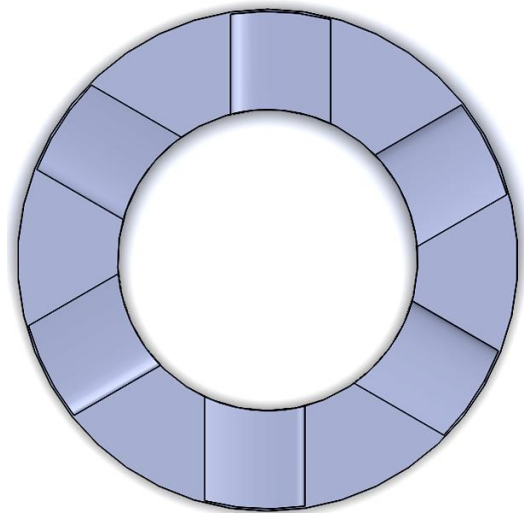
Προφίλ πτερυγίου	NACA0020
Διάμετρος ρότορα	5.3m
Blade sweep ratio	I. 0.50
	II. 0.35
Solidity	0.50
Hub to tip ratio	I. 0.50
	II. 0.60

Αριθμός πτερυγίων	I. 8 II. 6
Μήκος χορδής	I. 0.82 II. 1.14
Tip clearance	2%
Ταχύτητα περιστροφής	200rpm

Πίνακας 6. 3 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μηχανής Wells για σταθερό solidity



I. *solidity = 0.50 και hub to tip ratio = 0.50*



II. *solidity = 0.50 και hub to tip ratio = 0.60*

Εικόνα 6. 4 - Τομή των δύο μηχανών Wells

Για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις γίνεται υπολογιστική επίλυση της ροής με χρήση του CFD κώδικα FLUENT. Σκοπός είναι ο σχηματισμός των διαγραμμάτων λειτουργίας για καθένα από τα δύο εξεταζόμενα σενάρια. Στην συνέχεια, με βάση τα διαγράμματα λειτουργίας μπορεί να γίνει λεπτομερής σύγκριση μεταξύ τους ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το πώς επηρεάζουν οι γεωμετρικές παράμετροι.

Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται τα αδιάστατα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την λειτουργία της μηχανής. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζονται οι σχέσεις που δίνουν τα αδιάστατα μεγέθη:

Αδιάστατη παροχή αέρα:

$$\varphi = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi^2}{4} D_{tip}^3 n}$$

Αδιάστατη πτώση στατικής πίεσης:

$$DP^* = \frac{DP_{static}}{\frac{\pi^2}{2} D_{tip}^2 n^2 \rho}$$

Αδιάστατο μέγεθος ροπής:

$$T^* = \frac{T}{\rho \omega^2 R_{tip}^5}$$

Αδιάστατη ισχύς που αποδίδεται στον άξονα:

$$P_{shaft}^* = \frac{P_{shaft}}{\frac{\pi^4}{8} D_{tip}^5 n^3 \rho}$$

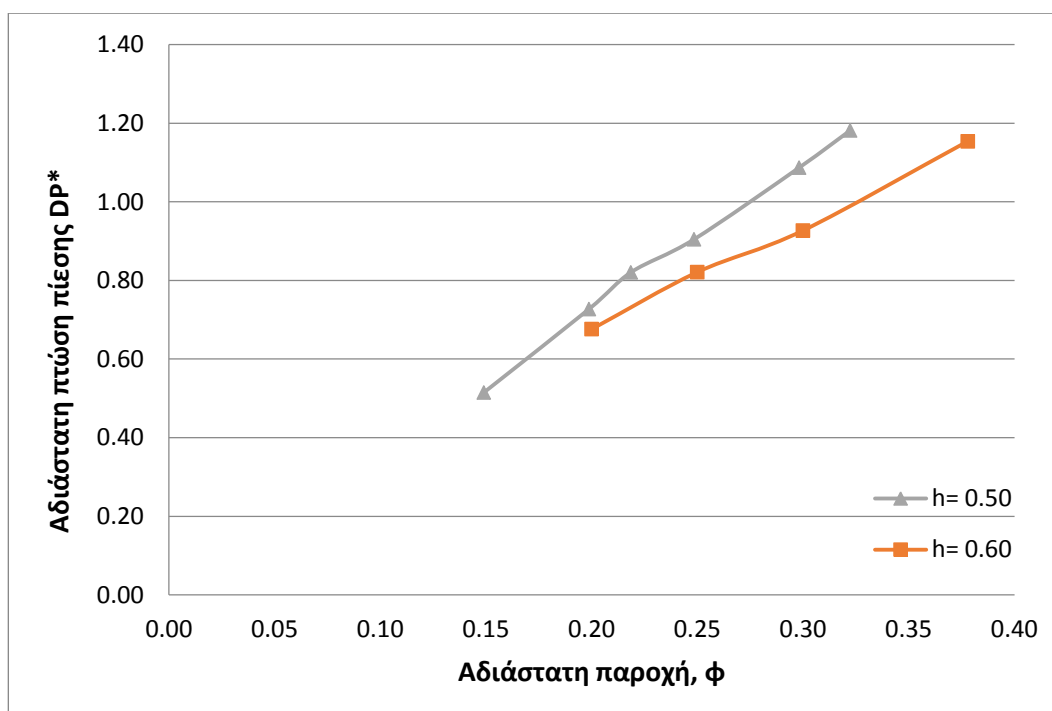
Βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \frac{P_{shaft}}{\dot{V} DP}$$

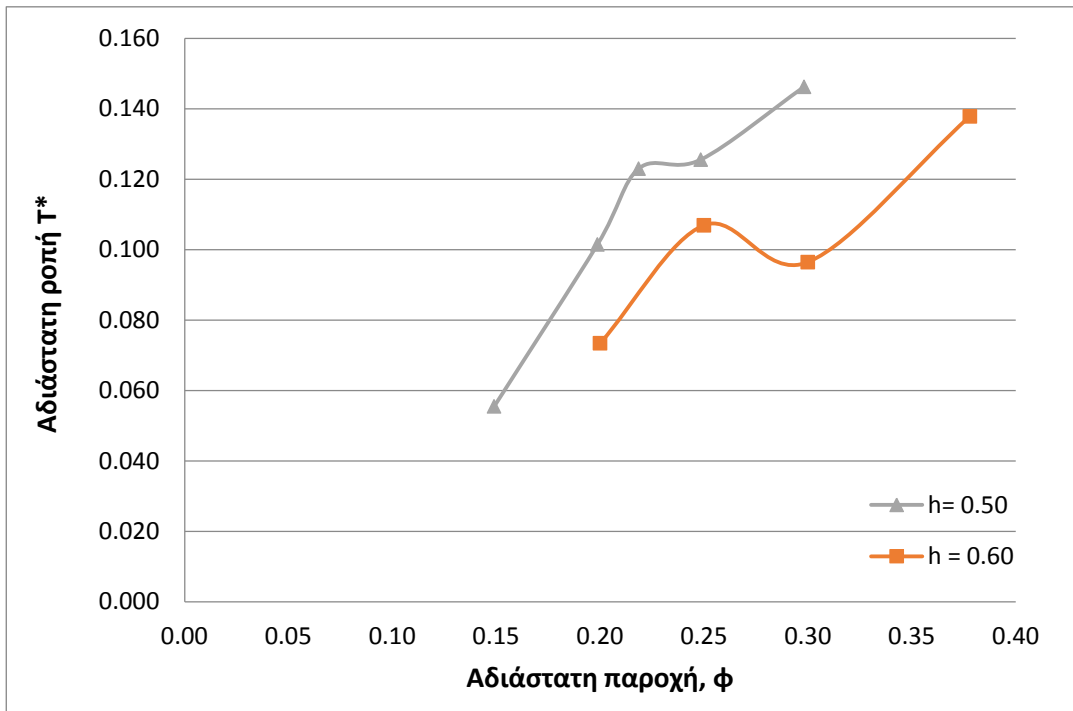
Το Διάγραμμα 6.4 (α) αποτελεί τη κατανομή της πτώσης στατικής πίεσης συναρτήσει της παροχής αέρα υπό τη μορφή αδιάστατων μεγεθών. Επιβεβαιώνεται το χαρακτηριστικό γνώρισμα των στροβιλομηχανών Wells σύμφωνα με το οποίο η πτώση πίεσης αυξάνεται γραμμικά με τη παροχή. Στην περιοχή ομαλής λειτουργίας των μηχανών, η πτώση πίεσης για τη μηχανή με μικρότερο hub to tip ratio και ίσο με 0.50 (σενάριο I) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πτώση πίεσης για hub to tip ratio ίσο με 0.60 (σενάριο II). Αυτό εξηγείται καθώς με την αύξηση της διαμέτρου της πλήμνης, η επιφάνεια εισόδου μειώνεται και έτσι η ταχύτητα με την οποία εισέρχεται ο αέρας αυξάνεται. Σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli για ασυμπίεστα ρευστά, η πίεση του ρευστού στην είσοδο μειώνεται. Γενικότερα όμως, το συμπέρασμα που προκύπτει έχει να κάνει με το ότι η παράμετρος hub to tip ratio δεν επηρεάζει τόσο την πτώση στατικής πίεσης. Η μεταβολή της παραμέτρου solidity είναι αυτή που προκαλεί αξιοσημείωτες αλλαγές (βλέπε παράγραφο 6.3).

Η διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας του πτερυγίου οφείλονται για την δύναμη της άνωσης (lift). Η συνιστώσα της άνωσης στην περιφερειακή διεύθυνση είναι υπεύθυνη για την περιστροφή του πτερυγίου. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.4 (β), η ροπή για την περίπτωση με $h = 0.50$ είναι ελαφρώς μεγαλύτερη μέχρι το σημείο στο οποίο εμφανίζεται η αποκόλληση οριακού στρώματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενα σημεία, θεωρείται ότι το "στολάρισμα" της μηχανής ξεκινάει μετά την ανάπτυξη της μέγιστης ροπής (incipient stall). Για τα σενάρια που εξετάζονται και για την περίπτωση του hub to tip ratio ίσο με 0.60 (σενάριο II) η αποκόλληση καθυστερεί ($\phi = 0.25$). Για την περίπτωση όπου hub to tip ratio είναι ίσο με 0.50 (γεωμετρία I) το εύρος παροχών λειτουργίας είναι μικρότερο καθώς η αποκόλληση ξεκινάει σε μικρότερη παροχή ($\phi = 0.20$). Φυσικά, για τις γεωμετρίες που εξετάζονται στη παρούσα εργασία, το γεγονός ότι η γεωμετρία με $h = 0.50$ έχει περισσότερα πτερύγια έναντι της περίπτωσης με $h = 0.60$, υποβοηθάει στην ανάπτυξη μεγαλύτερης ροπής στον άξονα.

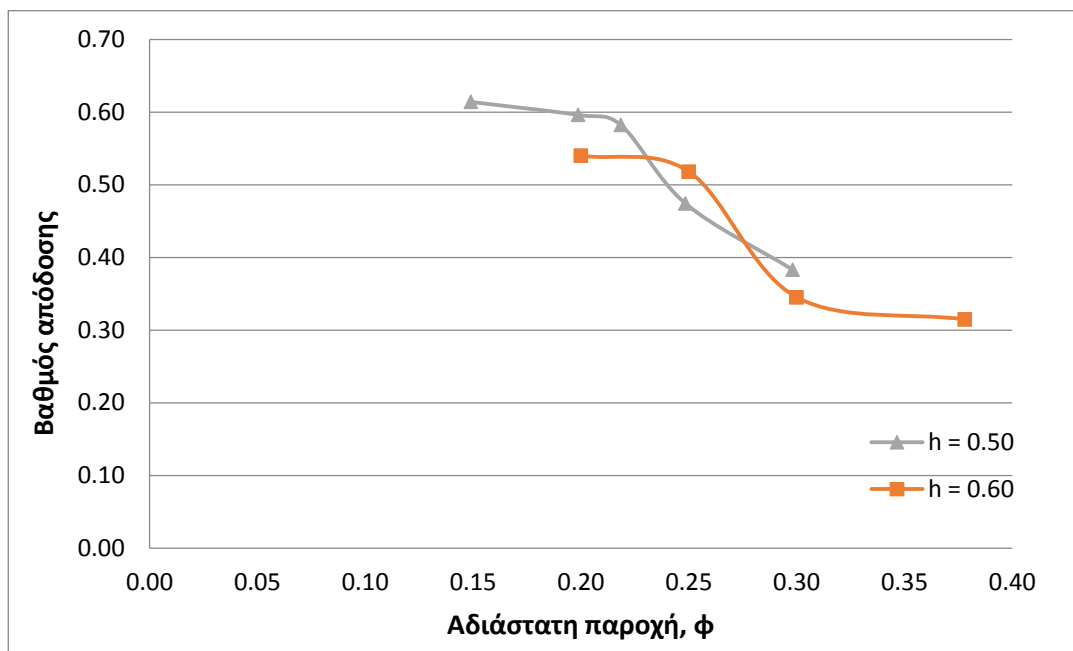
Στο Διάγραμμα 6.4 (γ) απεικονίζεται ο βαθμός απόδοσης για τις δύο μηχανές Wells με hub to tip ratio ίσο με 0.50 και 0.60 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για την περίπτωση όπου το hub to tip ratio είναι μικρότερο η μηχανή έχει μεν καλύτερο βαθμό απόδοσης αλλά περιορισμένο εύρος λειτουργίας. Αντιθέτως, όταν η διάμετρος της πλήμνης αυξηθεί τότε το εύρος λειτουργίας μεγαλώνει αλλά ταυτόχρονα η απόδοση της μηχανής μειώνεται. Η μειωμένη απόδοση για μηχανή με μεγαλύτερο Hub to tip ratio οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή που εγκαταλείπει τη μηχανή έχει μεγαλύτερη ταχύτητα. Επιπλέον για τη περίπτωση με το μεγαλύτερο hub to tip ratio το διάκενο είναι μεγαλύτερο με αποτέλεσμα να προκαλούνται μεγαλύτεροι στροβιλισμοί ενώ περισσότερη μάζα αέρα διέρχεται χωρίς να ανταλλάσει ενέργεια με τον ρότορα. στον έντονο στροβιλισμό κοντά στην πλήμη όπως θα φανεί σε εικόνες που ακολουθούν. Επιπλέον, για μικρότερο hub to tip ratio η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων είναι μικρότερη και το ομόρρους που εγκαταλείπει το εμπρόσθιο πτερύγιο έχει την τάση να δημιουργεί αποκόλληση στο hub



(α) Αδιάστατη πτώση στατικής πίεσης



(β) Αδιάστατη ροπή στον άξονα της μηχανής



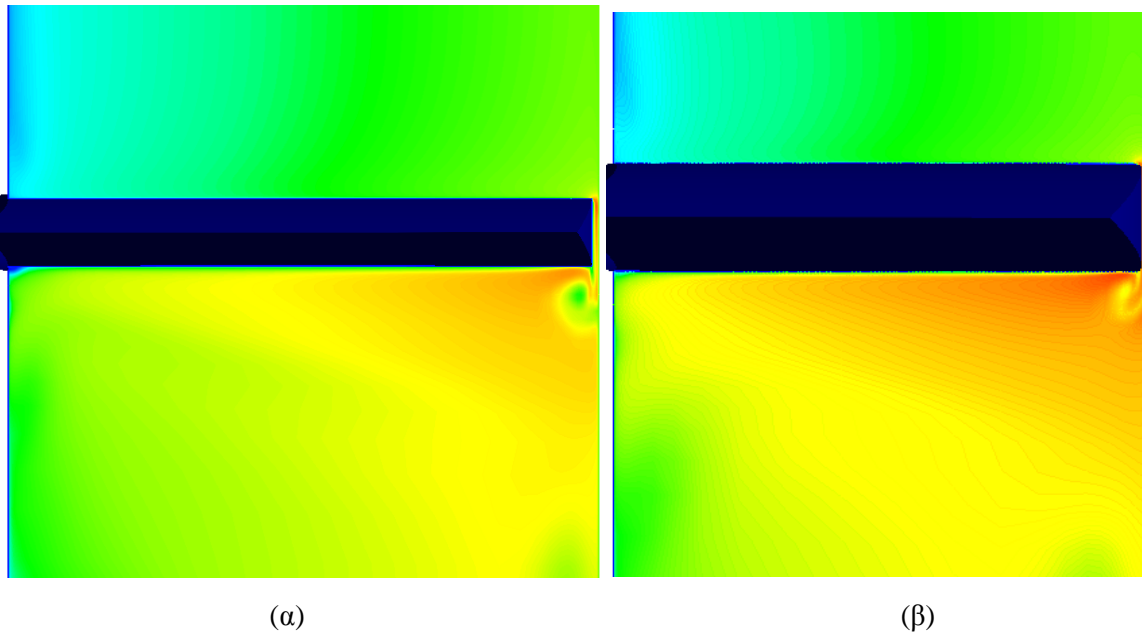
(γ) Βαθμός απόδοσης

Διάγραμμα 6. 4 - Διαγράμματα λειτουργίας μηχανής Wells για σταθερό solidity = 0.50

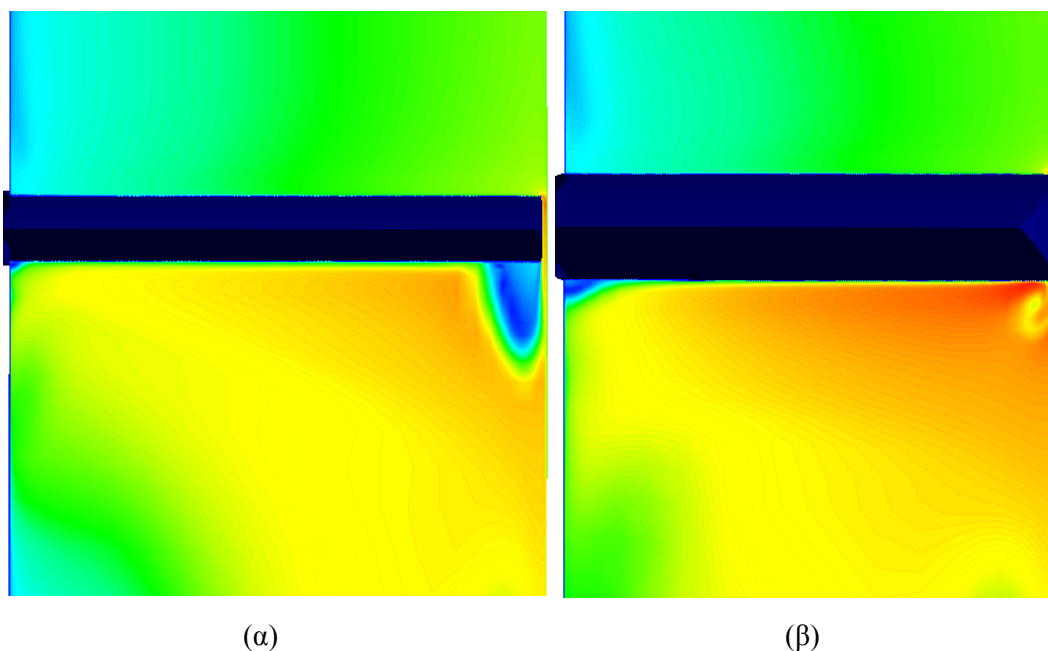
Στην Εικόνα 6.5 οπτικοποιείται η ροή για τις περιπτώσεις γεωμετρίας Wells I, II και αδιάστατο συντελεστή παροχής ίσο με 0.20. Στην Εικόνα 6.5 (α) απεικονίζεται η ροή γύρω από το περύγιο για $h = 0.50$ και στη προκειμένη περίπτωση η μηχανή αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ροπή. Συμπεραίνεται ότι για την περίπτωση όπου $h = 0.50$ η αποκόλληση της ροής ξεκινάει κοντά στην περιοχή της πλήμνης. Καθώς το περύγιο εκτείνεται από το hub στο shroud η αποκόλληση του οριακού στρώματος περιορίζεται. Η ύπαρξη του tip clearance επιδρά αρνητικά στην αποκόλληση της ροής στο άκρο. Ο αέρας διέρχεται από το διάκενο με υψηλή ταχύτητα διαταράσσοντας τη ροή. Στην Εικόνα 6.5 (β) απεικονίζεται η περίπτωση ροής όπου $h = 0.60$ και η μηχανή βρίσκεται

στην περιοχή κανονικής λειτουργίας. Στην Εικόνα 6.5(β) δεν αναπτύσσεται αποκόλληση κοντά στην πλήμνη γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη διάμετρο πλήμνης. Ταυτόχρονα λόγω της ύπαρξης διακένου μεγάλη ποσότητα μάζας αέρα διέρχεται και προκαλείται στροβιλισμός μεγάλου μεγέθους με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση της μηχανής.

Στην Εικόνα 6.6 γίνεται οπτικοποίηση της ροής για παροχή που εκφράζεται υπό μορφή του αδιάστατου συντελεστή παροχής ϕ και είναι ίση με 0.25. Στη συγκεκριμένη παροχή η μηχανή με $h = 0.50$ βρίσκεται σε κατάσταση προχωρημένης αποκόλλησης οριακού στρώματος. Είναι εμφανή η έντονη αποκόλληση κυρίως κοντά στο tip λόγω της παρουσίας του διακένου. Στην Εικόνα 6.5 (β) όπου απεικονίζεται η ροή για μηχανή με $h = 0.60$ είναι εμφανής η αποκόλληση στην περιοχή της πλήμνης. Στο άκρο του πτερυγίου εξακολουθεί να εμφανίζεται έντονος στροβιλισμός λόγω του διακένου συμβάλλοντας στη μείωση του βαθμού απόδοσης.

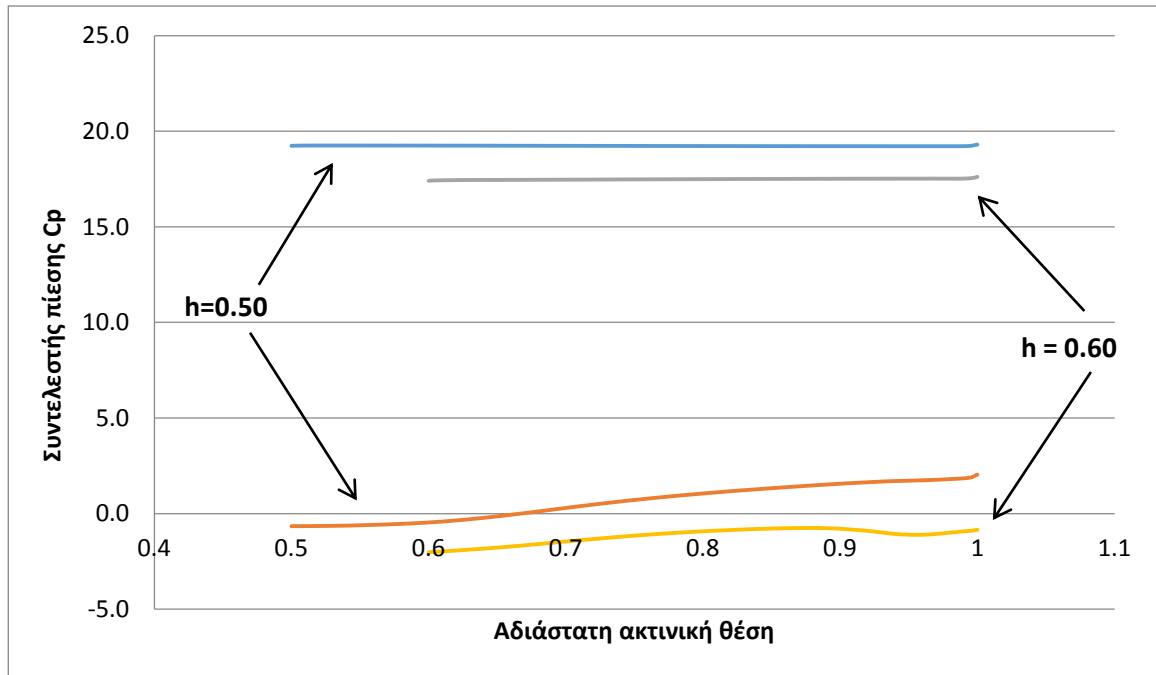


Εικόνα 6. 5 - Ροή αέρα για $\phi=0.20$, solidity = 0.50 (α) hub to tip ratio = 0.50 (β) hub to tip ratio = 0.60



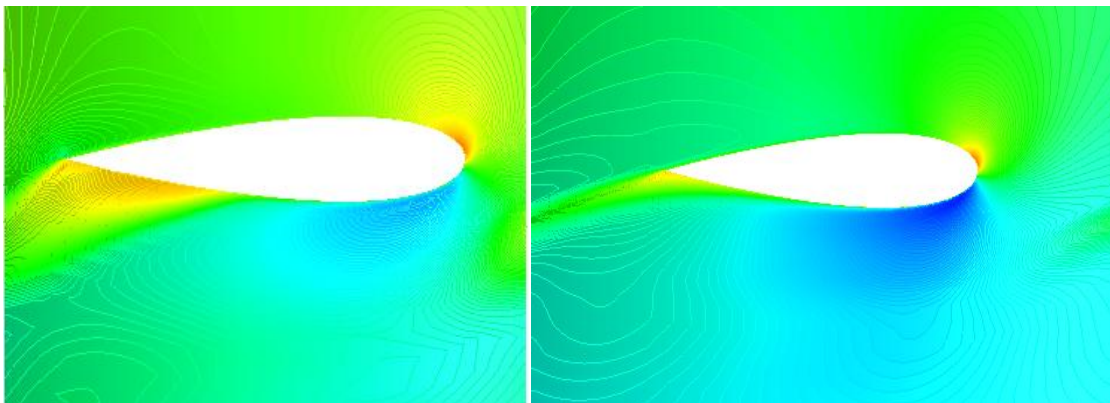
Εικόνα 6. 6 - Ροή αέρα για $\phi=0.20$, solidity = 0.50 (α) hub to tip ratio = 0.50 (β) hub to tip ratio = 0.60

Στο Διάγραμμα 6.5 απεικονίζεται η κατανομή της πίεσης ανάντη και κατόντη του πτερυγίου για τις περιπτώσεις όπου $h = 0.50$ και 0.60 . Η πίεση του αέρα στην είσοδο της μηχανής είναι υψηλότερη για $h = 0.50$ επιβεβαιώνοντας την αρχή Bernoulli καθώς η ταχύτητα είναι χαμηλότερη. Κατά την έξοδο, για $h = 0.50$, ο αέρας εγκαταλείπει τη μηχανή με μικρότερη ταχύτητα, έτσι η πίεση που αναπτύσσεται είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στην περίπτωση όπου $h = 0.60$ και ο αέρας εγκαταλείπει τη μηχανή έχοντας μεγάλη ταχύτητα.



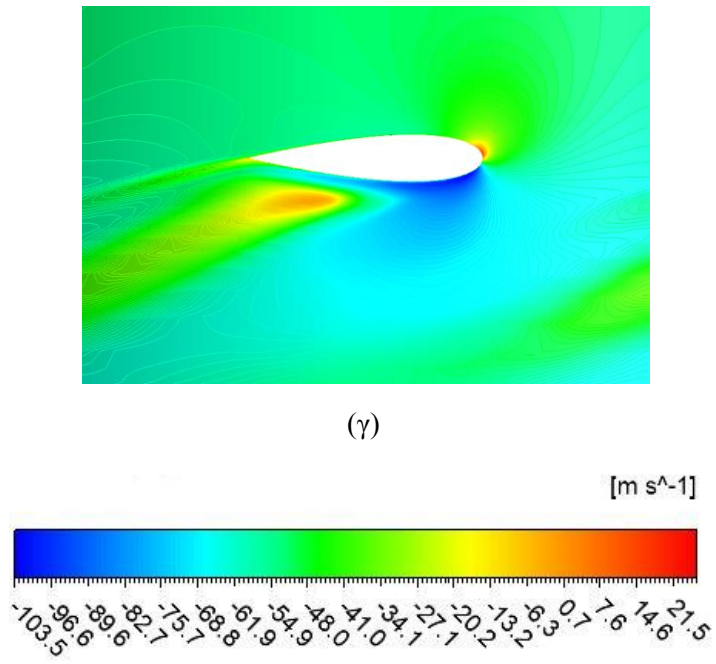
Διάγραμμα 6. 5 - Κατανομή στατικής πίεσης από το hub στο shroud για $\phi = 0.20$ και $h = 0.50$ και 0.60

Στις Εικόνες που ακολουθούν δίδεται η κατανομή της περιφερειακής ταχύτητας σε διάφορες τομές του πτερυγίου για τις μηχανές με $h = 0.50$ και 0.60 . Εξετάζονται οι περιπτώσεις για παροχή ίση με $\phi = 0.20$ και 0.25 . Στην Εικόνα 6.7(α) όπου η μηχανή βρίσκεται σε κατάσταση ελάχιστα πριν ξεκινήσει το Stall, παρατηρείται ότι το οριακό στρώμα αποκολλάται κοντά στην περιοχή της πλήμνης ενώ είναι εμφανή η δίνη που σχηματίζεται στο άκρο του πτερυγίου λόγω της παρουσίας του διακένου. Για την ίδια παροχή (Εικόνα 6.7(β)) και για μεγαλύτερο hub to tip ratio η ροή έχει την ίδια συμπεριφορά με την διαφορά ότι σε αυτή τη περίπτωση το Stall καθυστερεί.

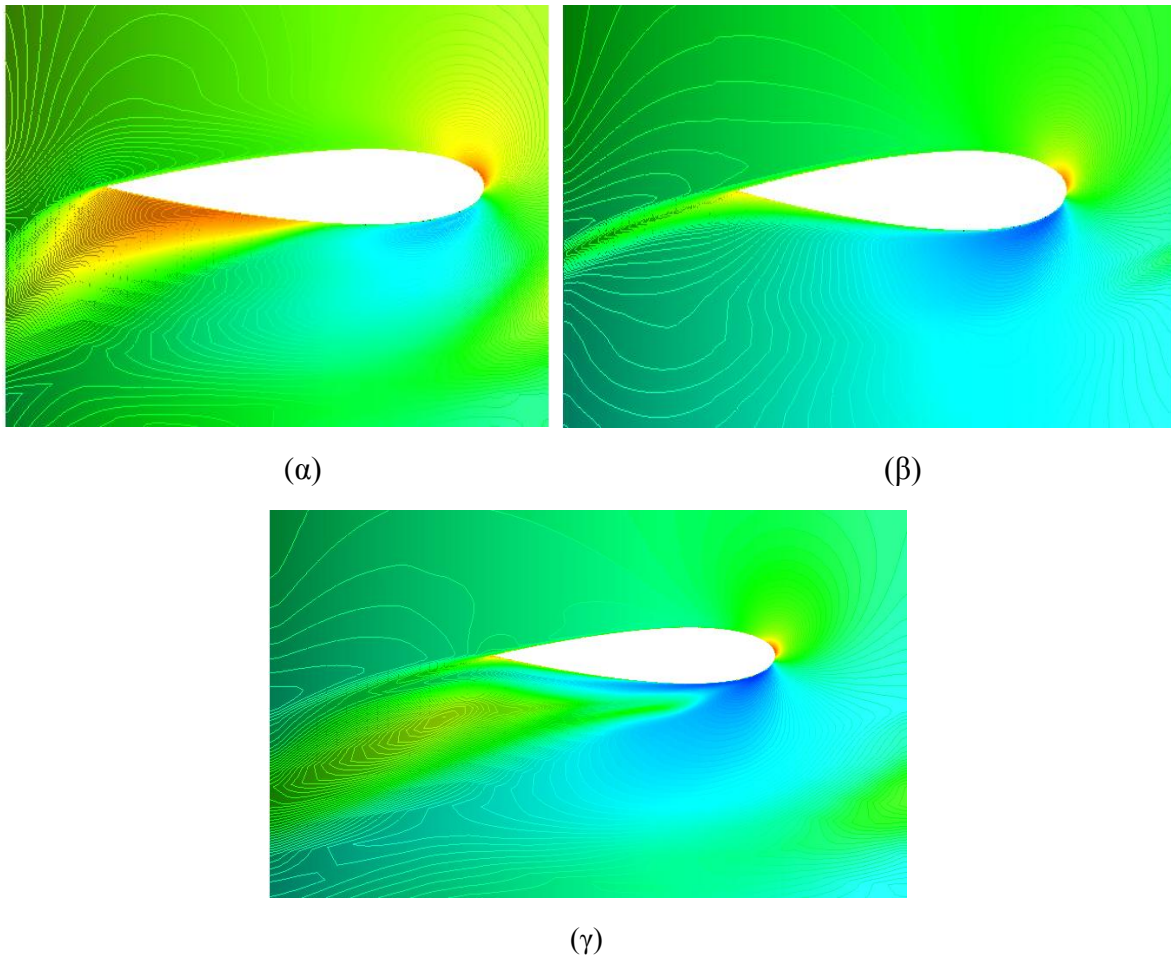


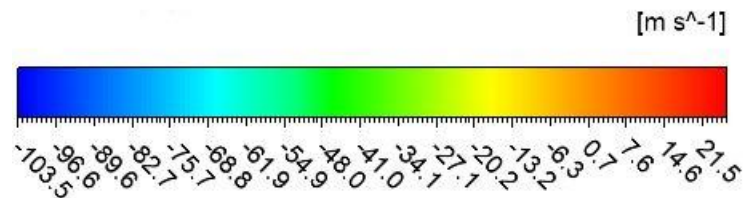
(α)

(β)



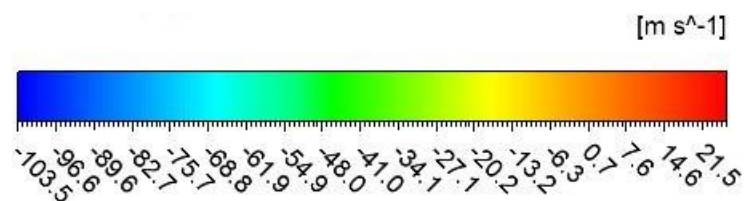
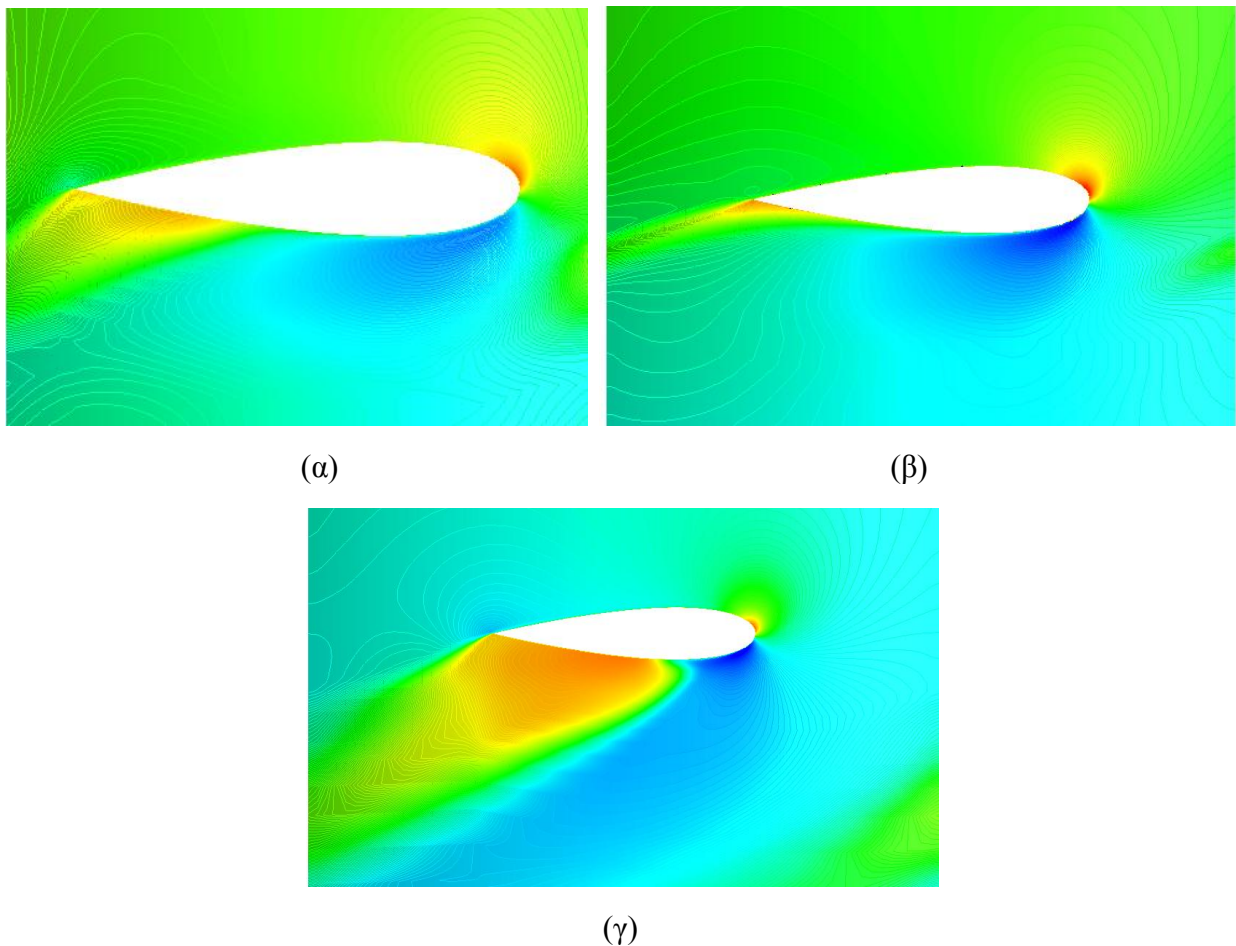
Εικόνα 6. 7 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας για $h=0.50$, $\phi=0.20$ σε τομή (α) κοντά στη πλήμνη (β) στο μέσο του εκπετάσματος (γ) κοντά στο άκρο



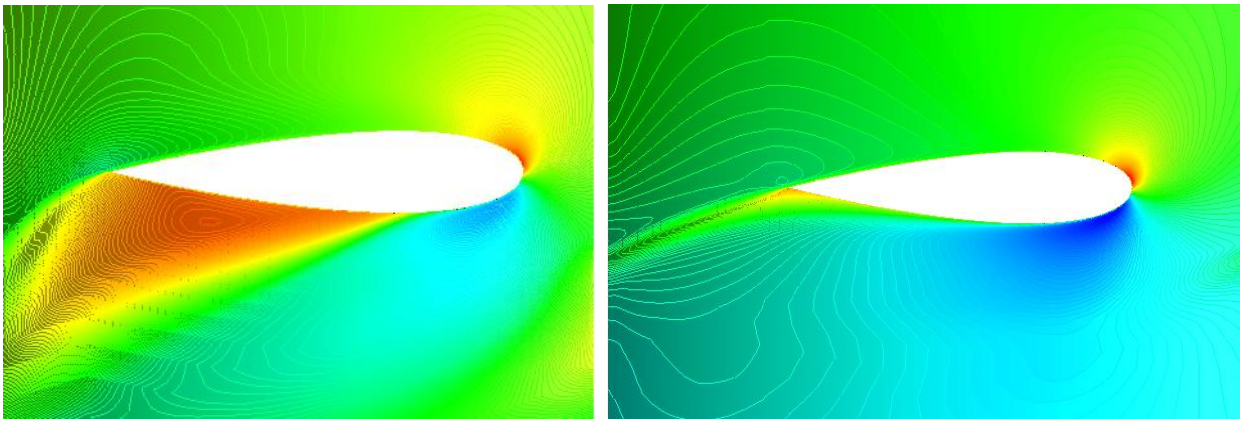


Εικόνα 6. 8 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας για $h = 0.60$, $\phi = 0.20$ σε τομή (α) κοντά στη πλήμνη (β) στο μέσο του εκπετάσματος (γ) κοντά στο άκρο

Στη συνέχεια μελετώνται οι ίδιες εικόνες με τη διαφορά ότι ο αδιάστατος αριθμός παροχής ϕ είναι ίσος με 0.25 (Εικόνα 6.8). Η περίπτωση με $h = 0.50$ βρίσκεται σε κατάσταση προχωρημένης αποκόλλησης (deep stall) η οποία ξεκινάει από το hub και η οποία γίνεται εντονότερη κοντά στην περιοχή του Tip λόγω της παρουσίας του διακένου. Για τη περίπτωση με $h = 0.60$ η μηχανή βρίσκεται σε κατάσταση αρχικής αποκόλλησης (incipient stall) με εμφανή αποκόλληση κοντά στο Hub. Το διάκενο για τη συγκεκριμένη περίπτωση οδηγεί στη δημιουργία δίνης (tip leakage vortex) που προσπαθεί να περιορίσει την αποκόλληση στο Tip.

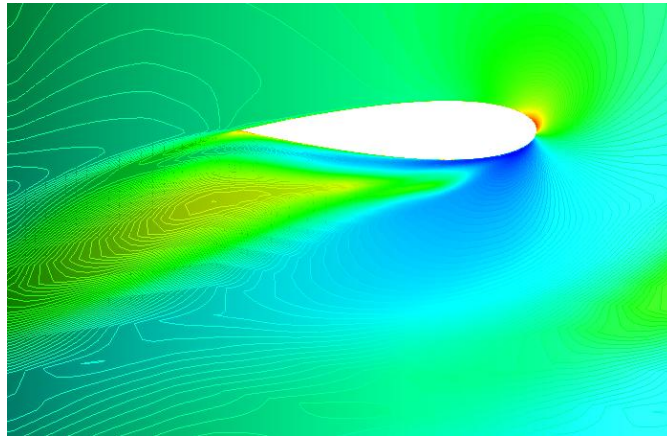


Εικόνα 6. 9 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας για $h = 0.50$, $\phi = 0.25$ σε τομή (α) κοντά στη πλήμνη (β) στο μέσο του εκπετάσματος (γ) κοντά στο άκρο

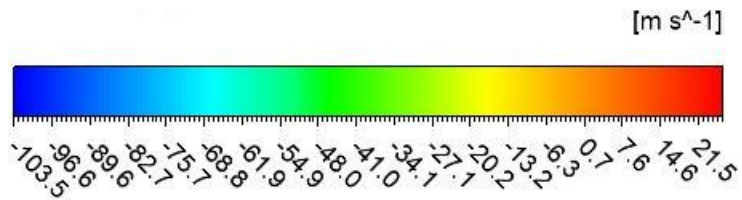


(α)

(β)



(γ)

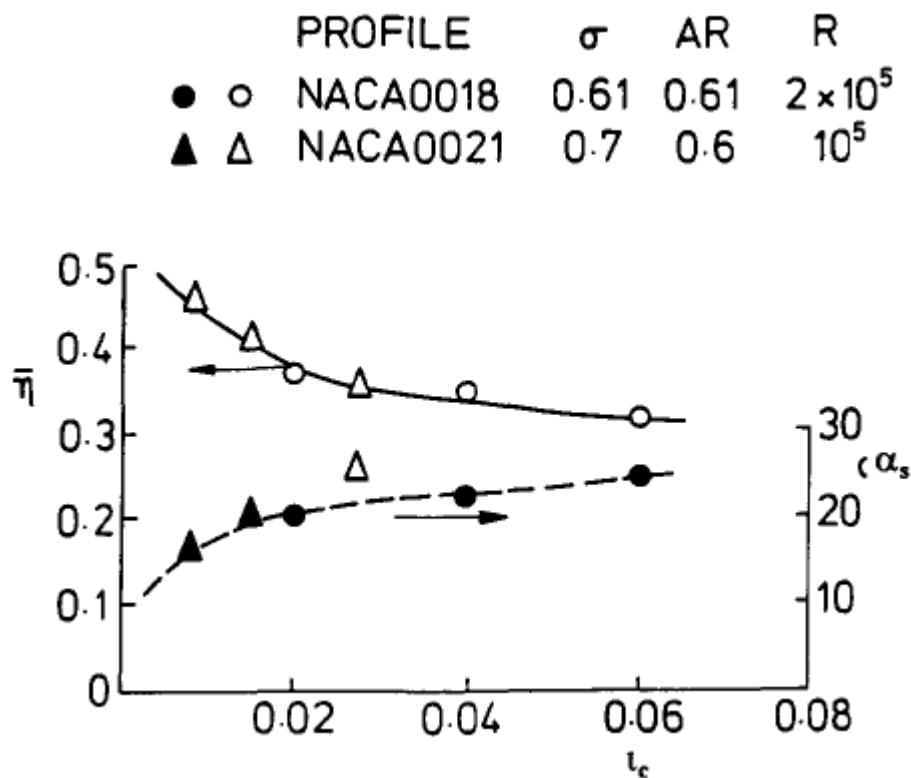


Εικόνα 6. 10 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας για $h = 0.60$, $\varphi = 0.25$ σε τομή (α) κοντά στη πλήμνη (β) στο μέσο του εκπετάσματος (γ) κοντά στο άκρο

7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ TIP CLEARANCE

7.1. Η επίδραση του διακένου (tip clearance) στην λειτουργία της μηχανής Wells

Στις στροβιλομηχανές Wells, το κενό μεταξύ του κελύφους της μηχανής και της εξωτερικής ακτίνας του ρότορα ονομάζεται διάκενο ή Tip clearance στην αγγλική βιβλιογραφία. Η λειτουργία των μηχανών Wells επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη του διακένου. Το Διάγραμμα 7.1 απεικονίζει την επίδραση του διακένου στην απόδοση της μηχανής Wells. Η μείωση του διακένου συμβάλλει στη πρόωρη εμφάνιση της αποκόλλησης της ροής στο πτερύγιο αλλά βελτιώνει το βαθμό απόδοσης της μηχανής καθώς περιορίζονται οι απώλειες. Αντιθέτως, οι μηχανές με μεγαλύτερο διάκενο μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγαλύτερο εύρος παροχών χωρίς την εμφάνιση αποκόλλησης της ροής. Θεωρείται ότι οι μηχανές Wells με διάκενο μεγαλύτερο από 2% δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα στην λειτουργία τους συνεπώς προτείνεται τιμή μικρότερη του 2% της χορδής [βιβλιογραφία Raghunathan].



Διάγραμμα 7.1 - Επίδραση του Tip clearance στο βαθμό απόδοσης και στην αποκόλληση

Καθώς η ροή εισέρχεται στο διάκενο, στην πλευρά της πίεσης (Pressure surface) στο άκρο (tip) του πτερυγίου εμφανίζεται μικρός στροβιλισμός. Κατά την έξοδο της ροής από το διάκενο, στην πλευρά υποπίεσης (Suction Surface) σχηματίζεται έντονότερος στρόβιλος (Tip leakage vortex). Η ροή που διέρχεται από το διάκενο κινείται όπως ορίζεται από την πτώση πίεσης μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας του πτερυγίου αλλά και από τις ιξώδεις δυνάμεις που εμφανίζονται.

Όταν το διάκενο είναι μεγάλο και η ροή μέσω της μηχανής υψηλή, η ροή διαμέσου του διακένου καθορίζεται από την διαφορά πίεσης ανάντη και κατόντη του πτερυγίου. Αντιθέτως για μικρό διάκενο ή μικρά φορτία η ροή διαμέσου του διακένου οφείλεται στη κίνηση του πτερυγίου σε σχέση με το ακίνητο κέλυφος της μηχανής.

Οι αδρανειακές δυνάμεις σε αυτή την περιοχή επαρκούν για την ανάπτυξη στροβιλισμού κοντά στο διάκενο (tip leakage vortex) προς την πλευρά της υποπίεσης και είναι υπεύθυνες για μεγάλες απώλειες.

Κατόπιν παρατήρησης, αξίζει να σημειωθούν τα χαρακτηριστικά στοιχεία που επικρατούν στην περιοχή κοντά στο διάκενο.

1. Σχηματισμός και μεταφορά του στροβιλισμού (tip leakage flow)
2. Αλληλεπίδραση ροής (tip leakage flow) με στροβιλισμούς που αναπτύσσονται εξαιτίας άλλων μηχανισμών (π.χ. δευτερογενείς ροές).
3. Σημαντικός παράγοντας είναι το μέγεθος του διακένου (Tip clearance) καθώς και το φορτίο που καλείται να αναλάβει το πτερύγιο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται διερεύνηση της λειτουργίας μίας μηχανής Wells για τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιώντας μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η διερεύνηση αφορά μηχανή με πτερύγια που χρησιμοποιούν την αεροτομή NACA 0020 ενώ το διάκενο μεταξύ του άκρου του πτερυγίου και του κελύφους της μηχανής είναι ομοιόμορφο. Στις περιπτώσεις που εξετάζονται, το διάκενο επιλέγεται να είναι ίσο με 1% και 2% της χορδής. Επίσης εξετάζεται και η ιδανική περίπτωση χωρίς διάκενο, δηλαδή Tip clearance ίσο με 0%. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς συνοψίζονται στον Πίνακα 7.1.

Προφίλ πτερυγίου	NACA0020
Αριθμός πτερυγίων	8
Μήκος χορδής πτερυγίου	0.82m
Solidity στη μέση ακτίνα του πτερυγίου	0.50
Διάμετρος κελύφους	5.3m
Διάμετρος άξονα	2.65m
Μέση ακτίνα	
Διάκενο	0%, 1% ,2%

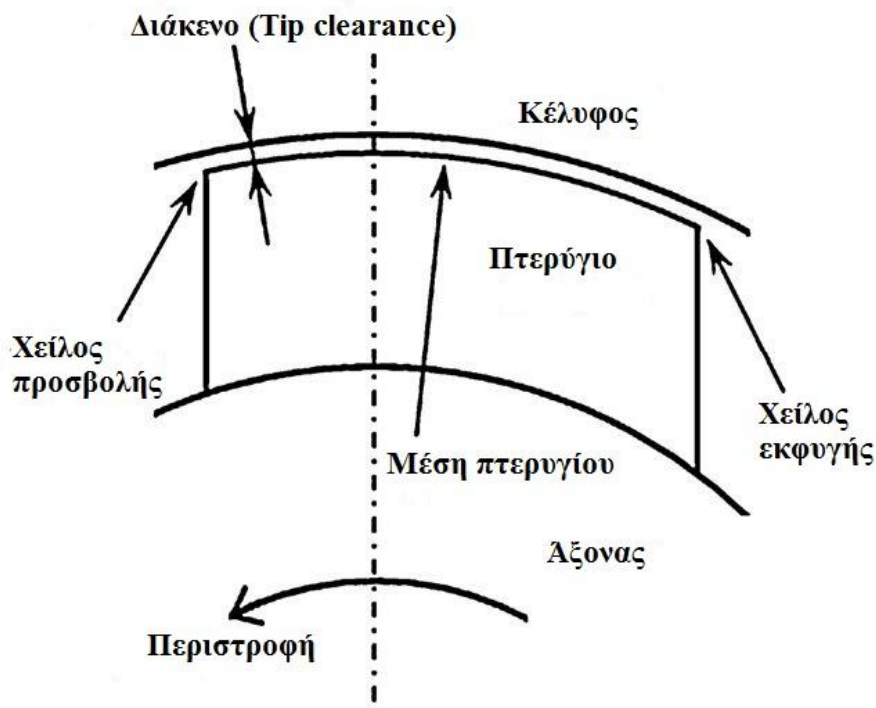
Πίνακας 7. 1 - Χαρακτηριστικά εξεταζόμενης γεωμετρίας

Ομοιόμορφο διάκενο σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ του άκρου του πτερυγίου και του κελύφους της μηχανής είναι σταθερή από την ακμή προσβολής (leading edge) έως την ακμή εκφυγής (trailing edge) του πτερυγίου (Εικόνα 7.1).

Η ύπαρξη του διακένου αποτελεί βασικό παράγοντα για τη λειτουργία της μηχανής καθώς σχετίζεται άμεσα με την απόδοσή της. Η σύγκριση διάφορων τιμών διακένου μπορεί να δώσει πιο ξεκάθαρη εικόνα σχετικά με το πώς επηρεάζει το εύρος λειτουργίας καθώς και τον βαθμό απόδοσης. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στη μορφή αδιάστατων μεγεθών. Συγκεκριμένα, η πτώση στατικής πίεσης, η ροπή στον άξονα, η παροχή αέρα αδιαστατοποιούνται ώστε να γίνει σύγκριση των τιμών με αντίστοιχα νούμερα άλλων ερευνητικών εργασιών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία.

Η λειτουργία της μηχανής Wells μελετάται για διάφορες παροχές αέρα. Η παροχή εκφράζεται υπό τη μορφή του αδιάστατου συντελεστή παροχής φ . Υπενθυμίζεται ότι ορίζεται ως ο λόγος της αξονικής ταχύτητας αέρα προς την γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της μηχανής. Η επίλυση της ροής για διαφορετικές τιμές του αδιάστατου αριθμού παροχής φ επιτυγχάνεται με μεταβολή της παροχής και κατ' επέκταση της αξονικής ταχύτητας στην είσοδο, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα διατηρείται σταθερή.

$$\varphi = \frac{V_{axial}}{\omega \times R_{tip}}$$



Εικόνα 7.1 - Σχηματική απεικόνιση διακένου

Τα Διαγράμματα 7.2 αποτελούν τα διαγράμματα λειτουργίας της μηχανής Wells για τις τρεις εξεταζόμενες γεωμετρίες με tip clearance ίσο με 0%, 1%, 2%. Το διάκενο 0% αποτελεί την ιδανική περίπτωση, ενώ παράλληλα εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου το διάκενο ισούται με το 1%

και το 2% της χορδής του περυγίου. Στο Διάγραμμα 7.2 (α) απεικονίζεται η αδιάστατη πτώση στατικής πίεσης συναρτήσει της αδιάστατης παροχής αέρα. Το Διάγραμμα 7.2 (β) αφορά την ροπή και το Διάγραμμα 7.2 (γ) τον βαθμό απόδοσης της μηχανής συναρτήσει της παροχής.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι το χαρακτηριστικό των Wells αποτελεί το γεγονός ότι η πτώση στατικής πίεσης (ΔP^*) ακολουθεί γραμμική αύξηση συναρτήσει της παροχής του αέρα. Αντίθετα, η ροπή στον άξονα αυξάνεται με την αύξηση της παροχής μέχρι όπου η ροπή αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της. Στη συνέχεια, παρατηρείται απότομη πτώση της ροπής με την αύξηση της παροχής. Το σημείο όπου συμβαίνει η απότομη πτώση της ροπής, αποτελεί τη κρίσιμη παροχή λειτουργίας της μηχανής καθώς στη συνέχεια ξεκινάει το φαινόμενο της αποκόλληση της ροής γύρω από το περύγιο. Ο όρος "στολάρισμα" χρησιμοποιείται για να περιγράψει το εξαιρετικά ανεπιθύμητο φαινόμενο στην εξέλιξη της ροής που είναι γνωστό ως αποκόλληση του οριακού στρώματος (boundary layer separation) και προκύπτει από την αγγλική ορολογία Stall. Ταυτόχρονα, στο σημείο της απότομης πτώσης της ροπής παρατηρείται και απότομη πτώση του βαθμού απόδοσης.

Εξετάζονται οι τρεις περιπτώσεις και από τα αποτελέσματα της μελέτης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Παρατηρώντας το διάγραμμα πτώσης στατικής πίεσης συναρτήσει της παροχής (Διάγραμμα 7.2(α)), συμπεραίνεται ότι στην ιδανική περίπτωση (tip clearance = 0%) επιτυγχάνεται η μικρότερη μείωση στην πίεση του αέρα καθώς διέρχεται από το περύγιο. Η μεγαλύτερη πτώση σημειώνεται στην περίπτωση με tip clearance ίσο με 1% για το εύρος παροχών που λειτουργεί υπό απουσία "στολάρισματος".

Από το διάγραμμα που απεικονίζει την αποδιδόμενη ροπή στον άξονα συναρτήσει της παροχής αέρα (Διάγραμμα 7.2(β)) φαίνεται ότι οι περιπτώσεις με tip clearance = 0% και 1% αρχικά αποδίδουν τις ίδιες τιμές με τη διαφορά ότι η μηχανή με διάκενο 1% "στολάρει" πρόωρα ($\varphi_{cr} = 0.20$). Στην ιδανική περίπτωση γεωμετρίας (χωρίς διάκενο) φαίνεται ότι η αποκόλληση του οριακού στρώματος εμφανίζεται σε αρκετά μεγαλύτερη παροχή ($\varphi_{cr} = 0.25$) επιτρέποντας στη ροπή να αποδώσει τελικά μεγαλύτερες τιμές. Όσον αφορά τη γεωμετρία με tip clearance = 2% παρουσιάζει μία ενδιαμέση συμπεριφορά ως προς την παροχή στην οποία εμφανίζεται το Stall ($\varphi_{cr} = 0.25$) ενώ γενικότερα αποδίδει μικρότερη ροπή σε όλο το εύρος λειτουργίας της.

Εστιάζοντας στην απόδοση των μηχανών και πώς αυτή επηρεάζεται ανάλογα με το διάκενο, το Διάγραμμα 7.2 (γ) αποδίδει την συμπεριφορά των μηχανών για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διακένου συναρτήσει της παροχής. Η ιδανική μηχανή Wells, χωρίς διάκενο, έχει τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης της τάξης του 70% για κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Με την αύξηση του διακένου η απόδοση φθίνει και έτσι η μηχανή με tip clearance = 1% αντίστοιχα αποδίδει 65% και η μηχανή με tip clearance = 2% έχει βαθμό απόδοσης ίσο με 60%. Συμπεραίνεται ότι η γεωμετρία με μηδενικό διάκενο θα μπορούσε να αποτελέσει τη βέλτιστη επιλογή. Στη πραγματικότητα όμως δεν υφίσταται μηχανή Wells χωρίς διάκενο καθώς θα ήταν αδύνατη η περιστροφή του ρότορα λόγω της τριβής του με το ακίνητο κέλυφος. Έτσι συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις μηχανής με διάκενο επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα που διατυπώθηκε αρχικά, ότι για μικρότερο διάκενο η μηχανή έχει μεγαλύτερη απόδοση για μικρότερες παροχές όμως "στολάρει" πρόωρα.

Λόγω της διαφοράς πίεσης που σημειώνεται μεταξύ της επάνω και της κάτω επιφάνειας του πτερυγίου η ροή αναγκάζεται να διέλθει δια μέσου του διακένου και στο εξής θα ονομάζεται tip leakage flow. Η παρατήρηση που σημειώθηκε σχετικά με το Διάγραμμα 7.2(α), ότι για tip clearance = 1% η πτώση πίεσης λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή δικαιολογείται ως εξής: για μικρότερο διάκενο η ροή που εισέρχεται στην μηχανή αντιλαμβάνεται μεγαλύτερη αντίσταση και έτσι η στατική πίεση στην είσοδο αποκτά μεγαλύτερες τιμές όπως είναι εμφανές στο Διάγραμμα 7.3. Στη συνέχεια, καθώς ο αέρας εξέρχεται από μικρότερο διάκενο αναπτύσσει μεγαλύτερη ταχύτητα και αντίστοιχα η στατική πίεση παρουσιάζει μικρότερη τιμή, σύμφωνα με την αρχή Bernoulli. Συνεπώς για tip clearance = 1% επιτυγχάνεται συνολικά μεγαλύτερη πτώση στην πίεση του αέρα που διέρχεται από το πτερύγιο. Για την περίπτωση όπου tip clearance = 0% η πτώση στατικής πίεσης έχει τη μικρότερη τιμή για μία δεδομένη παροχή. Αυτό υποδηλώνει ότι το διάκενο επιδρά σημαντικά στην μεταβολή της πίεσης του αέρα καθώς διέρχεται από τον ρότορα.

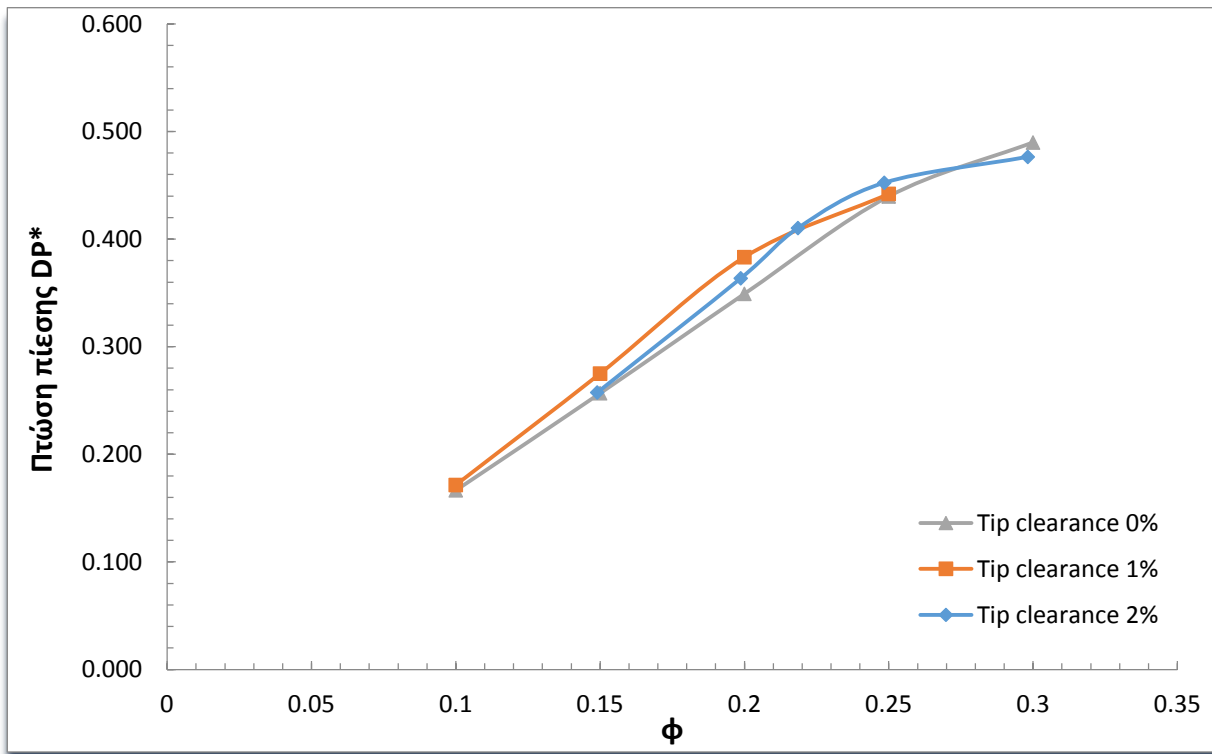
Όταν ο αέρας συναντήσει το tip clearance η ροή σε αυτή την περιοχή αλλάζει κατεύθυνση ενώ παράλληλα η στενή περιοχή του διακένου λειτουργεί σαν ακροφύσιο και προκαλεί τον στραγγαλισμό της μάζας αέρα που διέρχεται από αυτό. Έτσι ευνοείται η ανάπτυξη στροβίλων (tip leakage vortex) στην περιοχή κοντά στο άκρο του πτερυγίου προς την πλευρά της υποπίεσης (suction surface). Ο στροβιλισμός που αναπτύσσεται (tip leakage vortex) λόγω του διακένου διαταράσσει τη ροή και ευνοεί την αποκόλληση του οριακού στρώματος κυρίως στην περιοχή του ακροπτερυγίου. Καθώς το διάκενο αυξάνει η διαφορά πίεσης μεταξύ των επιφανειών του πτερυγίου δεν είναι τόσο έντονη και έτσι ο στροβιλισμός που αναπτύσσεται είναι μικρότερης έντασης και τείνει να αντισταθμίσει την αποκόλληση που εμφανίζεται στο άκρο (relief effect) με αποτέλεσμα το Stall να καθυστερεί.

Η ροπή που αναπτύσσεται σχετίζεται άμεσα με την πτώση πίεσης στο πτερύγιο. Συγκεκριμένα, η δύναμη της άωσης (Lift) είναι αποτέλεσμα της διαφοράς πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω επιφάνειας του πτερυγίου. Όσο μεγαλύτερη διαφορά πίεσης επικρατεί τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη της άωσης (Lift). Η άωση έχει διεύθυνση κάθετη στη ροή και μπορεί να αναλυθεί σε περιφερειακή και κάθετη συνιστώσα. Η δύναμη που εμφανίζεται στην περιφερειακή συνιστώσα είναι υπεύθυνη για την ροπή που αναπτύσσεται. Έτσι δικαιολογείται το γεγονός ότι η μηχανή με tip clearance = 2% αποδίδει μικρότερη ροπή συγκριτικά με την περίπτωση όπου tip clearance = 1%. Τέλος, σημειώνεται ότι η περίπτωση με μηδενικό διάκενο παρουσιάζει την καλύτερη κατανομή ροπής συναρτήσει της παροχής. Η απουσία διακένου οδηγεί στο περιορισμό απωλειών μάζας αέρα και έτσι περισσότερη ποσότητα αέρα περιστρέφει το ρότορα επιτυγχάνοντας υψηλή ροπή.

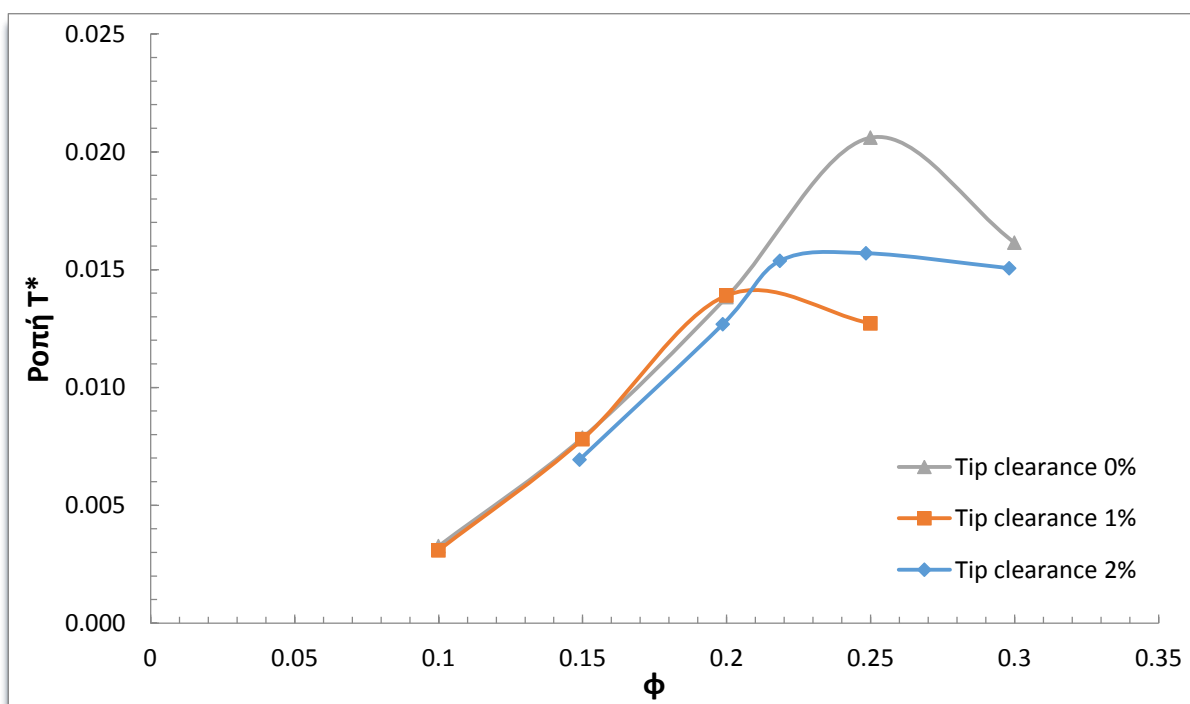
Όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης φαίνεται να συμβαδίζει με την συμπεριφορά που έχουν οι μηχανές ως προς την ροπή που αποδίδουν. Έτσι η μικρότερη απόδοση εμφανίζεται όταν tip clearance = 2% διότι μεγαλύτερη ποσότητα αέρα διέρχεται από το tip clearance, χωρίς να ανταλλάσει ενέργεια με τον ρότορα οδηγώντας την μηχανή σε μεγαλύτερες απώλειες. Επίσης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το μεγαλύτερο tip clearance ευνοεί την ανάπτυξη μεγαλύτερων στροβιλισμών οι οποίοι συμβάλουν στις απώλειες της μηχανής.

Συνοψίζοντας, η αύξηση του tip clearance οδηγεί στην καθυστέρηση του φαινομένου της αποκόλλησης (Stall), δηλαδή στο σχεδιασμό μίας μηχανής με μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας αλλά μικρότερο συνολικό βαθμό απόδοσης. Αναπτύσσεται μεγαλύτερη ροπή στον άξονα της μηχανής,

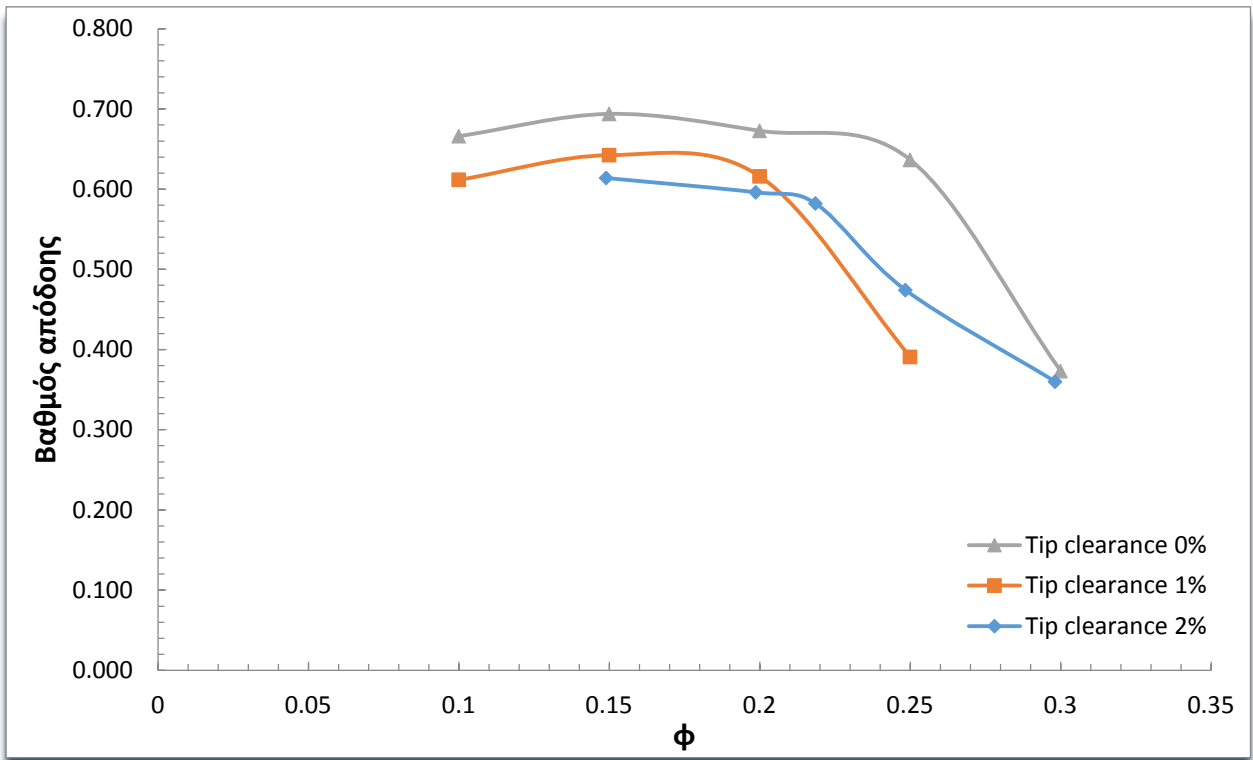
σε μεγαλύτερες παροχές αέρα, με αποτέλεσμα η μηχανή να αποδίδει περισσότερη ισχύ. Η χρήση μηχανής με μικρό εύρος λειτουργίας δεν συνίσταται για τις ακανόνιστες συνθήκες που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον έτσι οι σχεδιαστές προσπαθούν να συνδυάσουν μεγάλο εύρος λειτουργίας με όσο γίνεται καλύτερο βαθμό απόδοσης για την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



(α) Αδιάστατη πίεση

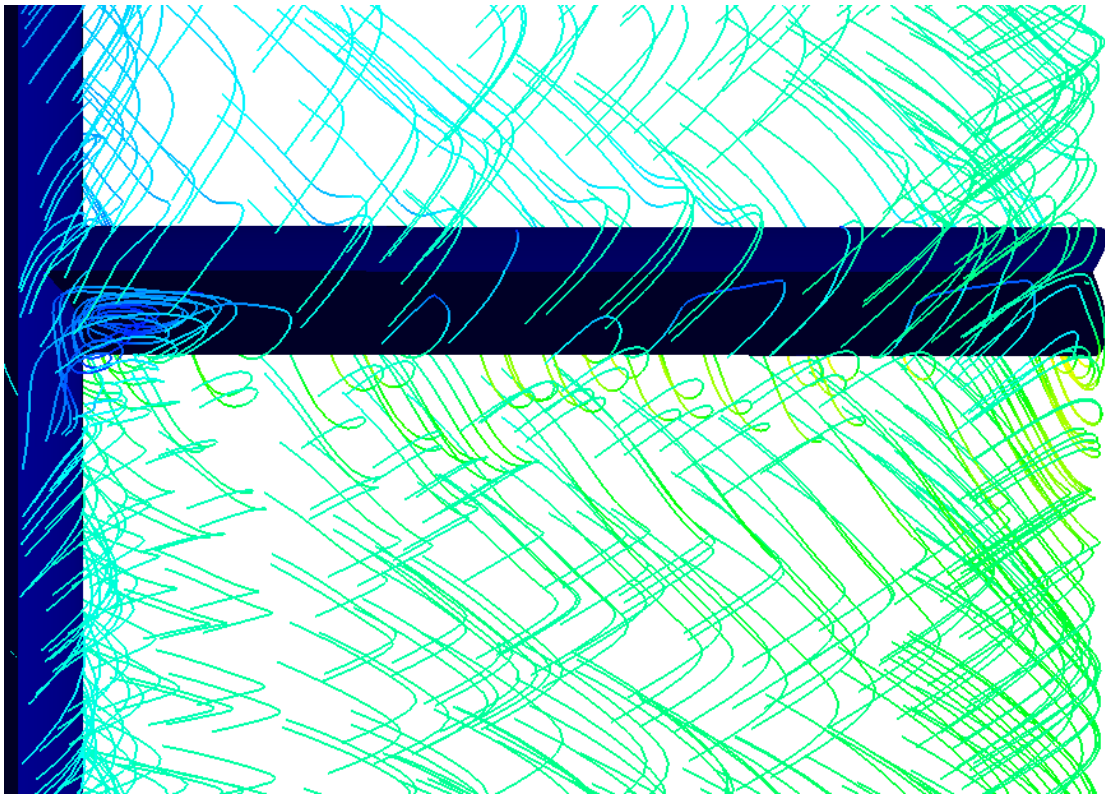


(β) Αδιάστατη ροπή

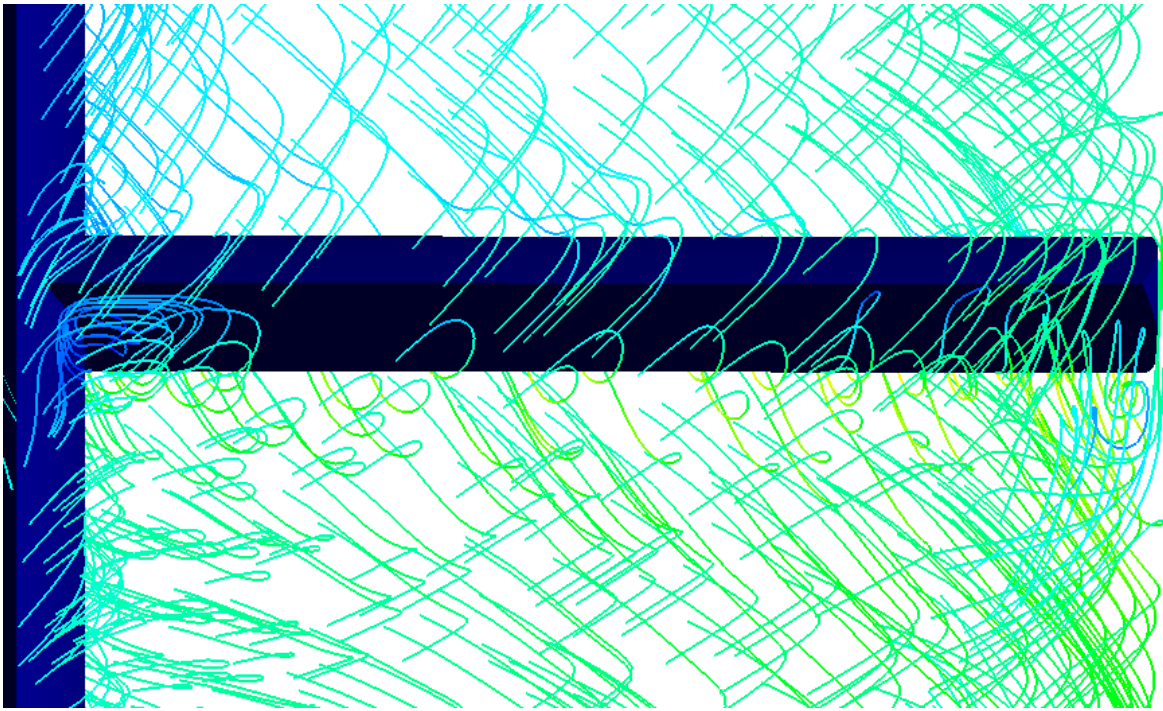


(γ) Βαθμός απόδοσης

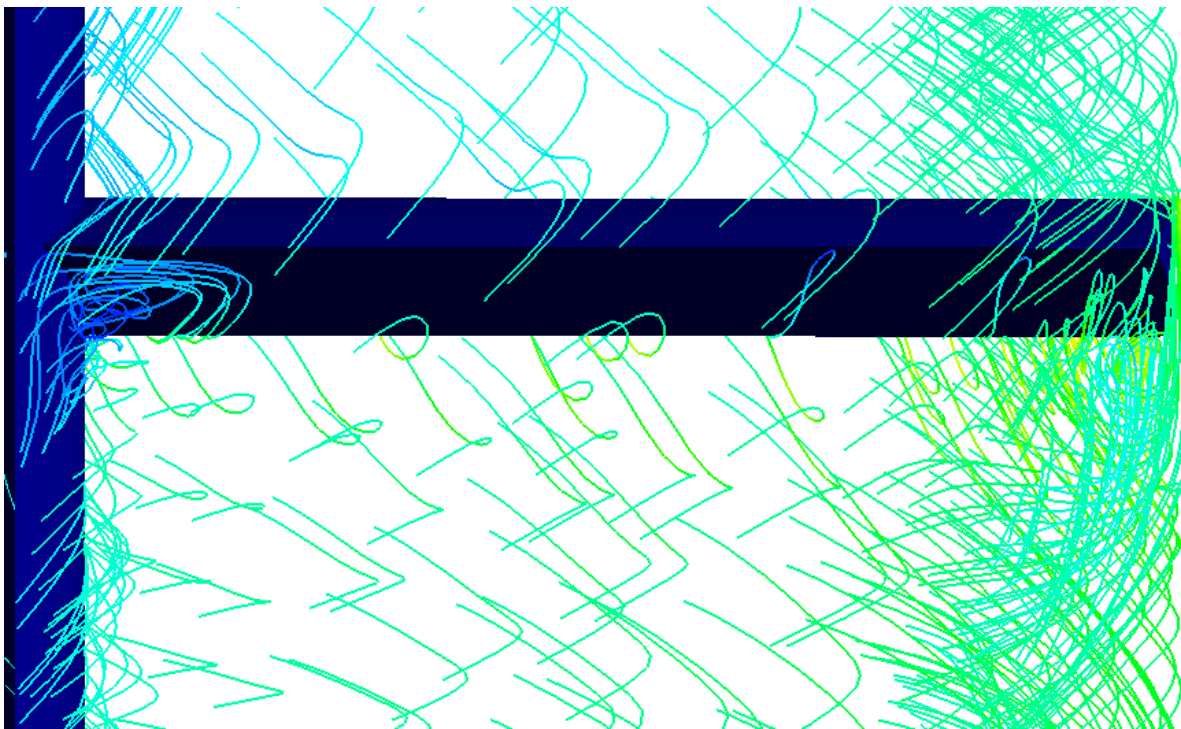
Διάγραμμα 7.2 - Διαγράμματα λειτουργίας για γεωμετρίες με διαφορετικό tip clearance



(α)

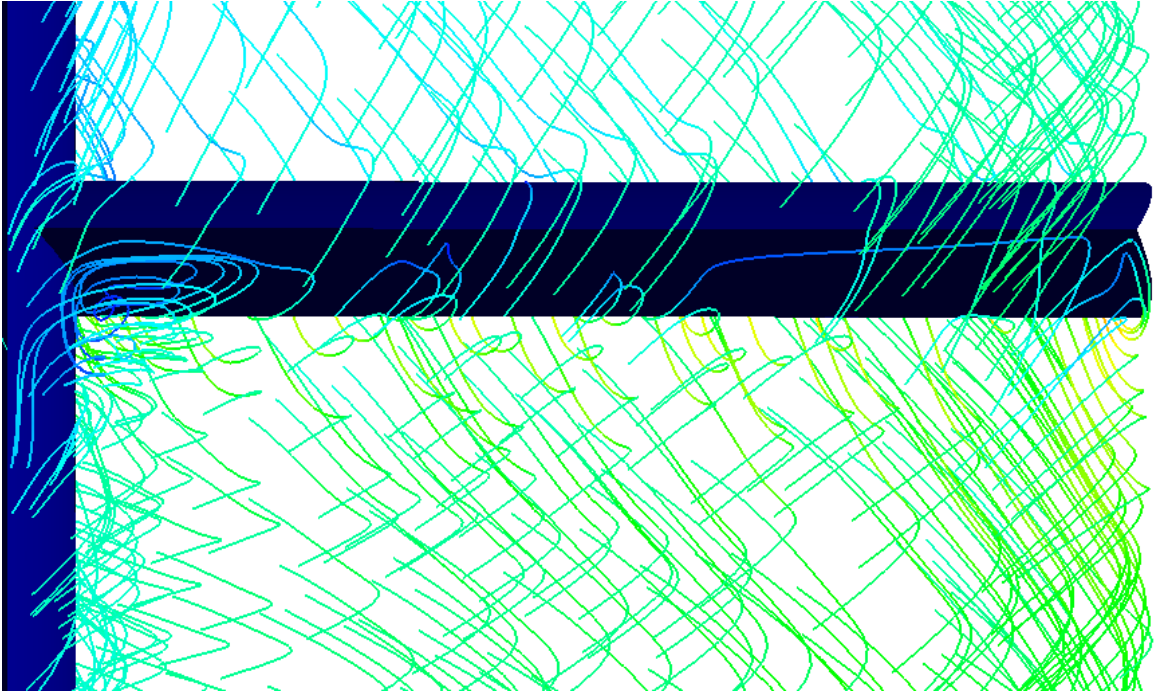


(β)

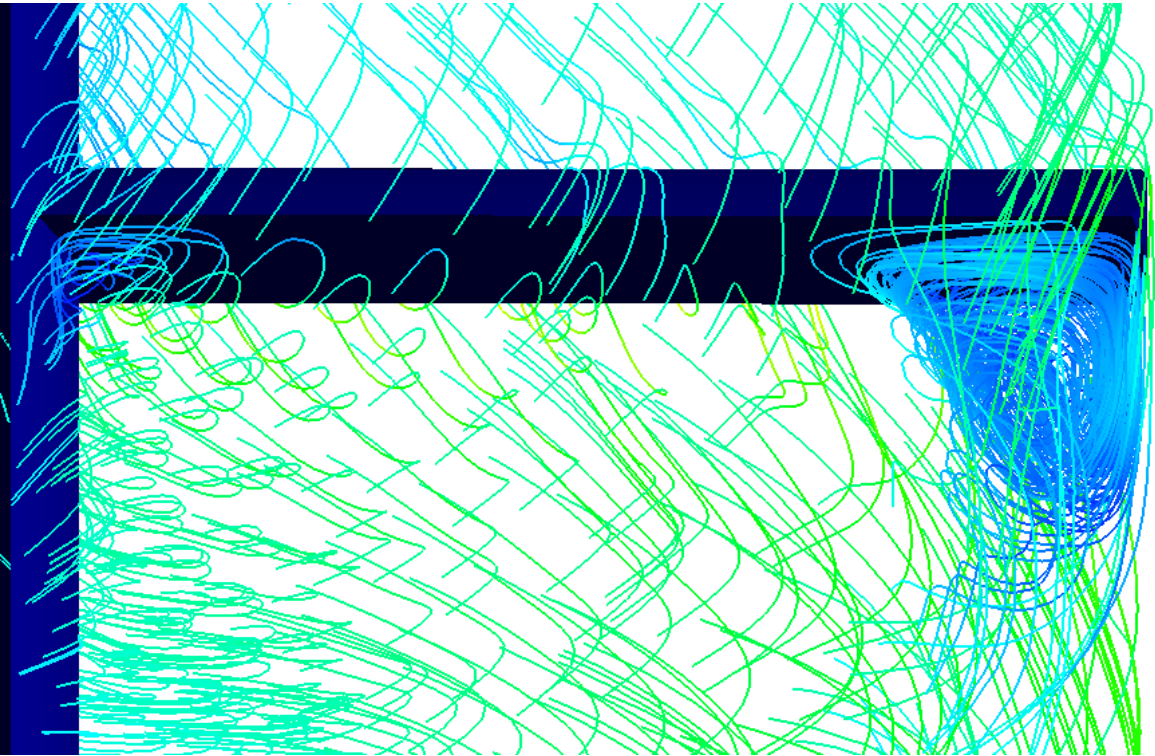


(γ)

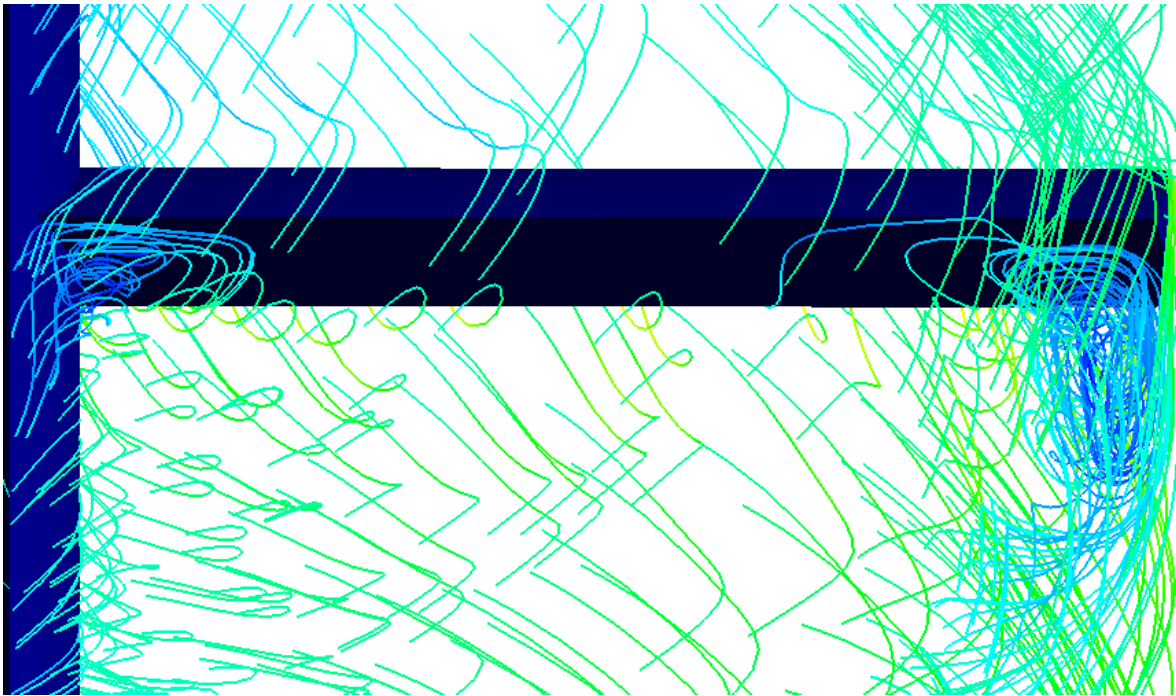
Εικόνα 7. 2- Ροή γύρω από το πτερόγιο για $\phi = 0.20$ (α) T.C. = 0% (β) T.C. = 1% (γ) T.C. = 2%



(a)



(b)



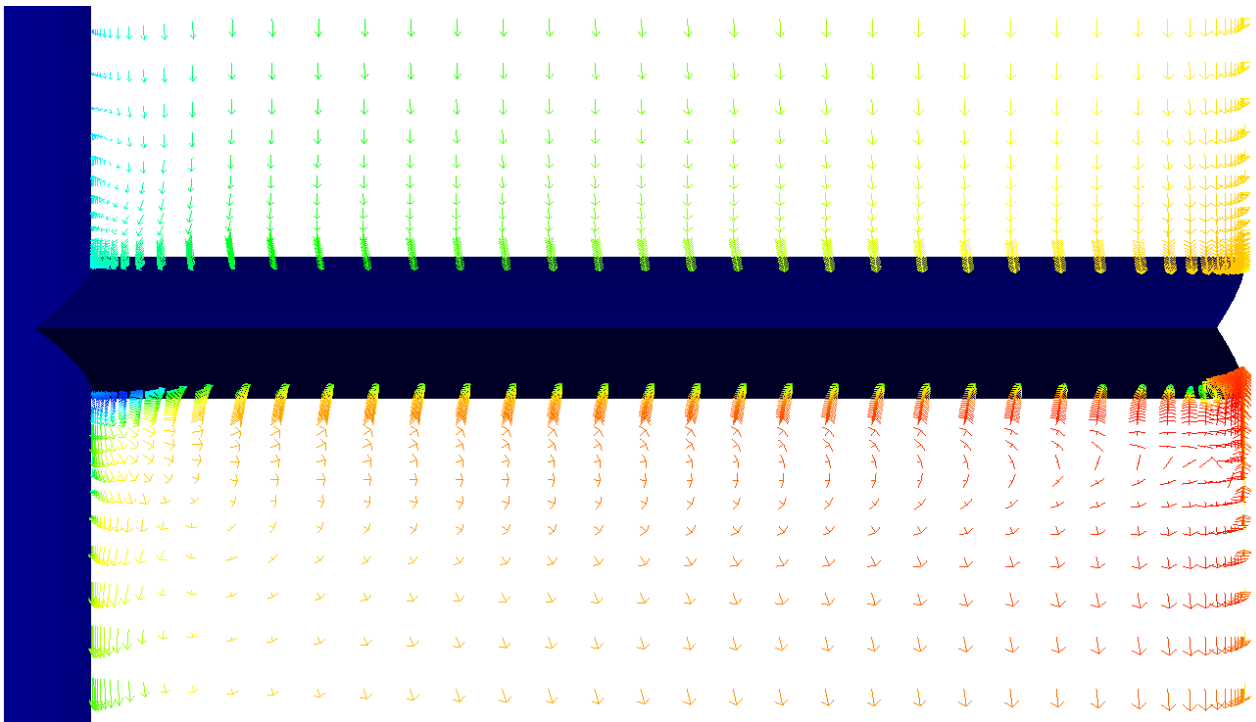
(γ)

Εικόνα 7.3 - Ροή γύρω από το περύγιο για $\phi = 0.25$ (α) T.C. = 0% (β) T.C. = 1% (γ) T.C. = 2%

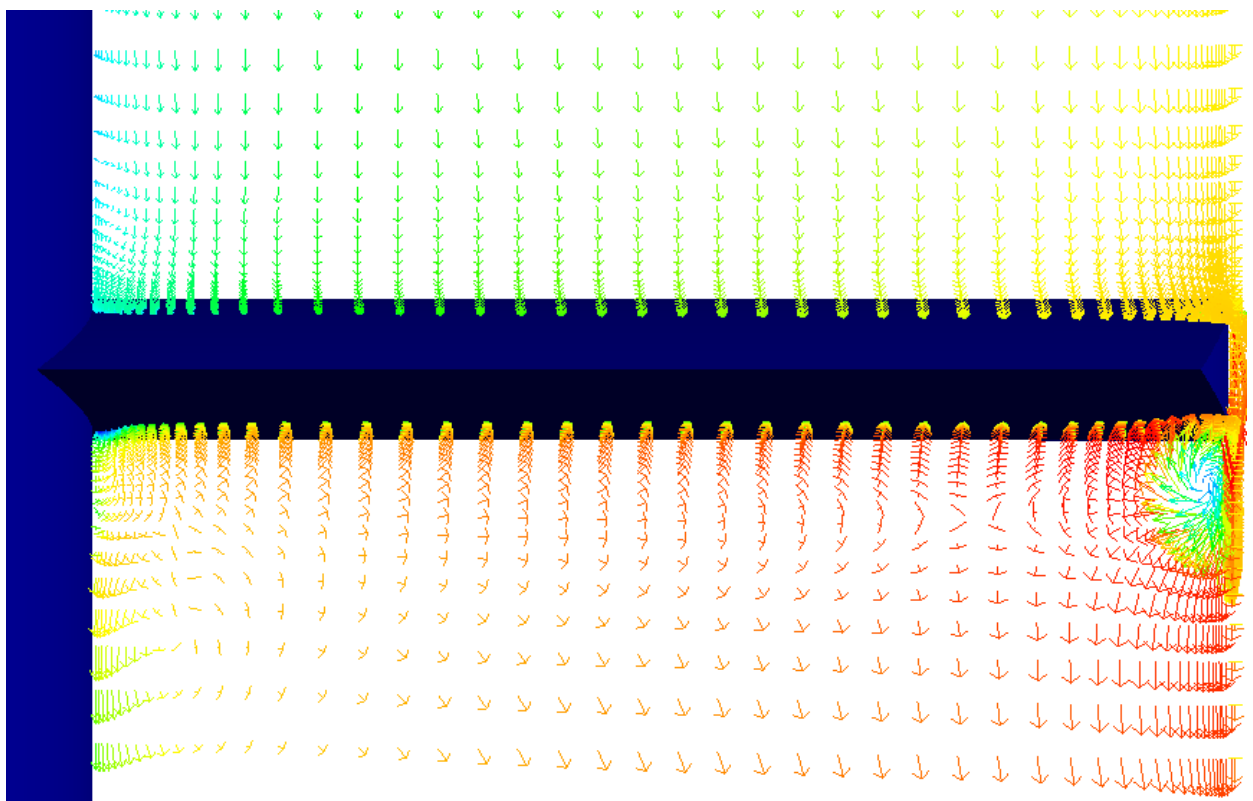
Στις Εικόνες 7.2 (α), (β), (γ) γίνεται οπτικοποίηση της ροής γύρω από το περύγιο. Η Εικόνα 7.2 (α) αφορά τη γεωμετρία χωρίς διάκενο, η Εικόνα 7.2 (β) αφορά τη γεωμετρία με διάκενο 1% και η Εικόνα 7.2 (γ) αφορά τη γεωμετρία με διάκενο 2%. Η παροχή του αέρα είναι η ίδια και στις τρεις περιπτώσεις ($\phi = 0.20$). Για τη συγκεκριμένη παροχή αέρα η γεωμετρία με tip clearance 1% αποδίδει τη μέγιστη ροπή - ελάχιστα πριν την έναρξη του Stall, ενώ οι άλλες δύο εξεταζόμενες γεωμετρίες βρίσκονται στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, πριν την ανάπτυξη της μέγιστης ροπής. Με απουσία διακένου η ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στη μηχανή διέρχεται εξολοκλήρου από το περύγιο. Εφόσον δεν υπάρχει διάκενο να διέλθει το ρευστό δεν σχηματίζεται στροβιλισμός στο άκρο του περυσγίου (Tip leakage vortex). Για τη μηχανή με tip clearance 1 % καθώς ο αέρας εξέρχεται από το διάκενο αναπτύσσει στροβιλισμό που προσπαθεί να αντισταθμίσει την αποκόλληση του οριακού στρώματος που έχει αρχίσει να εμφανίζεται στο άκρο του περυσγίου (relief effect). Στην μηχανή με Tip clearance 2%, σχηματίζεται στρόβιλος tip leakage vortex ο οποίος επιδρά αρνητικά στη ροή καθώς μειώνει την απόδοση της μηχανής.

Στις Εικόνες 7.3 (α), (β), (γ) οπτικοποιείται η ροή γύρω από το περύγιο για αδιάστατο συντελεστή παροχής ϕ ίσο με 0.25. Στη συγκεκριμένη παροχή η μηχανή με Tip clearance 1% βρίσκεται σε προχωρημένο "στολάρισμα". Η περίπτωση όπου το Tip clearance ισούται με 2% αποδίδει τη μέγιστη ροπή ενώ η γεωμετρία με μηδενικό διάκενο βρίσκεται ελάχιστα πριν την απόδοση της μέγιστης ροπής. Στην Εικόνα 7.3 (α) είναι εμφανή η αποκόλληση της ροής κοντά στην πλήμνη προς την πλευρά υποπίεσης. Επίσης στο σημείο αυτό τα μόρια του αέρα έχουν αμελητέα κινητική ενέργειας με αποτέλεσμα να συμπαρασύρονται από τα γειτονικά μόρια αέρα και να τείνουν να κινηθούν προς το άκρο του περυσγίου. Στην Εικόνα 7.3 (β) η ροή εγκαταλείπει το διάκενο με πολύ υψηλή ταχύτητα με αποτέλεσμα να προσκολλάται στο τοίχωμα του κελύφους και έτσι δεν δημιουργείται στροβιλισμός (tip leakage vortex) ικανός να αντισταθμίσει την αποκόλληση (relief effect). Στην Εικόνα 7.3 (γ) παρατηρείται ότι ο tip leakage vortex περιορίζει

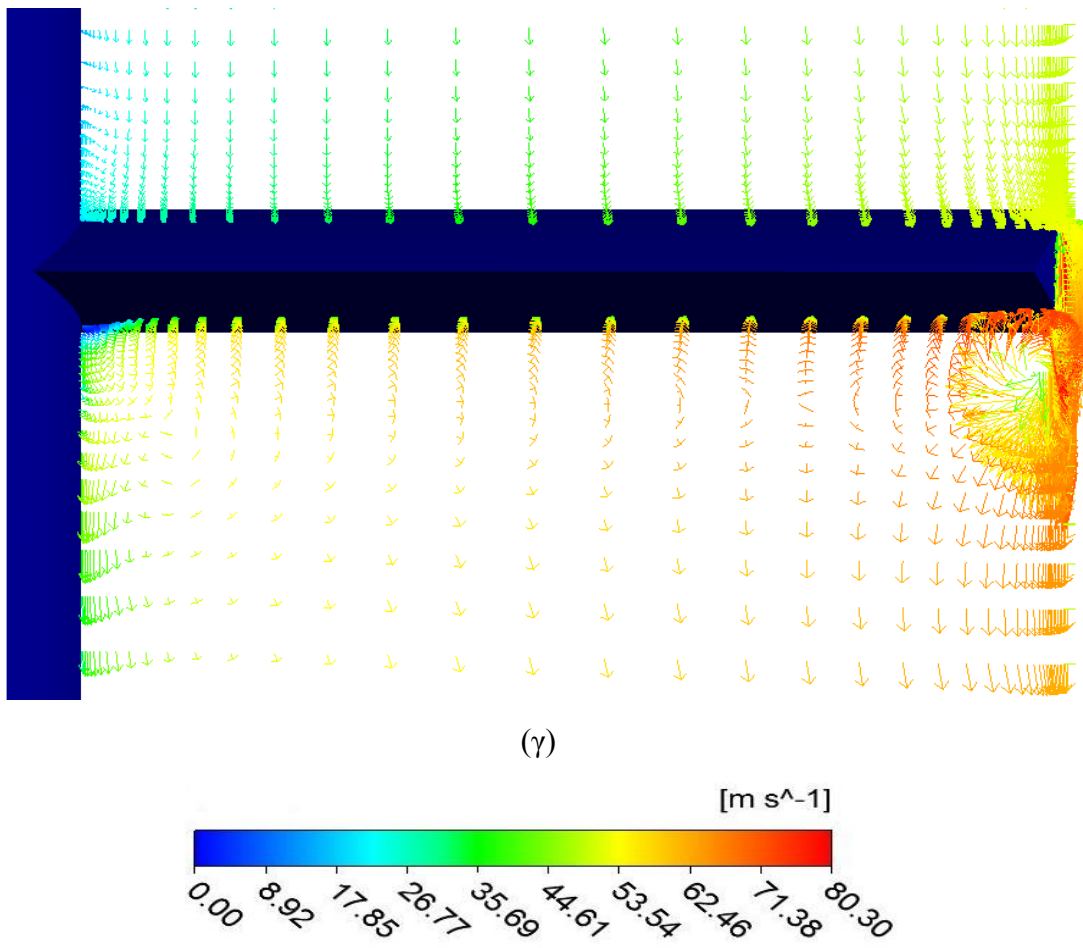
την αποκόλληση του οριακού στρώματος καθώς τείνει να την αντισταθμίσει και έτσι η αποκόλληση καταλαμβάνει μικρότερο τμήμα της πλευράς υποπίεσης (suction surface).



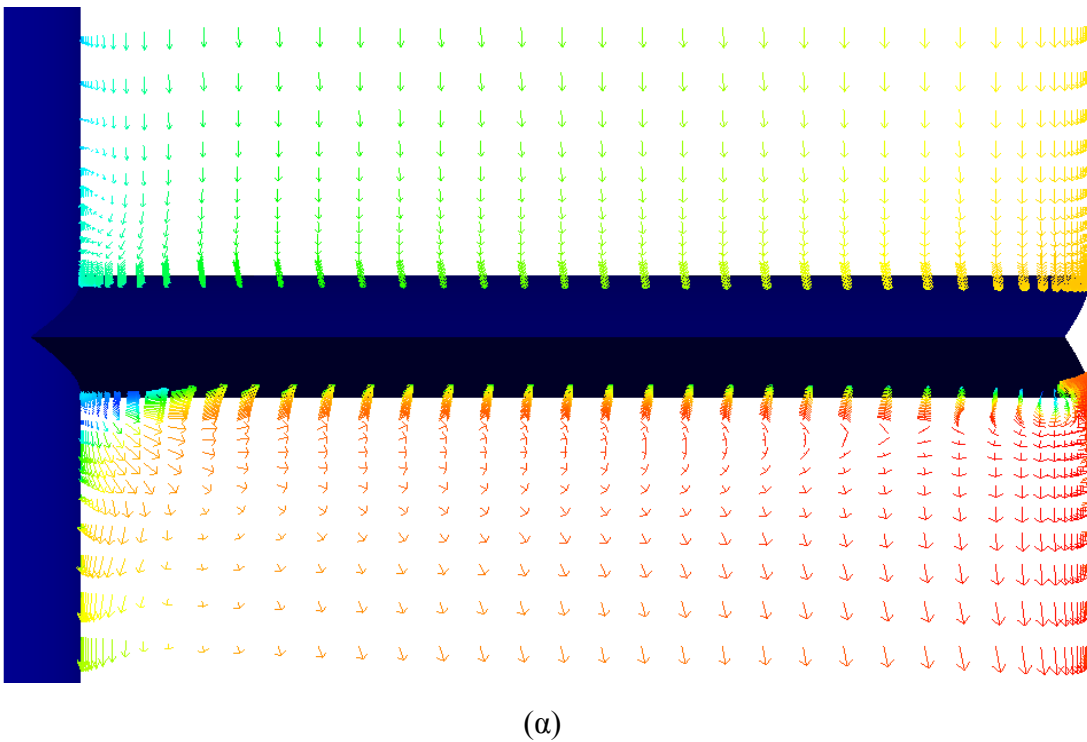
(α)

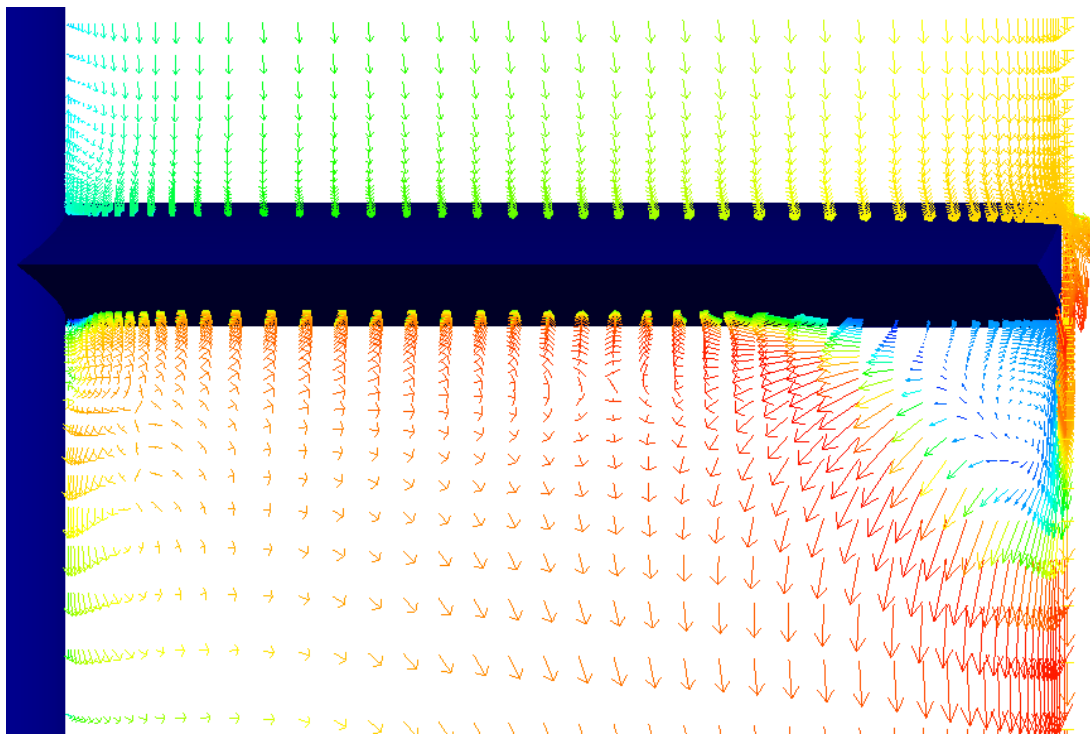


(β)

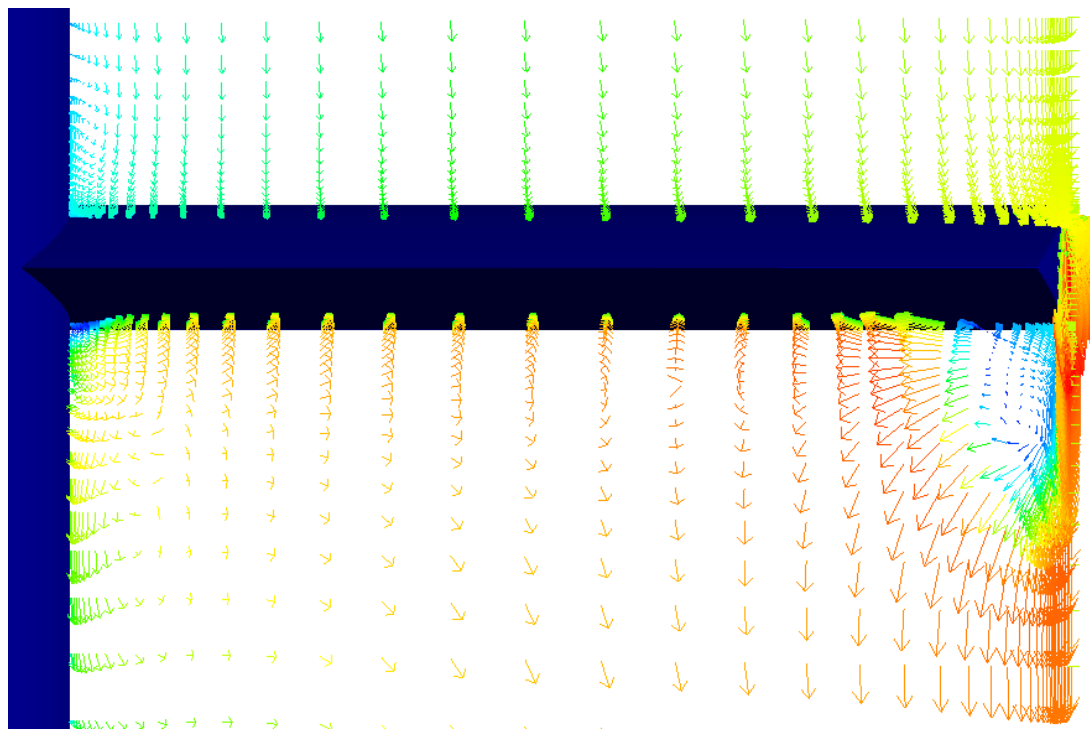


Εικόνα 7. 4 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στο 50% του μήκους της χορδής του πτερυγίου για $\phi = 0.20$ (α) T.C. = 0% (β) T.C. = 1% (γ) T.C. = 2%

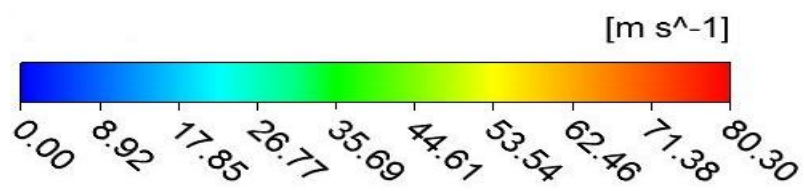




(β)



(γ)



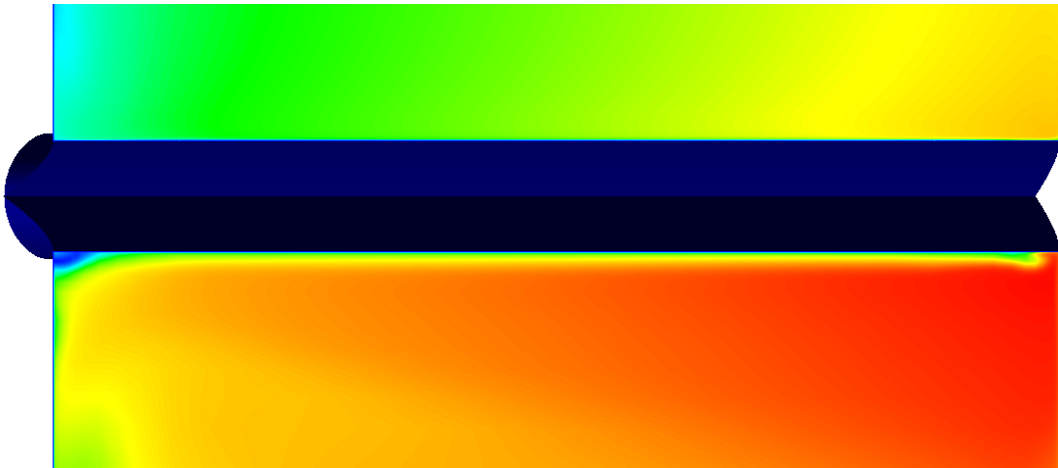
Εικόνα 7. 5 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στο 50% του μήκους της χορδής του περυγίου για $\varphi = 0.25$ (α) T.C. = 0% (β) T.C. = 1% (γ) T.C. = 2%

Οι Εικόνες 7.4 (α), (β), (γ) απεικονίζουν το διάνυσμα της ταχύτητας σε επιφάνεια κάθετη στο μέσο της χορδής του πτερυγίου για περιπτώσεις με διάκενο 0%, 1% και 2% αντίστοιχα. Η παροχή είναι η ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις και ισοδυναμεί με αδιάστατο αριθμό παροχής $\phi = 0.20$. Για την περίπτωση μηδενικού διακένου (Εικόνα 7.4 (α)) η μηχανή λειτουργεί στην περιοχή πριν την εμφάνιση του φαινομένου της αποκόλλησης. Για τη μηχανή με μηδενικό διάκενο, δεν σχηματίζεται στροβιλισμός (tip leakage vortex) γεγονός που συμβάλει θετικά στην εξέλιξη της ροής στο άκρο (tip) του πτερυγίου. Όμως στη περίπτωση αυτή, η αποκόλληση του οριακού στρώματος ξεκινάει στην περιοχή του πτερυγίου κοντά στην πλήμνη. Η περιφερειακή ταχύτητα της ροής στη περιοχή κοντά στη πλήμνη είναι μικρότερη λόγω μικρότερης ακτίνας σε σχέση με το άκρο του πτερυγίου. Από τα τρίγωνα ταχυτήτων προκύπτει ότι η γωνία πρόπτωσης της ροής στην περιοχή κοντά στην πλήμνη είναι μεγαλύτερη προκαλώντας αποκόλληση οριακού στρώματος.

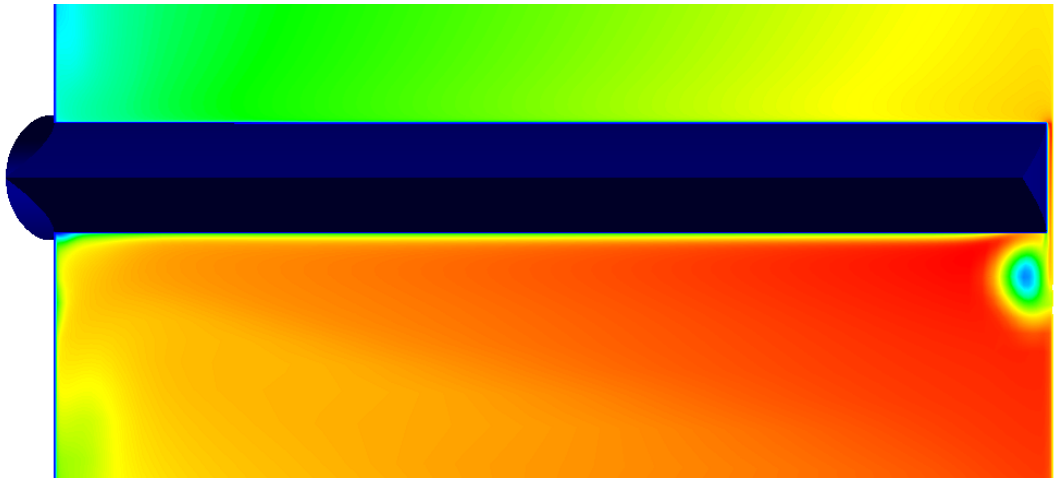
Σε πραγματικές μηχανές Wells όπου υπάρχει Tip clearance, είναι εμφανές ότι η ροή που διέρχεται από το διάκενο (tip leakage flow) έχει την τάση να δημιουργεί στροβιλισμό (Tip leakage vortex) ωρολογιακής φοράς στην περιοχή κάτω από την επιφάνεια υποπίεσης του πτερυγίου. Καθώς αυξάνεται το μέγεθος του διακένου, ο στροβιλισμός που προκαλείται λόγω της ροής που διέρχεται από αυτό (tip leakage flow) αυξάνεται σε μέγεθος και αλληλεπιδρά με μεγαλύτερο τμήμα του εκπετάσματος του πτερυγίου στην πλευρά υποπίεσης (suction surface) (Εικόνα 7.4(β),(γ)).

Στην περίπτωση tip clearance = 1%, τα μπλε διανύσματα ταχύτητας υποδηλώνουν την αποκόλληση που εμφανίζεται στο άκρο του πτερυγίου. Η ροή καθώς εξέρχεται από το διάκενο με μεγάλη ταχύτητα (κόκκινα διανύσματα) προσπαθεί να περιορίσει την αποκόλληση οριακού στρώματος στο tip (Εικόνα 7.4(β)). Για τη μηχανή με tip clearance 2% λόγω της μικρότερης διαφοράς πίεσης μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας του πτερυγίου ο στρόβιλος που προκαλείται λόγω της δευτερογενούς ροής που διέρχεται από το διάκενο δεν έχει μεγάλη ένταση. Καθώς όμως το διάκενο είναι μεγαλύτερο υπάρχει περισσότερος χώρος και έτσι αναπτύσσεται μεγαλύτερος στροβιλισμός ο οποίος προσκολλάται στο άκρο του πτερυγίου προς την πλευρά υποπίεσης (suction surface) και διαταράσσει τη ροή.

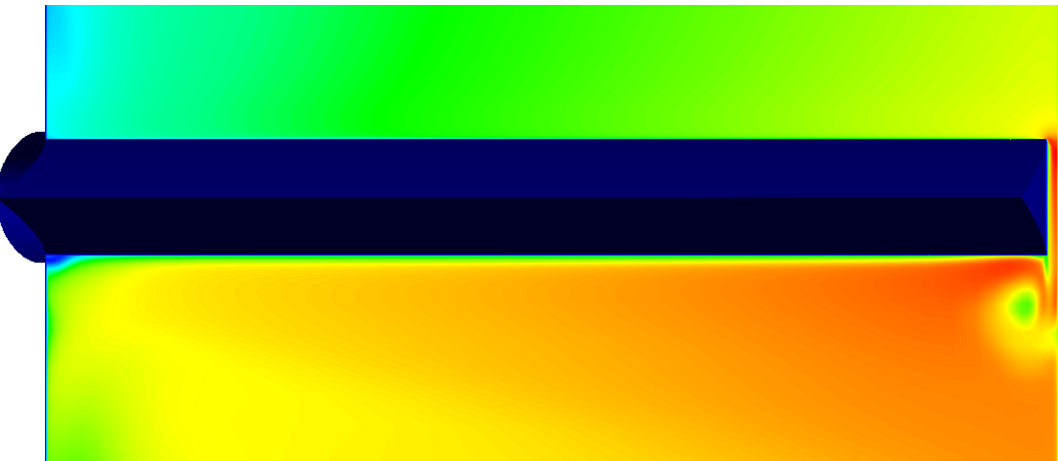
Στην Εικόνες 7.5 (α), (β), (γ) απεικονίζεται ξανά το διάνυσμα της ταχύτητας σε επιφάνεια κάθετη στο μέσο της χορδής του πτερυγίου για διάκενο 0%, 1% και 2%. Η παροχή είναι ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις και ισοδυναμεί με αδιάστατο συντελεστή παροχής $\phi = 0.25$. Για τη συγκεκριμένη παροχή η μηχανή με μηδενικό διάκενο και με tip clearance 2% αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ροπή. Οι μηχανές με διάκενο 1% βρίσκεται σε κατάσταση προχωρημένου stall (deep stall). Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει διάκενο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.5 (α) η αποκόλληση της ροής κοντά στην περιοχή της πλήμνης εντείνεται. Στην περίπτωση όπου το διάκενο είναι 1% (Εικόνα 7.5 (β)) ο αέρας εξέρχεται από το διάκενο σαν από ακροφύσιο. Λόγω της υψηλής ταχύτητάς του παραμένει προσκολλημένος στο κέλυφος της μηχανής και έτσι η αλληλεπίδρασή του με το πτερύγιο είναι αμελητέα. Αντίθετα για το διάκενο 2%, ο στροβιλισμός επιδρά θετικά καθώς αλληλεπιδρά με το πτερύγιο περιορίζοντας την εμφάνιση αποκόλλησης κοντά στο άκρο του πτερυγίου (relief effect). Οι παρατηρήσεις που διατυπώνονται στο σημείο αυτό επιβεβαιώνονται από τις Εικόνες 7.3 (α), (β), (γ).



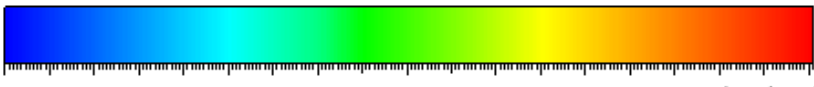
(α)



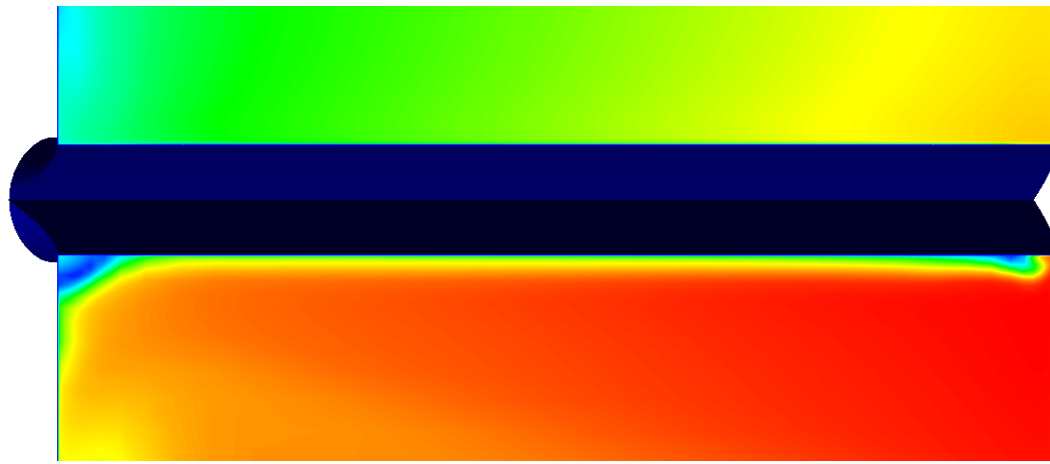
(β)



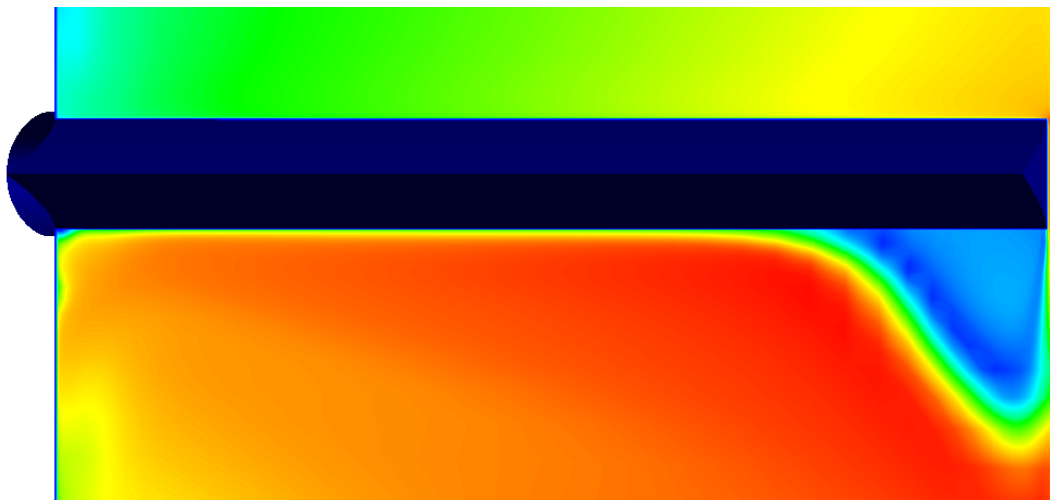
(γ)



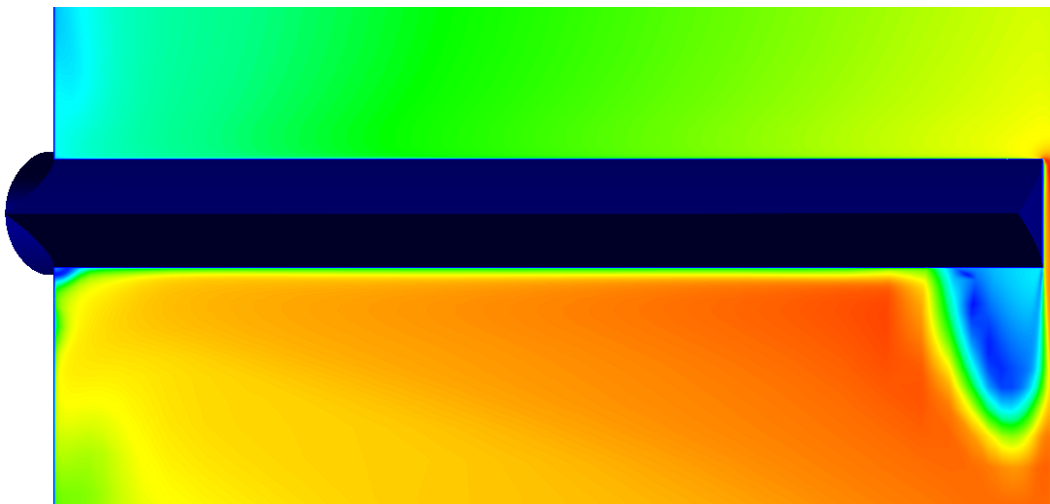
Εικόνα 7. 6 - Κατανομή ταχύτητας σε τομή στο μέσο του περυγίου για $\phi = 0.20$ και tip clearance (α) 0% (β) 1% (γ) 2%



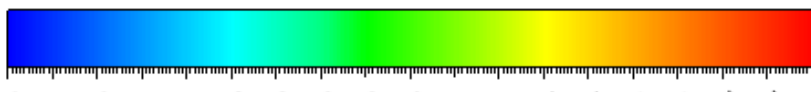
(α)



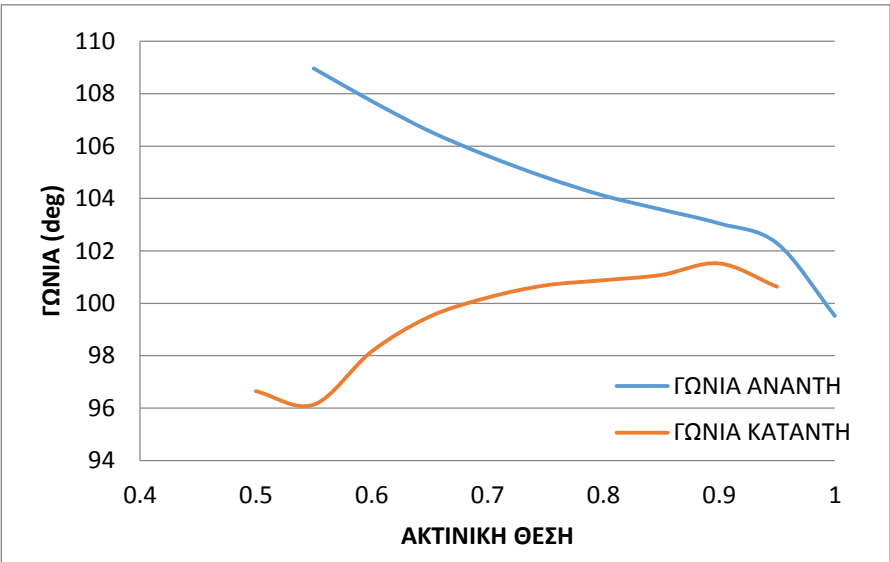
(β)



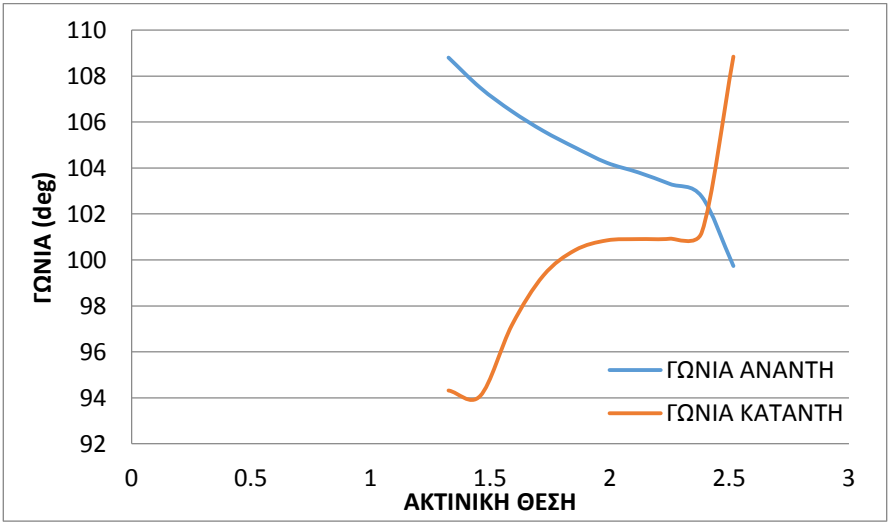
(γ)



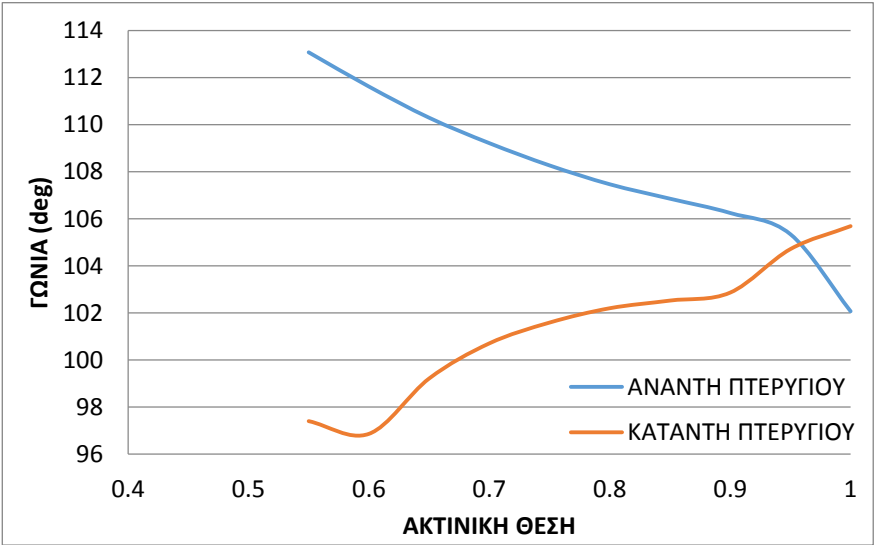
Εικόνα 7. 7 - Κατανομή ταχύτητας σε τομή στο μέσο του περυγίου για $\varphi = 0.25$ και tip clearance (α) 0% (β) 1% (γ) 2%



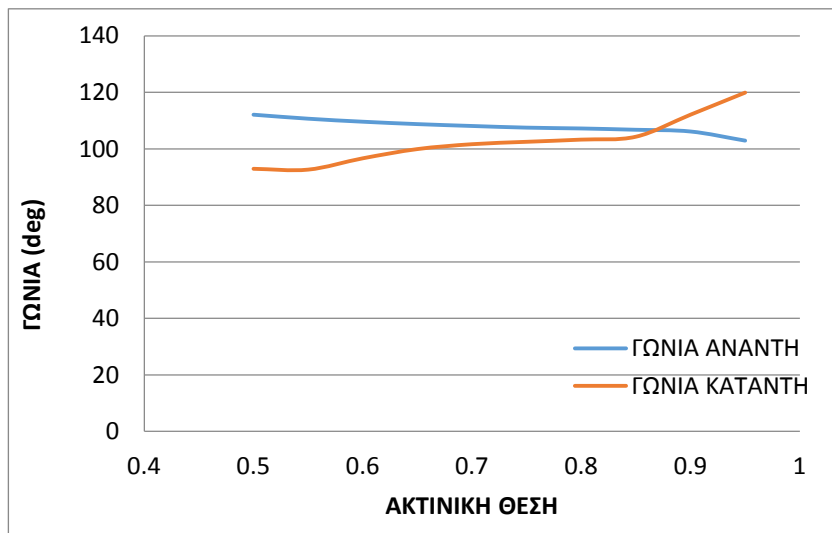
(α)



(β)



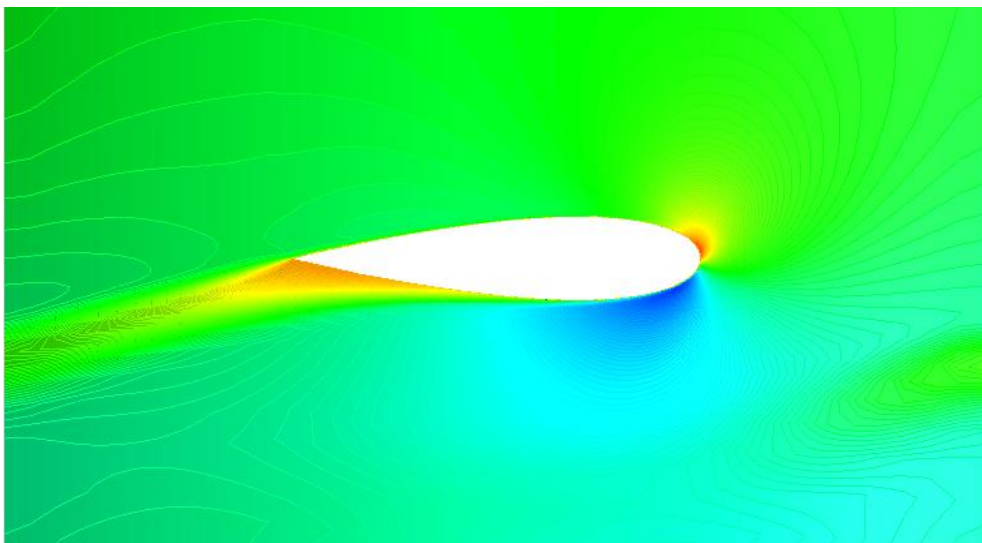
(α)



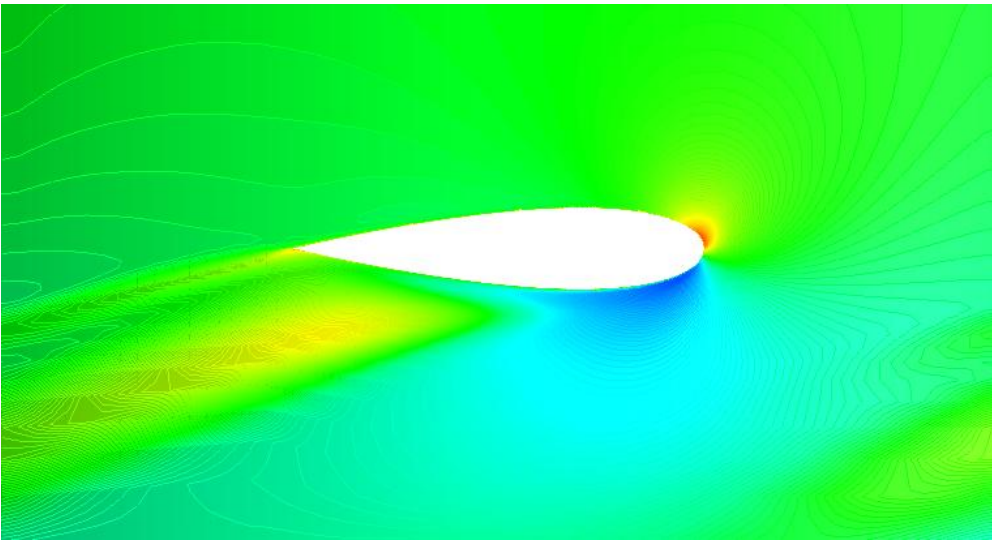
(β)

Στην Εικόνα 7.8 (α), (β), (γ) απεικονίζεται η κατανομή της περιφερειακής ταχύτητας σε τομή στο άκρο του πτερυγίου. Η τιμή του αδιάστατου συντελεστή παροχής φ εξακολουθεί να είναι ίση με 0.20. Η Εικόνα 7.6 (α) αναφέρεται στην γεωμετρία με 0% διάκενο. Παρατηρείται ότι η ροή επιβραδύνεται από την ακμή προσβολής προς την ακμή εκφυγής του πτερυγίου, έχοντας μικρή τάση για αποκόλληση στην ακμή εκφυγής. Οι Εικόνες 7.6 (β) και (γ) αναφέρονται στην περίπτωση διακένου 1% και 2% αντίστοιχα. Είναι εμφανής η ύπαρξη στροβιλισμού (tip leakage vortex) στην περιοχή κάτω από την επιφάνεια υποπίεσης του πτερυγίου (pressure surface).

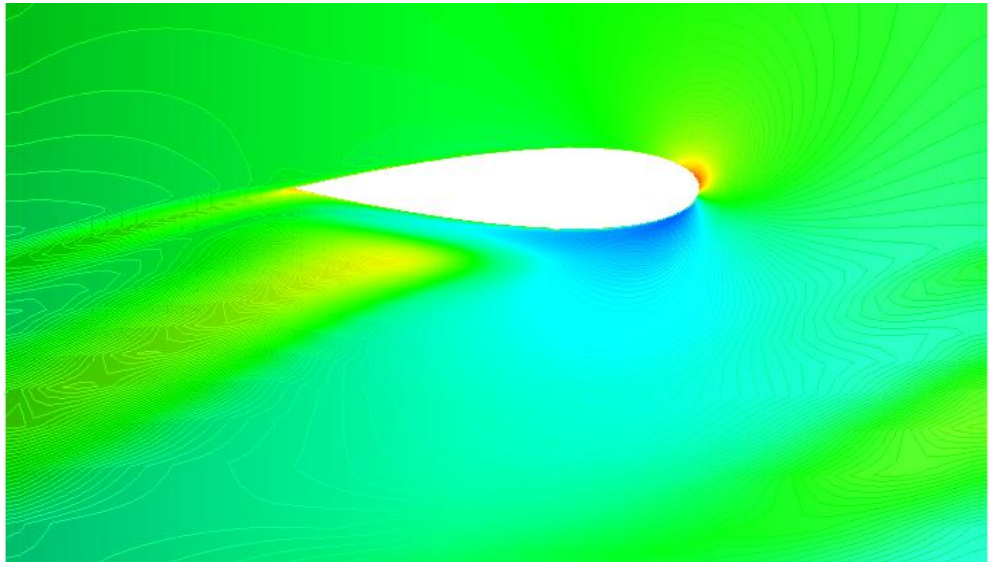
Στην Εικόνα 7.9 παρουσιάζεται η κατανομή της περιφερειακής ταχύτητας του αέρα γύρω από τομή του πτερυγίου κοντά στο άκρο του (περίπου στο 95% του μήκους του εκπετάσματος). Η διερεύνηση γίνεται για αδιάστατη παροχή $\varphi = 0.25$. Η γεωμετρία με μηδενικό διάκενο και tip clearance = 1% στη συγκεκριμένη παροχή αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ροπή. Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετώνται η αποκόλληση είναι έντονη κυρίως στις περιπτώσεις που υπάρχει διάκενο αποδεικνύοντας κατ' αυτό τον τρόπο την επίδρασή του στην αποκόλληση.



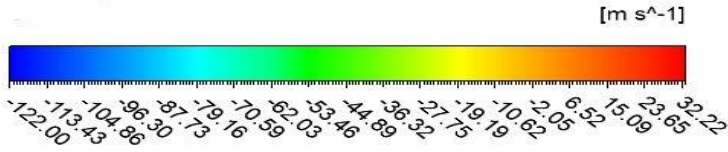
(α)



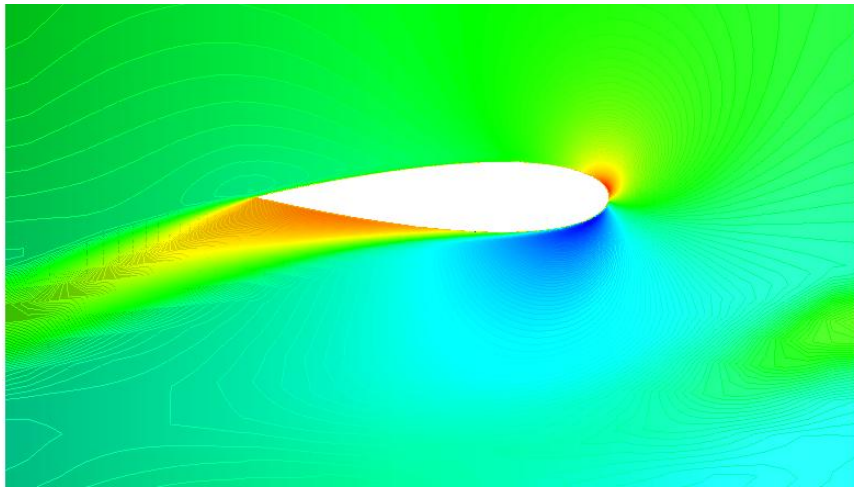
(β)



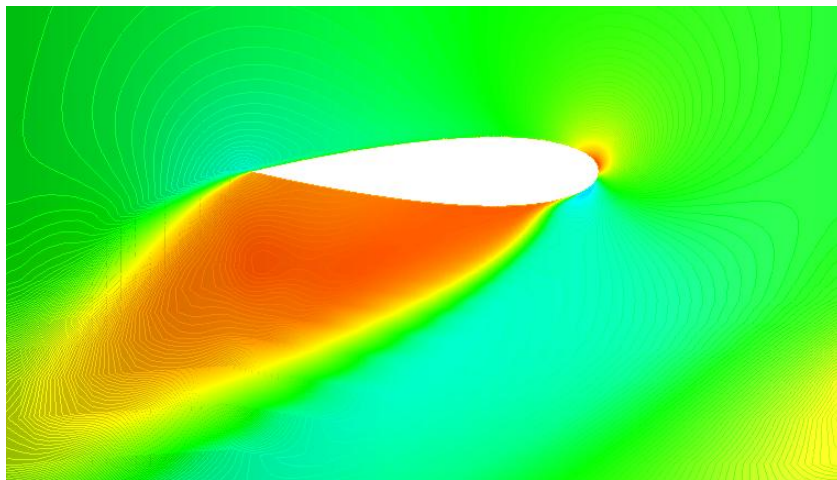
(γ)



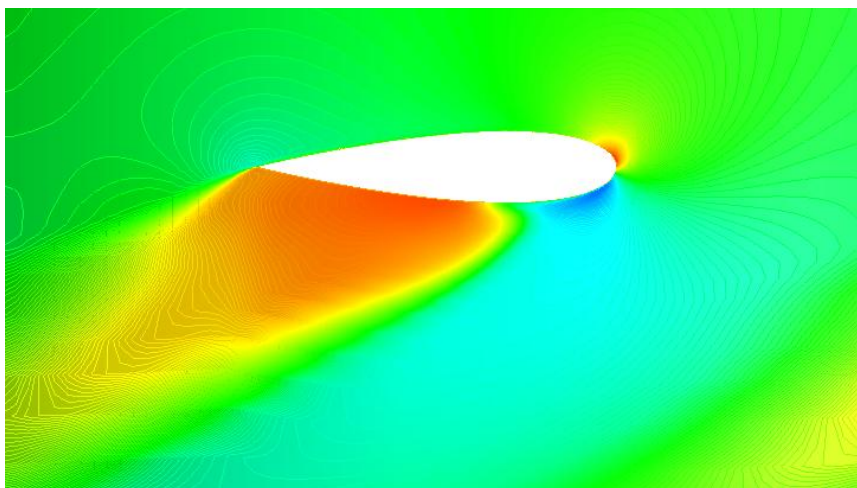
Εικόνα 7. 8 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στο 95% της ακτίνας του πτερυγίου για $\phi = 0.20$ (α) T.C. = 0% (β) T.C. = 1% (γ) T.C. = 2



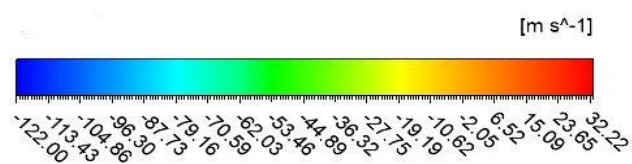
(α)



(β)

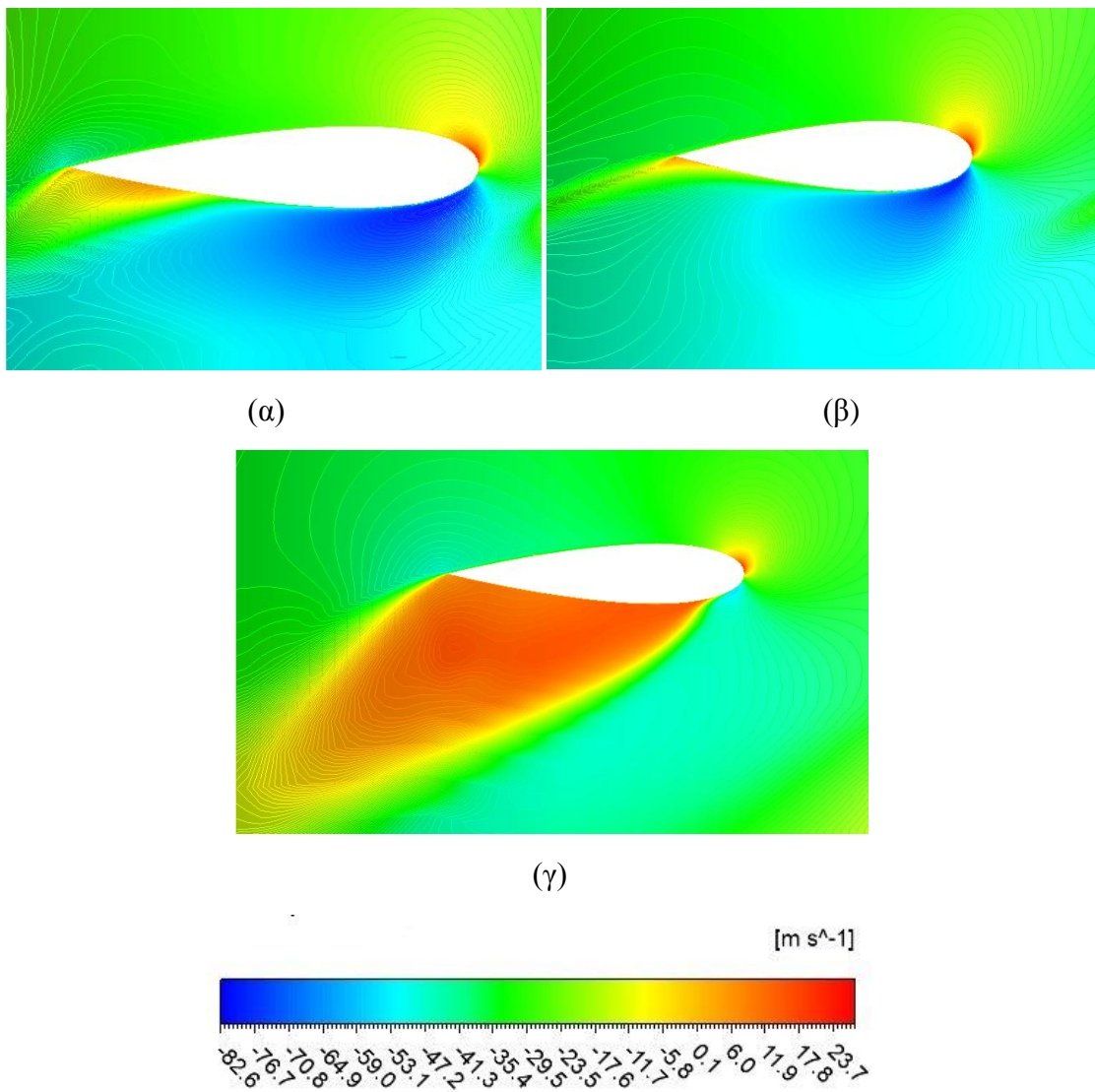


(γ)



Εικόνα 7.9 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στο 95% της ακτίνας του περυγίου για $\phi = 0.25$ (α) T.C. = 0% (β) T.C. = 1% (γ) T.C. = 2%

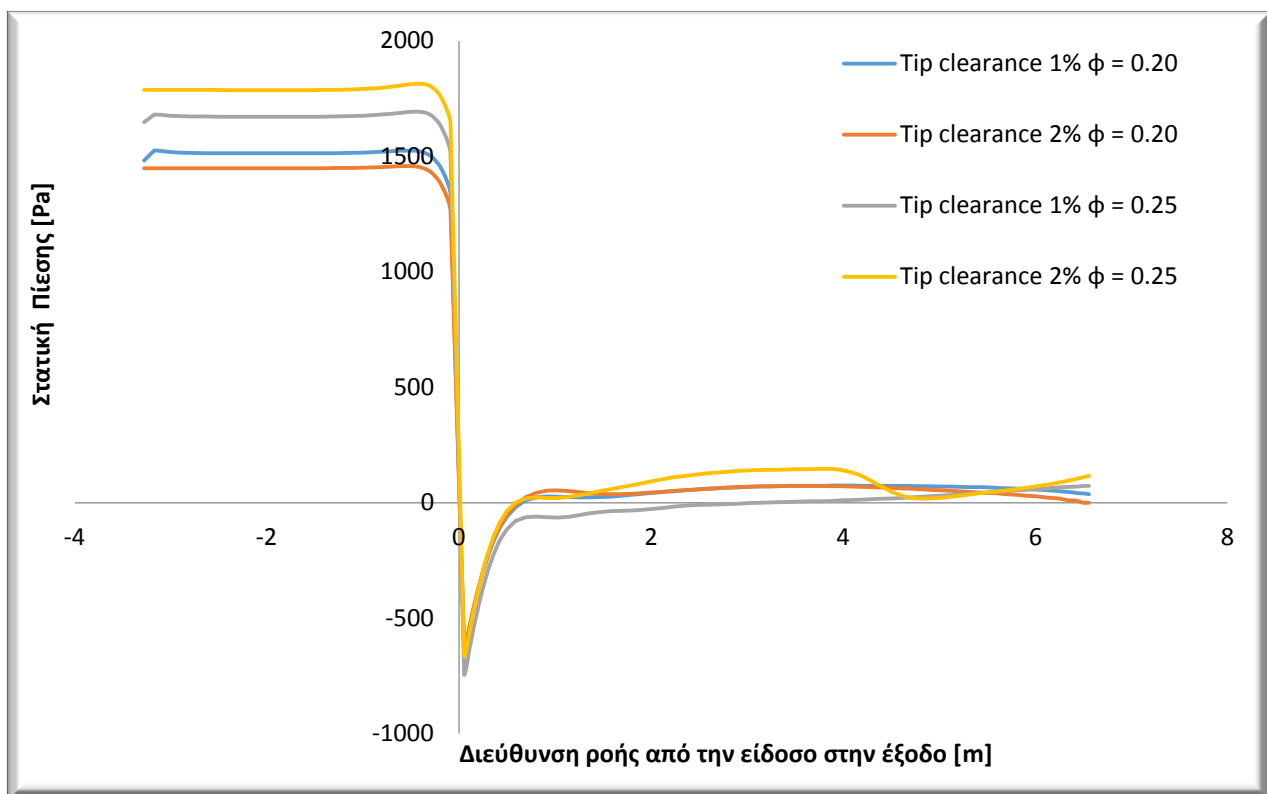
Στις Εικόνες 7.10 (α), (β), (γ) εξετάζεται η επίδραση του διακένου στο "στολάρισμα" της μηχανής. Συγκεκριμένα εξετάζεται η μηχανή με tip clearance = 1% και αδιάστατο συντελεστή παροχής $\phi = 0.25$. Στην τομή κοντά στη πλήμνη υφίσταται αποκόλληση του οριακού στρώματος λόγω αυξημένης παροχής όμως τείνει να αποκαθίσταται στο μέσο του εκπετάσματος (Εικόνα 7.8 (β)). Στο άκρο του πτερυγίου επανέρχεται το φαινόμενο της αποκόλλησης αυτή τη φορά έχοντας μεγαλύτερη ένταση γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη διακένου. Η συγκεκριμένη παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα πως το διάκενο ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για το "στολάρισμα" της μηχανής.



Εικόνα 7. 10 - Κατανομή περιφερειακής ταχύτητας για tip clearance = 1% και $\phi = 0.25$ σε τομές (α) 5% της ακτίνας, (β) 50% της ακτίνας, (γ) 95% της ακτίνας

Στο Διάγραμμα 7.3 εξετάζεται η συμπεριφορά της στατικής πίεσης κατά μήκος της ροής από την είσοδο έως την έξοδο της μηχανής. Συγκεκριμένα η μελέτη εστιάζεται στις δύο γεωμετρίες της μηχανής Wells με Tip clearance 1% και 2% και για δύο περιπτώσεις αδιάστατου αριθμού παροχής ϕ ίσο με 0.20 και 0.25. Γενικά το ρευστό έχει υψηλή τιμή στατικής πίεσης κατά την είσοδό του στην μηχανή Wells, όταν συναντήσει το πτερύγιο η στατική πίεση πέφτει απότομα και στην συνέχεια ισορροπεί σε μία τιμή λίγο πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση μέχρις ότου να εξέλθει από την μηχανή. Όσο μεγαλύτερη είναι η παροχή του αέρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση πίεσης όταν ο αέρας συναντάει το

περύγιο. Στην περίπτωση όπου η αδιάστατη παροχή είναι ίση με 0.20, η στατική πίεση στην είσοδο της μηχανής για την περίπτωση όπου το διάκενο είναι ίσο με 1% παίρνει μεγαλύτερες τιμές από την περίπτωση όπου το διάκενο ισούται με 2%. Η αυξημένη στατική πίεση δικαιολογείται καθώς το μικρότερο διάκενο ισοδυναμεί με μεγαλύτερη αντίσταση ροής. Όταν ο αδιάστατος αριθμός παροχής πάρει την τιμή 0.25, που σημαίνει ότι η παροχή του εισερχόμενου αέρα στον στρόβιλο Wells αυξάνεται, η στατική πίεση στην είσοδο αυξάνεται. Αυτή τη φορά στη γεωμετρία με μεγαλύτερο διάκενο (Tip clearance 2%) η στατική πίεση στην είσοδο έχει μεγαλύτερη τιμή συγκριτικά με τη περίπτωση του μικρού διακένου (Tip clearance 1%). Η αύξηση της πίεσης οφείλεται στο γεγονός ότι στη συγκεκριμένη παροχή παρουσιάζονται τυρβώδη ροϊκά φαινόμενα έτσι η στατική πίεση αυξάνεται προκειμένου να μπορέσει να ανταπεξέλθει. Κατά την έξοδο από το περύγιο η στατική πίεση μειώνεται και έχει τιμή λίγο μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση. Στην περίπτωση του αδιάστατου αριθμού ϕ ίσου με 0.25, η πίεση έχει διακυμάνσεις κατά την έξοδο λόγω των στροβιλισμών που οφείλονται στην τύρβη.



Διάγραμμα 7. 3 - Στατική πίεση κατά μήκος της ροής από την είσοδο στην έξοδο

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά το σχεδιασμό στροβιλομηχανής Wells για συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Η μηχανή Wells τοποθετείται εντός της συσκευής Ταλαντευόμενης Στήλης Ύδατος - Oscillating Water Column (OWC) με σκοπό την μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μηχανή Wells έχει το ρόλο του μετατροπέα της διαθέσιμης ενέργειας του εγκλωβισμένου αέρα στη συσκευή σε μηχανική ενέργεια ώστε να περιστραφεί ο άξονας της γεννήτριας. Για τον σχεδιασμό, ώστε η μηχανή να λειτουργεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και παροχής, γίνεται χρήση του Διαγράμματος Cordier.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σημαντικό αντικείμενο διερεύνησης αποτελούν οι γεωμετρικές παράμετροι της μηχανής και πώς αυτές επιδρούν στην απόδοσή της. Συγκεκριμένα, η παράμετρος Solidity είναι ένα μέτρο για το κατά πόσο τα πτερύγια αποτελούν φραγμό στη ροή. Κατόπιν διερεύνησης και υπολογιστικής επίλυσης συμπεραίνεται ότι με την αύξηση του solidity επιτυγχάνεται αύξηση στην πτώση πίεσης του αέρα που διέρχεται από τη μηχανή. Το ίδιο ισχύει και για την ροπή που αποδίδει ο ρότορας της μηχανής στον άξονα της γεννήτριας καθώς αυξημένο solidity σημαίνει μηχανή με περισσότερα ή μεγαλύτερα πτερύγια. Όμως από τη συγκεκριμένη διερεύνηση επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα που αναφέρεται και βιβλιογραφικά (Raghunathan). Οι ιδανικές τιμές που μπορεί να πάρει η παράμετρος solidity είναι της τάξης του 0.50 - 0.55. Σε διαφορετική περίπτωση, η μηχανή έχει μικρότερο βαθμό απόδοσης γεγονός που οφείλεται στην έντονη αποκόλληση οριακού στρώματος αλλά και στην απώλεια κινητικής ενέργειας.

Μία σημαντική γεωμετρική παράμετρος αφορά τον λόγο της διαμέτρου της πλήμνης προς την διάμετρο του ρότορα, (hub to tip ratio). Εξετάζονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις μηχανής Wells με διαφορετικό hub to tip ratio και σταθερό solidity. Αυτό που μεταβάλλεται με την αλλαγή της παραμέτρου είναι ουσιαστικά η διάμετρος της πλήμνης διότι η διάμετρος του ρότορα διατηρείται σταθερή. Συμπεραίνεται ότι αυξάνοντας την διάμετρο της πλήμνης η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει για μεγαλύτερο εύρος παροχών με μικρότερο βαθμό απόδοσης.

Τέλος εξετάζεται η επίδραση λόγω της παρουσίας διακένου μεταξύ του ακροπτερυγίου και του κελύφους της μηχανής. Το μέγεθος του διακένου ορίζεται ως επί της εκατό ποσοστό του μήκους της χορδής του πτερυγίου. Γενικότερα η βιβλιογραφία προτείνει τιμές διακένου έως 2% ενώ στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάζονται το διάκενο θεωρείται ίσο με 1%. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι περιπτώσεις με μηδενικό διάκενο (ιδανική περίπτωση) και οι περιπτώσεις μηχανής με διάκενο 1% και 2%. Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το διάκενο το εύρος λειτουργίας της μηχανής αυξάνεται όμως ταυτόχρονα παρατηρείται πτώση στο βαθμό απόδοσης. Η περίπτωση μηχανής χωρίς διάκενο αποτελεί τη βέλτιστη από άποψη βαθμού απόδοσης και εύρους λειτουργίας.

Όσον αφορά το διάκενο, αξίζει να σημειωθεί ότι για χαμηλές παροχές επιδρά αρνητικά στη λειτουργία της μηχανής αφού επιταχύνει την αποκόλληση του οριακού στρώματος στο άκρο του πτερυγίου. Για μεγαλύτερες παροχές όπου η αποκόλληση του οριακού στρώματος είναι εμφανή, ο στροβιλισμός που προκαλείται λόγω του διακένου προσπαθεί να την αντισταθμίσει.

9. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στην παρούσα εργασία πέρα από τον προκαταρκτικό σχεδιασμό της στροβιλομηχανής Wells για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας διερευνάται η επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων στην λειτουργία του. Αποδεικνύεται ότι το tip clearance συμβάλλει σημαντικά στην απόδοση της μηχανής Wells καθώς οφείλεται στην ανάπτυξη δευτερογενούς ροής και στη δημιουργία στροβιλισμών μειώνοντας τον βαθμό απόδοσης. Παράλληλα ο κατάλληλος σχηματισμός του διακένου μπορεί να επιδράσει θετικά καθώς καθυστερεί την εμφάνιση της αποκόλλησης του οριακού στρώματος. Συνεπώς αντικείμενο μελλοντικής διερεύνησης αποτελεί η διαμόρφωση του διακένου ώστε η μηχανή Wells να λειτουργεί σε μεγαλύτερο εύρος και με καλύτερη απόδοση.

Προτείνεται να προστεθούν στη συγκεκριμένη μηχανή οδηγητικά πτερύγια (guide vanes) ώστε να ρυθμίζεται η ροή του αέρα που εισέρχεται στη μηχανή και να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Βασικό χαρακτηριστικό της στροβιλομηχανής Wells αποτελεί το γεγονός ότι εκμεταλλεύεται την αμφίδρομη κίνηση του αέρα για την περιστροφή της με σταθερή φορά. Η δυνατότητα προσαρμογής των πτερυγίων της μηχανής (variable pitch blades) ανάλογα με την παροχή θα εξασφάλιζαν τη λειτουργία της σε μεγαλύτερο εύρος παροχών.

Όσον αφορά τα πτερύγια, χρησιμοποιείται συμμετρική αεροτομή της σειράς NACA00XX σε όλο το μήκος του πτερυγίου. Προτείνεται η διαμόρφωση του πτερυγίου από διαφορετικές συμμετρικές αεροτομές και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Τέλος προτείνεται μία οικονομοτεχνική διερεύνηση ώστε να βρεθεί η οικονομική βιωσιμότητα της συγκεκριμένης συσκευής για τα δεδομένα των Ελληνικών θαλασσών.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] CRES, 2002. "Wave energy Utilization in Europe Current Status and Perspectives", European Thematic Network on Wave Energy
- [2] Clément, A, McCullen, P, Falcão, A, Fiorentino, A, Gardner, F, Hammarlund, K, Lemonis, G, Lewis, T, Nielsen, K, Petroncini, S, Pontes, M-T, Schild, Bengt-Olov Sjöström, P, Sørensen, H.C, Thorpe, T, 2002. "Wave energy in Europe: current status and perspectives", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, pp 405–431.
- [3] Southgate, H N, (1981). "Ray Methods for Combined Refraction and Diffraction Problems", Report Number IT214, Hydraulics Research, Wallingford, Oxon. UK.
- [4] Γκιζάρη Νικόλ 2012, "Εκτίμηση κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες", Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα
- [5] Oikonomou K, Emmanouil, Kiliass Vassilios, Gounas Aggelos, Rigopoulos Alexandrou, Karakatsani Eirini, Damasiotis Markos, Pastefanakis Dimitrios, Marini Natasa, 2008. "Renewable energy sources (RES) projects and their barriers on regional scale: The case study of wind parks in the Dodecanese islands", Greece, *Energy Policy*, pp 1-10.
- [6] Nobre Ana, Pacheco Miguel, Jorge Raquel, Lopes M.F.P., Gato L.M.C., 2007. "Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment", *Renewable Energy*, pp 1-15.
- [7] Newman, J.N., "Marine Hydrodynamics", MIT Press 1977.
- [8] Falnes J., "Ocean Waves and Oscillating Systems, Linear interactions including wave-energy extraction", Cambridge University Press 2002.
- [9] O. M. Faltinsen, "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.
- [10] Robert George Dean, Robert A. Dalrymple, "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", World Scientific, Singapore 1991.
- [11] Henri O. Berteaux, "Buoy engineering", Wiley, New York, 1976.
- [12] Falcão AF de O. "Wave energy utilization: a review of the technologies", *Renewable Sustainable Energy Review* 2010;14:899e918.
- [13] Falcão AF de O., "Modelling of Wave Energy Conversion", Instituto Superior Tecnico, Universidade Tecnica de Lisboa, 2014
- [14] T.V. Heath, "A review of oscillating water columns", *Phil. Trans. R. Soc. A* 2012 370, 235-245
- [15] "Long island Tidal and wave energy study: An assessment of the resource" E3, Inc. Energy and Environmental Services (845)691 - 4008
- [16] Principle renewable energy delivered, "Wind Wave Float (WWF): Final Scientific Report", DOE Grant DE-EE0002651
- [17] T.J.T. Whittaker, W. Beattie, M. Folley, C. Boake, A. Wright, M. Osterried , T.Heath, " The LIMPET wave power project - The first years of operation", *Renewable Energy* -Whittaker
- [18] The Queen's University of Belfast, Publishable Report (1 November 1998 to 30 April 2002), Contract JOR3-CT98-0312 "ISLAY LIMPET WAVE POWER PLANT"
- [19] Publishable Report (1 January 1996 to 31 October 1998), Contract JOR3-CT95-0012 "EUROPEAN WAVE ENERGY PILOT PLANT ON THE ISLAND OF PICO, AZORES, PORTUGAL. PHASE TWO: EQUIPMENT"
- [20] S. Raghunathan, 1996, " The Wells air turbine for wave energy conversion"
- [21] Ralf Starzmann, Thomas Carolus, "Model-based selection of full-scale Wells turbines for ocean wave energy conversion and prediction of their aerodynamic and acoustic performances", *Proc IMechE Part A: J Power and Energy* 2014, Vol 228(1) 2-16
- [22] M. Suzuki, C. Arakawa, "Design method of wave power generating systems with Wells turbine", 12th International Offshoere and Polar Engineering conference, Japan, 2002

- [23] A.F. de O. Falcao, R.J.A. Rodrigues, "Stochastic modelling of OWC wave power plant performance", *Applied Ocean Research* 24 (2002), 59 - 71
- [24] D.V. Evans, R. Porter, "Efficient calculation of hydrodynamic properties of OWC - type devices" *OMAE* 1996, Vo. 1, Part B, Offshore technology, ASME 1996
- [25] H. Martin-Rivas, Chiang C. M., "Wave power extraction from oscillating water column along a straight coast", *Ocean engineering* 36 (2009) 426 - 433
- [26] M. Torresi, S.M. Camporeale, G. Pascazio, 2009, "Detailed CFD Analysis of the steady flow in a Wells turbine under incipient and deep stall conditions", *Journal of Fluids engineering*
- [27] M. Paderi, P. Puddu, C. Manca, "Aerodynamic Characterization of a Wells turbine under bi-directional airflow", *Energy Procedia* 45 (2014) 278 - 287
- [28] M. Paderi, P. Puddu, "Experimental investigation in a Wells turbine under bi-directional flow", *Renewable Energy* 57 (2013) 570-576
- [29] T.S. Dhanasekaran, M. Govardhan, 2005, "Computational analysis of performance and flow investigation on wells turbine for wave energy conversion", *Renewable Energy* 30 (2005) 2129-2147
- [30] L.M.C. Gato, A.F. de O. Falcao, 1988, "Aerodynamics of the Wells turbine", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 30, No. 6, pp. 383-395
- [31] Shaaban S, Abdel HA, "Effect of duct geometry on Wells turbines performance", *J Energy Convers Manag* 2012;61:51-8
- [32] Z. Carija, L. Kranjcevic, V. Banic, M. Cavrak, 2012, "Numerical analysis of Wells turbine for wave power conversion", *Engineering Review* Vol. 32, Issue 3, 141-146, 2012
- [33] J. K. Watterson, S. Raghunathan, "Computed effects of solidity on Wells turbine performance", *JSME International Journal, Series B*, Vol. 41, No. 1, 1998
- [34] M. Torresi, P. Giuseppe, S.M. Camporeale, "Accurate numerical simulation of a high solidity Wells turbine", article in *Renewable Energy*, 2008
- [35] K. Tease, R. Arlitt, "Effects of design parameters on aero-acoustic and aerodynamic performance of Wells turbines", *OMAE* 2011 - 49127
- [36] T. Kim, T. Setoguchi, Y. Kinoue, K. Kaneko, "Effects of blade geometry on performance of Wells turbine for wave power conversion", *J of Thermal Science* Vol. 10, No. 4, 2001
- [37] Z. Taha, Sugiyoho, T. Sawada, "A comparison of computational and experimental results of Wells turbine performance for wave energy conversion", *Applied Ocean Research* 32 (2010) 83 - 90
- [38] Z. Taha, Sugiyoho, T. Sawada, "Numerical investigation on the performance of Wells turbine with non - uniform tip clearance for wave energy conversion", *Applied Ocean REsearch* 33 (2011) 321-331
- [39] P. Halder, J.H. Kim, A. Samad, Y. S. Choi, "High performance ocean energy harvesting turbine design - A new casing treatment scheme", article in *Energy*, 2015
- [40] Παπαντώνης Δ., "Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2009
- [41] Τσαγγάρης Σ., "Μηχανική των Ρευστών", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2005
- [42] Μαυράκος Σ.Α. "Μελέτη και Σχεδίαση Πλωτών Κατασκευών", Σχολή Ναυπηγών Μηχανικών ΕΜΠ
- [43] S.L. Dixon and C.A. Hall "Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery", 7th Edition
- [44] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method", 2nd Edition, Pearson - Prentice Hall
- [45] Ansys Fluent 14.5 "Theory Guide"
- [46] Παναγιωτόπουλος Α., "Αριθμητική μεθοδολογία προσομοίωσης της ροής και εναλλαγή ενέργειας σε υδροστρόβιλους δράσης, με πειραματική διερεύνηση και πιστοποίηση", Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών ΕΜΠ 2015