



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής

Διπλωματική Εργασία

**«ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΤΕΣΛΑ
ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΓΚΟΥΖΕΛΟΣ
71445808

Επιβλέπων καθηγητής:
ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ

Αθήνα, Αγάλεω, 2022

*Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής*

«ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΥ ΤΕΣΛΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Ε.Χ. ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ	
2. Θ. ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ	
3. Ε.-Ο. ΣΚΛΑΒΟΥΝΟΥ	

*ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΓΚΟΥΖΕΛΟΣ
71445808*

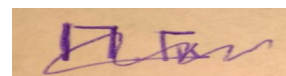
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γκουζέλος Παναγιώτης του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 71445808 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Γκουζέλος Παναγιώτης

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κο. Ευάγγελο Παπακίτσο, για την ενθάρρυνση και την προθυμία του για συνεχείς συζητήσεις και τη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου έδωσε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πρωτογενείς πηγές ενέργειας εξαντλούνται και η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται ραγδαία με την ανάπτυξη της κοινωνίας. Κρίσιμα ζητήματα όπως η έλλειψη ενέργειας και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες έρχονται στο προσκήνιο. Οι ερευνητές αναζητούν πάντα νέους και βιώσιμους τρόπους διαχείρισης της ενέργειας του κόσμου. Γενικά παρατηρείται μια μεγαλύτερη ώθηση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τον μετριασμό της αυξανόμενης παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό οδηγεί στην ανάλυση νέων μηχανών που θα μπορούσαν να αντιμετωπίσουν νέες μορφές παραγωγής καθώς και ενεργειακούς μετασχηματισμούς. Ο στρόβιλος Tesla είναι ένα τέτοιο μηχάνημα που κερδίζει σιγά σιγά τα φώτα της δημοσιότητας. Είναι μια από τις μεγαλύτερες εφευρέσεις του Nikola Tesla που δεν έγινε ποτέ μαζική παραγωγή καθώς η έλλειψη τεχνολογίας και γνώσης κατά την εποχή του, εμπόδισε την ανάπτυξη αυτού του ριζοσπαστικού σχεδιασμού. Χωρίς πτερύγια, αυτός ο στρόβιλος χρησιμοποιεί δυνάμεις τριβής και ιζώδους για να κινήσει το σύνολο των στοιβαγμένων δίσκων. Οι ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν τον στρόβιλο, αλλά ποτέ δεν πέτυχαν την απόδοση που είχε προβλέψει ο Nikola Tesla. Ο αρχικός σχεδιασμός του Tesla προοριζόταν να αντικαταστήσει τους τότε αναποτελεσματικούς στροβίλους πλήρους κλίμακας. Ωστόσο, η έρευνα με την πάροδο των ετών σε διάφορα κλιμακωμένα σχέδια του στροβίλου Tesla έχει δείξει ότι είναι πιο αποτελεσματικός για παραγωγή ενέργειας σε μικροκλίμακα. Ο σχεδιασμός του στροβίλου είναι πολύ πιο απλός από τους συμβατικούς στρόβιλους, επομένως είναι πολύ πιο οικονομικός στην κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση. Ο στρόβιλος Tesla είναι κατάλληλος για παραγωγή ενέργειας σε πολλούς τομείς και εντάσσεται στην κατηγορία των ήπιων μορφών ενέργειας και ειδικότερα των ανανεώσιμων πηγών για τον λόγο ότι δεν χρειάζεται κάποιο συγκεκριμένο καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας.

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία θα αναλύσουμε εις βάθος διάφορα στοιχεία που περιγράφουν και καθορίζουν τη λειτουργία του στροβίλου Tesla. Αρχικά θα μελετήσουμε κάποια βασικά εισαγωγικά στοιχεία για το στρόβιλο και την αρχή λειτουργίας του. Αμέσως μετά θα ασχοληθούμε με διάφορες θεωρητικές σχέσεις που περιγράφουν την εισαγωγή του ρευστού στην τουρμπίνα και θα μελετήσουμε τη θεωρία του οριακού στρώματος που είναι το βασικό φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η λειτουργία της τουρμπίνας.

Θα εξετάσουμε τις δυνάμεις που προκαλούνται στο εσωτερικό του στροβίλου και τις σχέσεις που περιγράφουν την δυναμική των ρευστών. Ακολουθεί η μελέτη της απόδοσης, οι απώλειες και οι σχέσεις που την διέπουν. Σημαντικό κομμάτι της εργασίας είναι η παρουσίαση σημαντικών παραμέτρων που διαμορφώνουν την κατασκευή της τουρμπίνας όπως η διάμετρος δίσκων, το πάχος δίσκων, ο αριθμός δίσκων, RPM κτλπ. Ταυτόχρονα θα παρουσιάζονται μελέτες και τα πειράματα διάφορων επιστημών για την επίδραση αυτών των παραμέτρων στην απόδοση της τουρμπίνας.

Κεντρικό θέμα της εργασίας θα είναι η θεωρητική διερεύνηση στο κατά πόσο η απόδοση και το παραγόμενο έργο της τουρμπίνας επηρεάζεται από την πειραματική αλλαγή των μεταβλητών της ταχύτητας ρευστού στην είσοδο $V(m/s)$, τον αριθμό δίσκων A και της ακτίνας δίσκου $r(m)$. Ύστερα θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Τέλος θα ανακεφαλαιώσουμε παρουσιάζοντας κάποια στοιχεία από τα προηγούμενα κεφάλαια και θα καταλήξουμε στα κατάλληλα συμπεράσματα παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τουρμπίνας Tesla. Κλείνοντας την εργασία, θα δούμε την εφαρμογή του στροβίλου Tesla σε κάποιες κατασκευές που έχουν σκοπό την εμπορική χρήση.

ABSTRACT

STUDY OF THE PROPERTIES OF TESLA TURBINE AND POSSIBLE APPLICATIONS IN THE PRODUCTION OF ELECTRICAL ENERGY

Primary energy sources are depleted and energy consumption is increasing rapidly with the development of society. Critical issues such as energy shortages and environmental concerns come to the fore. Researchers are always looking for new and sustainable ways to manage the world's energy. There is generally a greater push towards renewable energy sources to mitigate growing global energy consumption. This leads to the analysis of new machines that could face new forms of production as well as energy transformations. The Tesla turbine is an example of these machines that is slowly gaining publicity. It is one of the greatest inventions of Nikola Tesla that never went into mass production as the lack of technology and knowledge in his time hindered the development of this radical design. Without blades, this turbine uses frictional and viscous forces to move all of the stacked discs. The researchers tried to develop the turbine, but never achieved the performance predicted by Nikola Tesla. Tesla's original design was intended to replace the then inefficient full-scale turbines. However, research over the years on various scalable designs of the Tesla turbine has shown that it is more efficient for micro-scale power generation. The design of the turbine is much simpler than conventional turbines, so they are much more economical in construction, operation and maintenance. The Tesla turbine is suitable for energy production in many sectors and belongs to the category of mild forms of energy and especially renewable sources because it does not need any specific fuel for energy production.

In this dissertation we will analyze in depth various elements that describe and determine the operation of the Tesla turbine. We will first study some basic introductory elements about the turbine and its principle of operation. Soon we will deal with various theoretical relationships that describe the introduction of fluid into the turbine and we will study the theory of the boundary layer which is the basic phenomenon on which the operation of the turbine is based.

We will look at the forces caused inside the turbine and the relationships that describe the dynamics of the fluids. The following is the study of performance, losses and the relationships that govern it. An important part of the work is the presentation of important parameters that shape the construction of the turbine such as disk diameter, disk thickness, number of disks, RPM, etc. At the same time, studies and experiments of various sciences will be presented on the effect of these parameters on the performance of the turbine.

The main topic of this thesis will be the theoretical investigation of whether the performance and the work of the turbine are affected by the experimental change of the variables of the fluid velocity at the input $V(m/s)$, the number of disks A and the disk radius $r(m)$. Then the results will be analyzed.

Finally summarizing this work, we will present some data from the previous chapters and we will come to the appropriate conclusions by presenting the advantages and disadvantages of the Tesla turbine. Concluding this work, we will see the application of the Tesla turbine in some devices intended for commercial use.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Ο αεροστρόβιλος Tesla.....	1
1.2. Η αρχή λειτουργίας.....	2
1.3. Η εξέλιξη της δισκοτουρμπίνας.....	5
1.3.1. Η πρώτη πειραματική δισκοτουρμπίνα.....	5
1.3.2. Η 9,75 ιντσών πρωτότυπη τουρμπίνα.....	6
1.3.3. Μηχανές μεγαλύτερου μεγέθους.....	8
1.3.4. Οι πολυβάθμιες μηχανές.....	8
1.4. Λίγα λόγια για τον εφευρέτη Nicola Tesla.....	10
Βιβλιογραφία – Ιστογραφία.....	11
2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	13
2.1 Σύντομη περίληψη κάθε κεφαλαίου.....	13
2.2 Θεωρία για την εισαγωγή του ρευστού.....	14
2.2.1 Η διατήρηση της μάζας και η εξίσωση συνέχειας.....	14
2.2.2 Η διατήρηση της ορμής.....	15
2.2.3 Η εξίσωση του Euler.....	15
2.2.4 Ο νόμος του Bernoulli.....	16
2.3 Θεωρία οριακού στρώματος.....	18
2.3.1 Εισαγωγή στη θεωρία οριακού στρώματος.....	18
2.3.2 Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που διέπουν τη θεωρία οριακού στρώματος.....	19
2.3.3 Ο αριθμός Reynolds και οι μορφές ροής.....	20
2.3.4 Η αποκόλληση οριακού στρώματος.....	22
2.3.5 Οι μέθοδοι πρόληψης για την αποκόλληση του οριακού στρώματος.....	23
2.3.6 Η αδιαστατοποίηση των εξισώσεων.....	24
2.3.7 Απλοποίηση των εξισώσεων για δισδιάστατο οριακό στρώμα.....	25
2.3.8 Λύσεις ομοιότητας - το πρόβλημα του Blasius.....	27
Βιβλιογραφία – Ιστογραφία.....	30
3. ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	31
3.1 Θεωρητική ανάλυση μοντέλου ροής.....	31
3.1.1 Περιγραφή ασυμπίεστης στρωτής ροής.....	31
3.1.2 Επέκταση σε συμπίεστη, στρωτή ροή.....	34
3.1.3 Μηχανικοί περιορισμοί.....	36
3.2 Στοιχεία που διέπουν την απόδοση της τουρμπίνας.....	37
3.2.1 Απόδοση του ρότορα και ο υπολογισμός της.....	37
3.2.2 Υπολογισμός απόδοσης τουρμπίνας.....	38
3.2.3 Η σημασία του ακροφύσιου στην απόδοση της τουρμπίνας μέσα από μελέτες.....	38
3.2.4 Σημαντικοί παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της τουρμπίνας μέσω μελετών.....	40
3.2.5 Οι απώλειες στην τουρμπίνας.....	42
3.3 Διάκενο μεταξύ δίσκων.....	44
3.3.1 Υπολογισμός του διάκενου μεταξύ δίσκων.....	44
3.3.2 Μελέτες και πειράματα για το διάκενο των δίσκων.....	44
3.4 Ο αριθμός των δίσκων.....	46
3.5 Πάχος δίσκου.....	46
3.6 Διερεύνηση του RPM.....	47
3.7 Αριθμός Reynolds.....	48
3.8 Οπτικοποίηση ρευματογραμμής ρευστού.....	50

3.8.1 Οι ρευματογραμμές του μαζικού ρευστού.....	50
3.8.2 Γραμμές ροής μεταξύ δίσκων.....	51
3.9 Οι επιδράσεις της αναλογίας ακτίνας.....	52
3.10 Αδιάστατες συνθήκες εισόδου.....	55
Βιβλιογραφία – Ιστογραφία.....	57
4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΤΟΥΡΜΠΙΝΑΣ.....	59
4.1 Εισαγωγή στην θεωρητική διερεύνηση.....	59
4.2 Διερεύνηση για την ταχύτητα εισόδου του ρευστού.....	60
4.2.1 Η επίδραση της αύξησης ταχύτητας εισόδου του ρευστού στο παραγόμενο έργο.....	60
4.2.2 Μελέτες για την επίδραση της μεταβαλλόμενης ταχύτητας εισόδου του ρευστού στη απόδοση.....	62
4.3 Διερεύνηση για τον αριθμό των δίσκων.....	62
4.3.1 Η επίδραση της αύξησης του αριθμού δίσκων στο παραγόμενο έργο.....	62
4.3.2 Μελέτες για την επίδραση του διαφορετικού αριθμού των δίσκων στην απόδοση.....	65
4.4 Διερεύνηση για την ακτίνα των δίσκων.....	65
4.4.1 Η επίδραση της αύξησης της ακτίνας των δίσκων στο παραγόμενο έργο.....	65
4.4.2 Μελέτες για την επίδραση της τιμής της ακτίνας των δίσκων στην απόδοση.....	67
4.5 Εύρεση της ενδεικτικής θεωρητικής απόδοσης.....	68
Βιβλιογραφία - Ιστογραφία.....	70
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	71
5.1 Η επίδραση της ταχύτητας ροής εισόδου του ρευστού.....	71
5.2 Η επίδραση του αριθμού των δίσκων.....	72
5.3 Η επίδραση της ακτίνας/διαμέτρου του δίσκου.....	72
5.4 Τα πλεονεκτήματα της τουρμπίνας Τέσλα.....	73
5.5 Μειονεκτήματα και περιορισμοί της τουρμπίνας Τέσλα.....	74
5.6 Η ανεμογεννήτρια περιμετρικής χοάνης και η πατέντα του Fuller με στρόβιλο Τέσλα.....	75
5.7 Το μέλλον και οι εφαρμογές της τουρμπίνας Τέσλα.....	81
Βιβλιογραφία – Ιστογραφία.....	82
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ.....	84

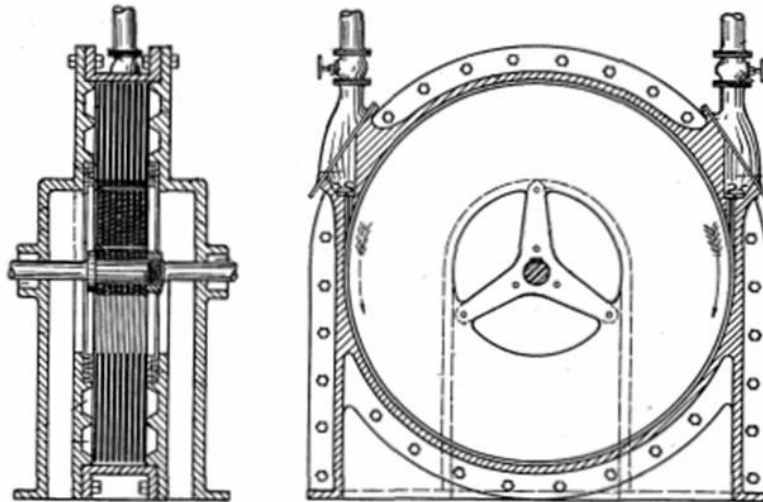
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ο αεροστρόβιλος Tesla

Ο αεροστρόβιλος Tesla είναι ένας κινητήρας ασυνήθιστου σχεδιασμού που μετατρέπει την ενέργεια ενός ρεύματος αερίου σε περιστροφική κίνηση ⁽¹⁾. Κατασκευάστηκε από τον σπουδαίο εφευρέτη και μηχανικό Νικόλα Tesla, ο οποίος είναι κυρίως γνωστός για τις επαναστατικές του συνεισφορές στους κλάδους του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού, στα τέλη του 19ου και τις αρχές του 20ου αιώνα ⁽²⁾. Ο Tesla ονειρευόταν να το χρησιμοποιήσει για να παράγει γεωθερμική ενέργεια και να γίνει «η μελλοντική μας ενέργεια» ⁽³⁾.

Κάθε εφεύρεση πρέπει να είναι μοναδική, αυτοί είναι οι σύγχρονοι κανόνες για την καταχώριση διπλώματος ευρεσιτεχνίας. Έτσι το 1913, ο σπουδαίος αυτός επιστήμονας έλαβε το πιστοποιητικό πνευματικής ιδιοκτησίας. Η πρωτοτυπία της εφεύρεσης του Tesla συνίσταται στην απουσία λεπίδων με τις οποίες τροφοδοτείται ο ρότορας σχεδόν κάθε τουρμπίνας ⁽⁴⁾. Ονομάζεται στρόβιλος χωρίς λεπίδες καθώς εφαρμόζει το φαινόμενο του οριακού στρώματος αντί της παραδοσιακής άμεσης πρόσκρουσης των λεπίδων στρόβιλου με ρευστό. Οι στρόβιλοι Tesla είναι επίσης γνωστοί ως «στρόβιλοι οριακού στρώματος», «στρόβιλοι τύπου συσχέτισης» και «στρόβιλοι στρώσης Prandtl» (λόγω του επιστήμονα Ludwig Prandtl) ⁽³⁾.

Είναι μια αρκετά απλή συσκευή με λίγα κινούμενα μέρη, η οποία αποτελείται από μια σειρά από επίπεδες, στρογγυλές πλάκες, στερεωμένες σε έναν άξονα που στεγάζεται εντός ενός θαλάμου (Εικ. 1). Το έργο παράγεται όταν το ρευστό εισάγεται επαπτομενικά στην εξωτερική άκρη των πλακών και εξέρχεται από την τουρμπίνα στις θύρες εξάτμισης που βρίσκονται κοντά στο κέντρο των δίσκων. Όταν εφαρμόζεται έργο στον άξονα, η συσκευή ενεργεί στη συνέχεια ως αντλία ή συμπιεστής που ωθεί το υγρό από το κέντρο προς τις εξωτερικές άκρες των δίσκων. Συγκεκριμένα ο στρόβιλος Tesla εφευρέθηκε προκειμένου να παράγει ισχύ από κίνηση ρευστού.



Εικόνα 1: Πρωτότυπο σχέδιο του στρόβιλου Tesla ⁽⁴⁾.

1 <https://el.sodiummedia.com/4210434-tesla-turbine-a-simple-and-beautiful-solution-to-a-technical-problem>

2 https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%AF%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%B1_%CE%A4%CE%AD%CF%83%CE%BB%CE%B1

3 <http://gr.kisho-nano-coating.com/info/tesla-turbine-principle-37478647.html>

4 Από Peshlakai (2012).

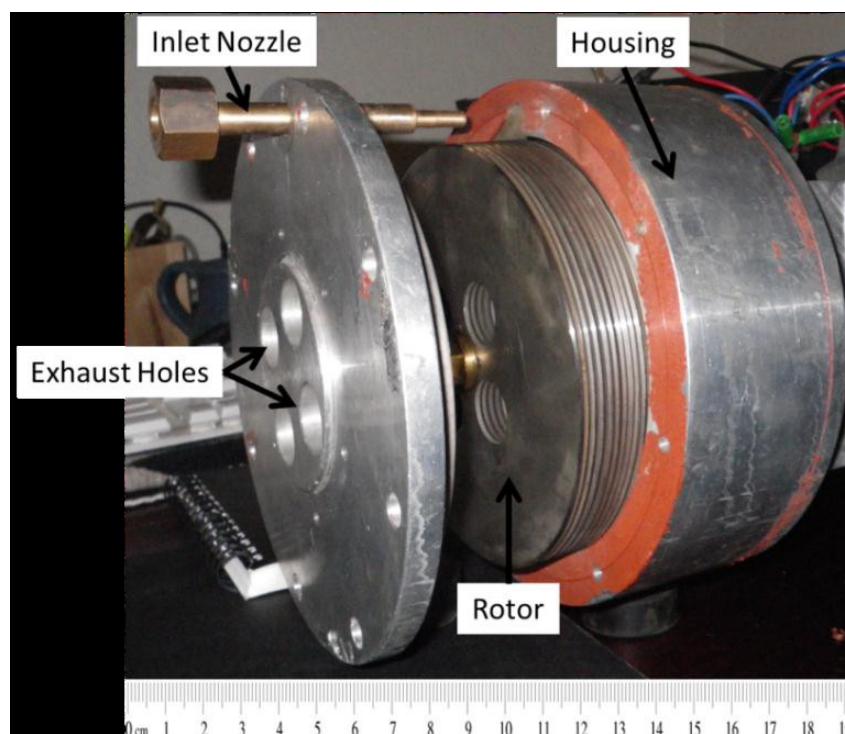
Στην πραγματικότητα, ο Tesla ισχυρίστηκε ότι είχε εφεύρει έναν ατμοστρόβιλο ικανό να παράγει 200 ίππους, με μόνον έναν ρότορα 18 ιντσών (45,72 cm). Αυτή η τουρμπίνα διαφημίστηκε ως «ισχυρός κινητήρας» που «θα μπορούσε να καλυφθεί από ένα καπέλο».

Ο Tesla, ωστόσο, δεν μπόρεσε ποτέ να επιτύχει τις βιομηχανικές εφαρμογές που ήθελε στη συσκευή του, λόγω της σχετικά χαμηλής απόδοσης της τουρμπίνας σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς στρόβιλους με λεπίδες, που εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σήμερα. Ο πρωταρχικός λόγος γι' αυτή τη χαμηλή απόδοση έχει αποδοθεί σε απώλειες στην είσοδο και στο ακροφύσιο. Άλλοι λόγοι για τη χαμηλή απόδοση είναι οι απώλειες στα ρουλεμάν, οι ιξώδεις απώλειες στα ακραία τοιχώματα και οι απώλειες απορρόφησης στον θάλαμο ολομέλειας. Όλες αυτές οι απώλειες φέρεται να μειώνουν την απόδοση του στρόβιλου έως και 15%. Η απόδοση του στρόβιλου που αναφέρεται σε αυτό το κείμενο δεν πρέπει να συγχέεται με την απόδοση του ρότορα. Η αναφερόμενη αποδόση του στρόβιλου περιλαμβάνει το ακροφύσιο και ολόκληρο τον στρόβιλο στον όγκο ελέγχου.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του στρόβιλου Tesla έγκειται στις απλές απαιτήσεις σχεδιασμού και κατασκευής. Είναι σχετικά φθηνός στην κατασκευή, λόγω της απλότητας του σχεδιασμού του, σε σύγκριση με το κόστος που σχετίζεται με τους παραδοσιακούς στρόβιλους με λεπίδες. Στην πραγματικότητα, ένας κατάλληλος στρόβιλος Tesla μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας βασικά εργαλεία που μπορούν να βρεθούν σε οποιοδήποτε μικρό κατάστημα μηχανημάτων.⁽⁵⁾

1.2. Η αρχή λειτουργίας

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό του στρόβιλου Tesla, από κατασκευαστικής πλευράς, είναι η απλότητά του. Η βασική συνδεσμολογία του στρόβιλου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 2).



Εικόνα 2: Βασικά μέρη του στρόβιλου Tesla⁽⁵⁾.

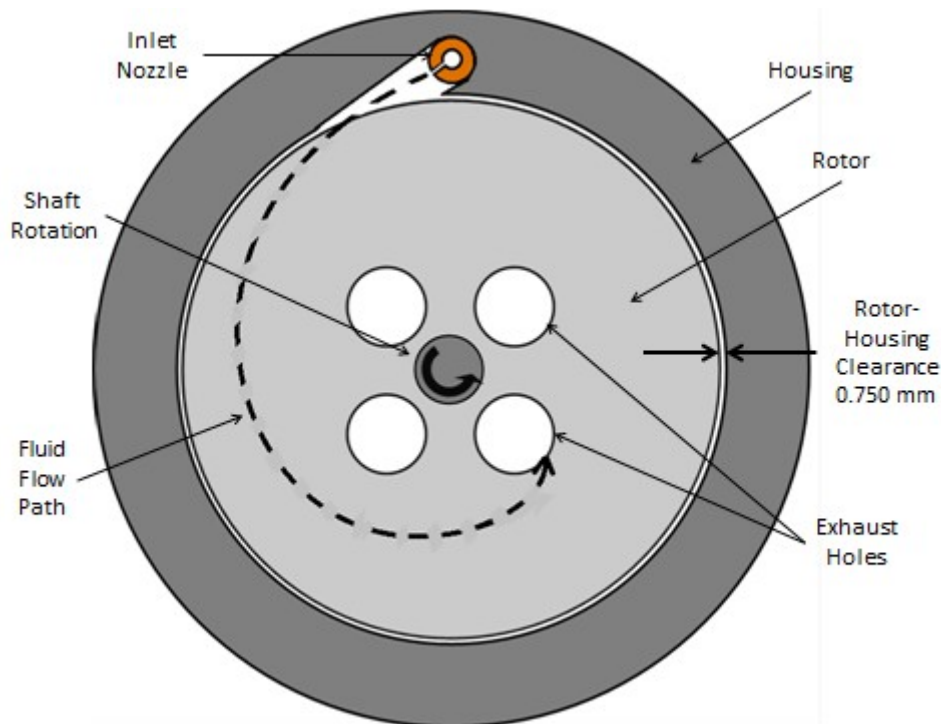
5 Από Peshlakai (2012).

Ο σχεδιασμός του στροβίλου Tesla διακρίνεται από τη χρήση επίπεδων και περιστρεφόμενων δίσκων, σε εξίσου ίδια απόσταση και στερεωμένων κατά μήκος του άξονα του ρότορα που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 3).



Εικόνα 3: Δίσκοι στερεωμένοι κατά μήκος του άξονα του ρότορα⁽⁶⁾.

Ο ρότορας στεγάζεται από ένα μεταλλικό περίβλημα που περιέχει το ακροφύσιο εισόδου καθώς και τις θύρες εξάτμισης. Όταν εισάγεται ένα ρευστό μέσω του ακροφύσιου, η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται σημαντικά και εκτοξεύεται επαπτομενικά προς το εξωτερικό άκρο των δίσκων. Το ιξώδες του υγρού που είναι σε υψηλή ταχύτητα και η κατάσταση χωρίς ολίσθηση κατά μήκος των επιφανειών του δίσκου οδηγεί σε ανταλλαγή ορμής από το ρευστό στους δίσκους, παράγοντας ροπή άξονα και έξοδο ισχύος. Καθώς συμβαίνει αυτή η ανταλλαγή, το ρευστό περιστρέφεται προς το κέντρο του άξονα, όπου εξαντλείται μέσω θυρών που βρίσκονται κοντά στο κέντρο των δίσκων. Μια εικόνα της θεωρίας ροής στροβίλων Tesla φαίνεται παρακάτω (Εικ. 4).

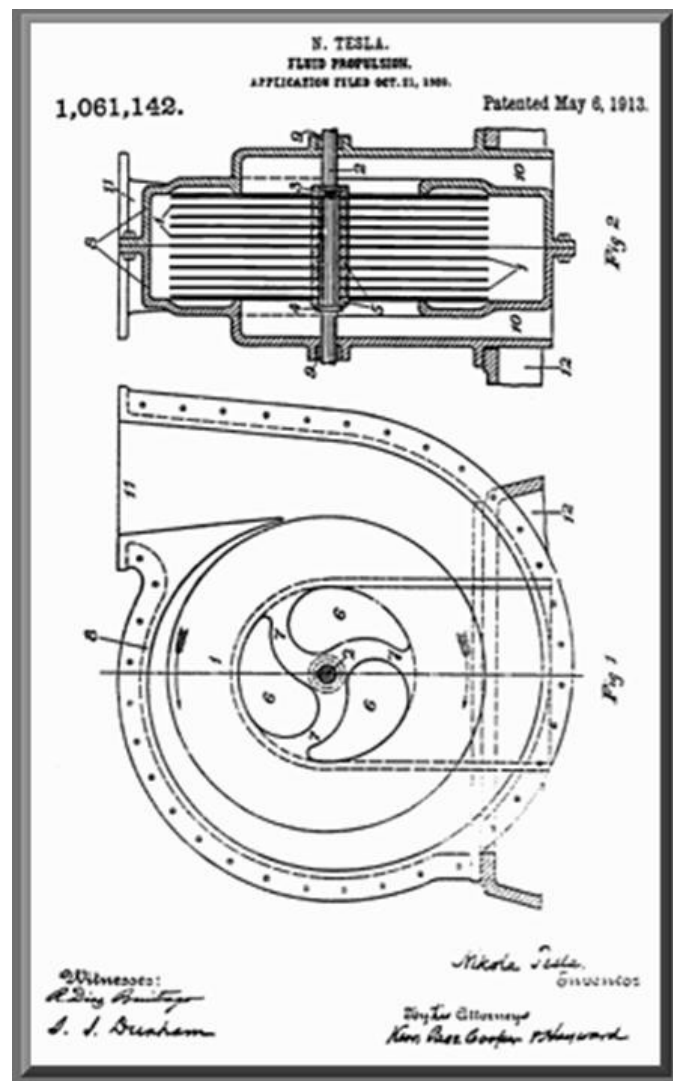


Εικόνα 4: Θεωρία ροής στροβίλων Tesla⁽⁶⁾.

6 Από Peshlakai (2012).

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4**, δεν υπάρχει τίποτα περίπλοκο για τον τρόπο λειτουργίας ενός στροβίλου Tesla. Το γεγονός ότι το ρευστό ρέει παράλληλα με τους δίσκους της τουρμπίνας δίνει σε αυτό το σχέδιο ένα ξεχωριστό πλεονέκτημα έναντι του παραδοσιακού στροβίλου με λεπίδες. Λειαντικά σωματίδια ή ακόμη και σταγονίδια νερού μπορεί να υπάρχουν στο ρευστό εργασίας, χωρίς να διακινδυνεύονται άμεσες κρούσεις που θα μπορούσαν να προκαλέσουν επιπλέον φθορά και ζημιά στους δίσκους. Η ικανότητά του να χρησιμοποιεί μια ποικιλία ρευστών χωρίς να καταστρέφει τις λεπίδες, και το εξαιρετικά χαμηλό κόστος κατασκευής του, δικαιολογούν ένα νέο ενδιαφέρον για τον σχεδιασμό.

Όταν παρέχεται ισχύς άξονα στον ρότορα, η συσκευή Tesla μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ως αντλία ή συμπιεστής. Η διαδικασία είναι απλά το αντίστροφο της εξήγησης του στροβίλου που δίνεται παραπάνω, με τη ροή του ρευστού από το κέντρο προς τα έξω. Η **Εικόνα 5** είναι το σχεδιάγραμμα που παρέχεται από τον Tesla, για να εξηγήσει το σχέδιό του για αντλία ή συμπιεστή τύπου Tesla, ως μέρος ενός αρχικού διπλώματος ευρεσιτεχνίας (7).



Εικόνα 5: Σχέδιο αντλίας ή συμπιεστή τύπου Tesla(7).

7 Από Peshlakai (2012).

1.3. Η εξέλιξη της δισκοτουρμπίνας

1.3.1. Η πρώτη πειραματική δισκοτουρμπίνα

Ήταν το 1902, όταν ο Τέσλα δήλωσε ότι εργαζόταν σε ένα σχέδιο για μια μηχανή που θα ήταν εντελώς διαφορετική από τα είδη μηχανών που χρησιμοποιούνταν μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, θα ήταν πιο μικρή, αρκετά απλή και πολύ ισχυρή για το μέγεθός της. Εκείνη τη περίοδο, οι μόνες μηχανές που χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν τύπου εναλλασσόμενου ρεύματος και ουσιαστικά βαριάς μορφής (τύπου). Το αυτοκίνητο με κινητήρα εσωτερικής καύσης όλο και αναπτυσσόταν και τα πρώτα αεροπλάνα έκαναν την εμφάνισή τους.

Το πρώτο μοντέλο ήταν ένα μικρό μηχανήμα που ζύγιζε περίπου 10 κιλά και για λόγους μετρήσεων κατασκευάστηκε σε διάσταση δίσκων που δεν ξεπερνούσαν τις 6 ίντσες (15,24 cm). Στη δοκιμή ανέπτυξε γύρω στους 30 ίππους (HP). Αυτή η παραγόμενη ισχύς υπερέβαινε κάθε γνωστή κινητήρια δύναμη σε χρήση εκείνης της εποχής, επιστρέφοντας μια ισχύ σε σχέση με το βάρος της: τους ίππους (3 HP) για κάθε κιλό βάρους του κινητήρα.

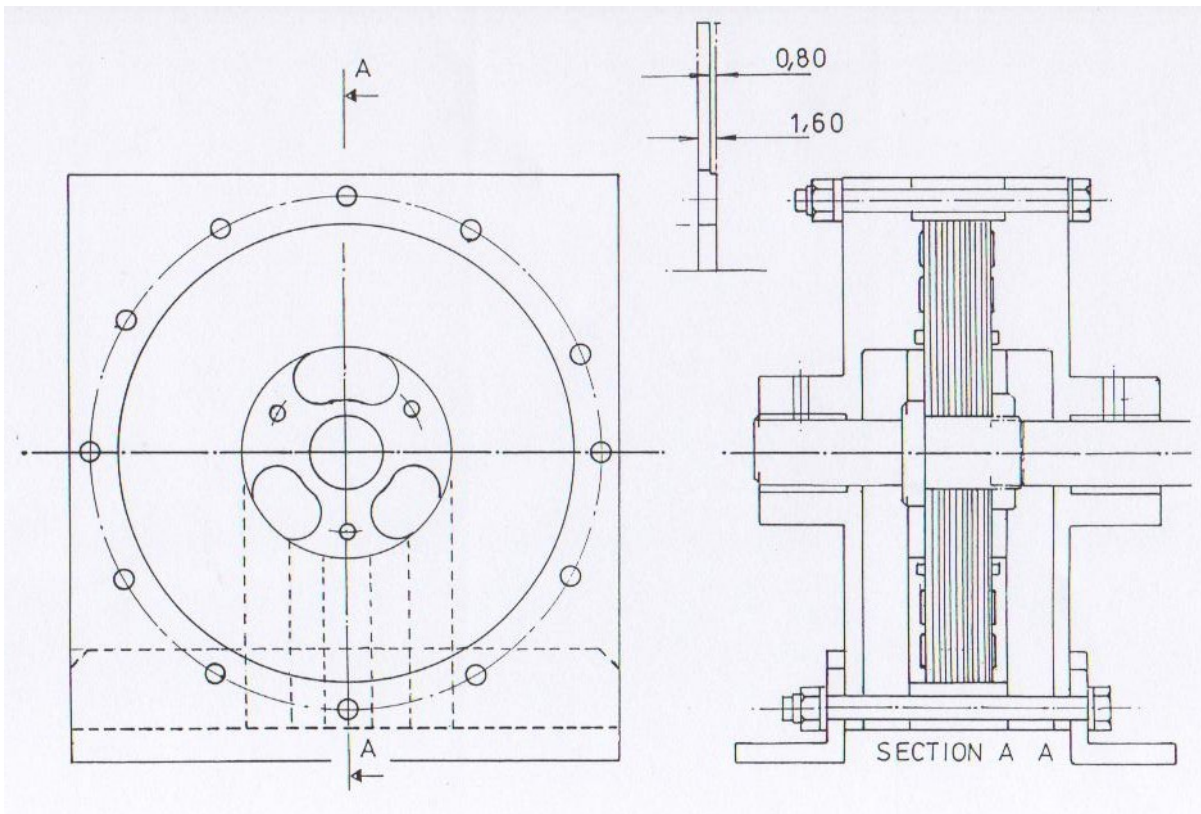
Η μηχανή αποτελούταν κυρίως από μια στοίβα δίσκων. Οι πρώτοι δίσκοι είχαν παραχθεί από το υλικό του νικελίου-αργύρου και είχαν διάμετρο 6 ίντσες (15,24 cm) αλλά και πάχος 1/32 της ίντσας (0,08 cm). Οι δίσκοι είχαν απόσταση μεταξύ τους όσο ήταν το πάχος των ροδελών που ήταν ανάμεσά τους. Χρησιμοποιήθηκε μια στοίβα από οκτώ δίσκους και ροδέλες, οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι πάνω σε έναν άξονα διαμέτρου 1 ίντσας (2,54 cm) και ήταν στερεωμένοι μαζί στον άξονα από ένα παξιμάδι. Όλα αυτά τα εξαρτήματα σχημάτιζαν έναν ρότορα, ο οποίος ήταν τοποθετημένος σε μια κυλινδρική θήκη/στάτη, όπου τα άκρα ήταν κλειστά από πλάκες και περιείχαν τα ρουλεμάν, πάνω στα οποία ο άξονας περιστρεφόταν. Στο κέντρο των δίσκων και συγκεκριμένα όσο πιο κοντά στον άξονα, για πρακτικούς λόγους, σχηματίζονται θύρες, με ίδια κενά μεταξύ τους, με σκοπό να παρέχουν μια έξοδο για την εξάτμιση του μέσου (ρευστού) στην ατμόσφαιρα.

Ο ρότορας ήταν ένα εξάρτημα με σχετικά στενή οπή στις επιφάνειες των ακραίων πλακών του στάτη και είχε ως στόχο να μειώσει τις διαρροές, όσο αυτό είναι εφικτό. Εφαπτομενικά στην οπή του στάτη βρισκόταν ένα ακροφύσιο, μέσω του οποίου το ρευστό κατευθυνόταν πάνω στους δίσκους σε σπειροειδή μορφή και εν συνεχεία έρεε προς τις θύρες εξόδου. Γι' αυτό το πειραματικό μηχανήμα χρησιμοποιούταν πεπιεσμένος αέρας, σε μία πίεση περίπου 70 psi, ως μέσο λειτουργίας.

Το μηχανήμα πραγματοποίησε μια περιστροφική κίνηση με ταχύτητα πάνω από 30.000 στροφές ανά λεπτό. Όταν εξετάστηκε, διαπιστώθηκε ότι οι δίσκοι είχαν τεντωθεί κατά 1/32 της ίντσας (0,08 cm) από την αρχική διάμετρο. Αυτό οφειλόταν στα αδρανειακά φορτία που υπέστησαν οι δίσκοι από την υψηλή ταχύτητα περιστροφής. Απ' ότι φάνηκε, το υλικό των δίσκων που ήταν νικελίου-αργύρου δεν ήταν ιδανικό γι' αυτήν την εφαρμογή, για το λόγο ότι είχε μια σχετικά χαμηλή τιμή καταπόνησης εφελκυσμού και μικρό σημείο ελαστικής απόδοσης. Το πρόβλημα της ελαστικότητας και της παραμόρφωσης εκδηλώθηκε και στις πιο πρόσφατες μηχανές, κάτι που οφείλεται στη μη σωστή επιλογή των υλικών και της διαθεσιμότητάς τους κατά το χρόνο κατασκευής. Το πρόβλημα επιδεινώθηκε λόγω του σχεδιασμού των δίσκων, ο οποίος είχε αποδυναμωθεί από την ανάγκη να υπάρχουν θύρες εξόδου στο κέντρο.

Ακολουθεί παρακάτω ένα σχέδιο του μηχανήματος, όμοιου με την πειραματική μονάδα (**Εικ. 6**). Το σχήμα δείχνει μια μηχανή, η οποία είναι κατασκευασμένη με σκοπό να χρησιμοποιηθούν υλικά τα οποία είναι διαθέσιμα σήμερα. Αυτή η μηχανή έχει 12 δίσκους διαμέτρου 5 ιντσών (12,7 cm) ο κάθε ένας. Διαφέρει από την περιγραφή που έδωσε ο Τέσλα, ο οποίος παραθέτει μηχανή 8 δίσκων διαμέτρου 6 ιντσών (15,24 cm) ο κάθε ένας. Συνεπώς ο σχεδιασμός δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι

είναι ένα πραγματικό αντίγραφο του αρχικού μοντέλου, αλλά μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένας λογικός συμβιβασμός.⁽⁸⁾



Εικόνα 6: Πειραματική μονάδα ⁽⁸⁾.

1.3.2. Η 9,75 ιντσών πρωτότυπη τουρμπίνα

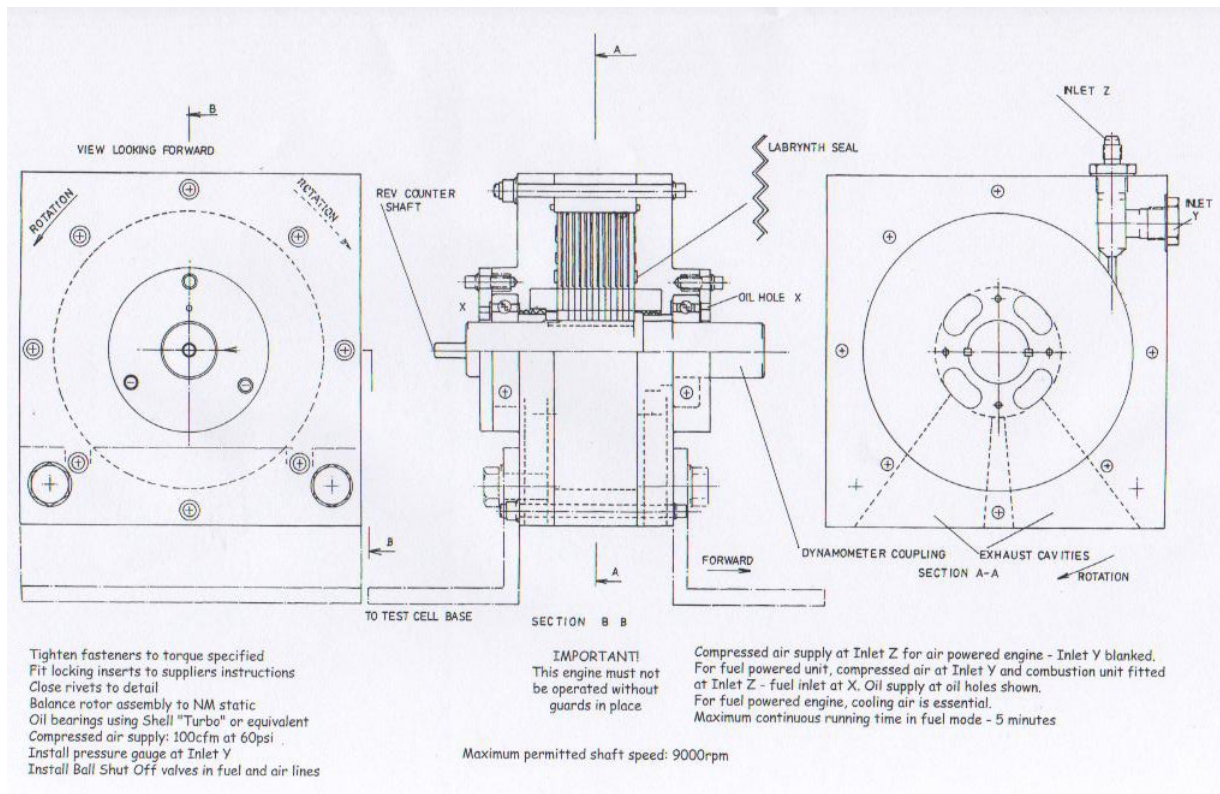
Ο Τέσλα, έχοντας αποκτήσει εμπειρία από τη μικρή μηχανή, αποφάσισε να σχεδιάσει ένα μεγαλύτερο μοντέλο, κάνοντας χρήση των παρόντων τότε υλικών και τεχνολογίας. Η καινούργια μηχανή χρησιμοποιούσε δίσκους διαμέτρου 9 ιντσών και 3/4 της ίντσας (247,65 mm). Είχαν πάχος 1/8 της ίντσας (3,175 mm) και απείχαν κατά 1/32 της ίντσας (0,08 cm). Με τη χρησιμοποίηση δεκατριών δίσκων, το συνολικό πλάτος της ήταν 52 mm. Οι δίσκοι είχαν δημιουργηθεί από ανοξείδωτο ατσάλι και σε γενικές γραμμές ακολουθούσαν το πρότυπο της προηγούμενης μικρής μηχανής, όπου εκεί στάτης και κάλυμμα ήταν από κράμα αλουμινίου. Ο άξονας ήταν φτιαγμένος από ανθρακούχο χάλυβα και ήταν τοποθετημένος πάνω σε ένα ρουλεμάν, με μία τσιμούχα που προβλέπεται σε κάθε περίπτωση ως μορφή σφράγισής του.

Σε αυτήν τη τουρμπίνα προοριζόταν να χρησιμοποιηθεί συμπιεσμένος αέρας, ως μέσο, έχοντας τις κατάλληλες συνδέσεις, και με ένα ακροφύσιο εισαγωγής ενσωματωμένο στο στάτορα. Η είσοδος του αέρα γινόταν μέσω μιας δεξαμενής με μία τροφοδοσία στάλαξης. Ο πεπιεσμένος αέρας που χρησιμοποιούνταν ανερχόταν στα 80 psi, και η απόδοση αναμενόταν να είναι άνω των 100 ίππων (HP). Υπήρχε επιθυμία να λειτουργήσει το μηχάνημα χρησιμοποιώντας αέριο που παράγεται από ένα σύστημα καύσεως, έτσι ώστε να τρέξει για πολύ σύντομες χρονικές περιόδους κατά τη λειτουργία με αυτό το μέσο. Ο αέρας που χρειαζόταν για το σύστημα καύσης προερχόταν κυρίως από μια εξωτερική πηγή αέρος, όπου αυτή ήταν είτε ένας ανεξάρτητος αεροσυμπιεστής είτε ένα

⁸ Διασκευή από Cairns (2001) & Σταυρόπουλος (2012).

δίκτυο αέρα. Σημαντικό ήταν ο αέρας να είναι απαλλαγμένος από συμπυκνώματα και από μολύνσεις των ελαίων.

Η τροφοδοσία καυσίμου διασφαλιζόταν μέσω της ένωσης του προσαρμογέα (adaptor) με τον στάτη, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 7), και παρείχε το καύσιμο μέσω μιας βαλβίδας. Ύστερα αναμιγνυόταν με τον αέρα του αεροσυμπιεστή στο μέρος του σωλήνα καύσεως όπου γινόταν η ανάφλεξη, χρησιμοποιώντας τον καυστήρα, ο οποίος είτε ήταν ένα ηλεκτρικό θερμαντικό μπουζί ή μια παρόμοια συσκευή. Μετά την αρχική καύση, η διαδικασία καθίστατο αυτοσυντηρούμενη.



Εικόνα 7: Η 9,75 ιντσών πρωτότυπη τουρμπίνα (9).

Το θερμαινόμενο αέριο ακολουθούσε την ίδια πορεία με αυτήν που περιγράφεται προηγουμένως, δηλαδή ως ένα σπειροειδές κύκλωμα γύρω από τους δίσκους, και εξατμιζόταν μέσω των εξόδων. Η πίεση του αέρα έπρεπε να είναι στα 50 έως 60 psi (3,4 έως 4,0 bar) και ο ανεφοδιασμός καυσίμου, το οποίο έπρεπε να ήταν είτε κηροζίνη είτε προπάνιο στα 100 έως 150 psi (7,0 έως 10,0 bar). Το προπάνιο ήταν το προτιμώμενο καύσιμο, καθώς ο έλεγχός του ήταν απλούστερος, με τη χρησιμοποίηση της βαλβίδας και του μανομέτρου επί του δοχείου, κι έτσι η ανάγκη για αντλίες καυσίμου και δεξαμενών αποφεύγονταν.

Σε όλες τις μηχανές του Tesla έγινε παροχή ατμού απευθείας σε ένα μόνο στάδιο και στη συνέχεια εξατλήθηκε στην ατμόσφαιρα. Έτσι η απόδοση δεν λαμβάνει υπόψη τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια του ατμού, ομοίως και στην τροφοδοτούμενη με αέριο μηχανή. Υπήρχαν ισχυρισμοί ότι η μηχανή των 9,75 ιντσών (247,65 mm) που περιγράφεται θα μπορούσε να προσφέρει έως και τρεις φορές τη δύναμη που πραγματικά δηλώθηκε, δηλαδή 330 ίπποι, καθώς καμία από τις μηχανές δεν είχαν αυτή τη δυνατότητα και ήταν αδύνατο να ελεγχθεί ο αριθμός των ίππων, αλλά είχαν σίγουρα την πρόθεση να το πράξουν.(9)

9 Διασκευή από Cairns (2001) & Σταυρόπουλος (2012).

Προβλεπόταν επίσης ότι με τη χρήση αερίου ως μέσου, η απόδοση στην έξοδο της μηχανής θα είχε αυξηθεί σε 130 μέχρι 140 HP, λόγω της επίδρασης του αερίου στις επιφάνειες των δίσκων. Έτσι, σε αυτή τη μηχανή θα μπορούσε να επιτευχθεί μια απόδοση εξόδου των 420 HP, με τη χρησιμοποίηση ενός οργανωμένου στροφέα/ρότορα. ⁽¹⁰⁾

1.3.3. Μηχανές μεγαλύτερου μεγέθους

Το επόμενο βήμα στην ανάπτυξη της δισκοτουρμπίνας ήταν να δημιουργηθεί μια μηχανή με μεγαλύτερο μέγεθος, χρησιμοποιώντας έναν δίσκο των 18 ιντσών (457,2 mm). Στον σταθμό ισχύος Waterside της εταιρείας Edison κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν δύο αεροστρόβιλοι. Κάθε μηχανή ήταν των 200 HP, με το μήκος των 36 ιντσών (914,4 mm) και πλάτος 24 ιντσών (609,6 mm) συνολικά. Εφαρμόστηκε ατμός ως μέσο λειτουργίας στα 125 psi, όπου είχε βαθμό περιστροφής 9000 rpm, μέχρις ότου να εξαντληθεί ελεύθερα στην ατμόσφαιρα.

Υπήρχε ο ισχυρισμός ότι εάν ο στρόβιλος είχε στάδια, έχοντας τρεις ρότορες στη μονάδα χαμηλής πίεσης με έναν συμπυκνωτή υδραργύρου με κενό 29 ιντσών (736,6 mm), τότε μια τέτοια μηχανή θα έδινε απόδοση 600 HP, με πολύ συντηρητική εκτίμηση. Επίσης υποστηρίχτηκε ότι η θερμική απόδοση θα προσέγγιζε τη θεωρητική μέγιστη εφικτή τιμή από τον κύκλο Carnot.

Το τελικό μηχάνημα, σχεδιασμένο από τον Tesla, ήταν η μεγαλύτερη μονάδα που χρησιμοποιεί την έννοια δίσκο-στροβίλων. Η εταιρεία που το είχε κατασκευάσει ήταν η Manufacturing Allis Chalmers, τοποθετώντας δεκαπέντε δίσκους με τη διάμετρο των 60 ιντσών (1.524 mm), με πάχος 0,125 ίντσες (3,175 mm) και απείχαν μεταξύ τους 0,125 ίντσες (3,175 mm). Η εκτίμηση της απόδοσης του σχεδίου ήταν στους 675 HP ή 503,35 kW, με μια ταχύτητα περιστροφής 3.600 στροφών ανά λεπτό, με μια παροχή ατμού των 80 psi και μία πίεση εξάτμισης των 3,0 psi. Σημειώνεται στην έκθεση ότι οι πιέσεις ατμού αναφέρονται ως απόλυτες και μπορεί να παρερμηνευθούν.

Η έκθεση της Allis Chalmers ήταν επικριτική για τη δισκοτουρμπίνα. Συγκεκριμένα, οφειλόταν στη διαστρέβλωση των δίσκων από τις δυνάμεις αδρανείας, μιας αναφερόμενης δύναμης των 70.000 lbs (λίμπρες). Οι συνολικές δαπάνες των μικρότερων μονάδων κρίθηκαν μη ανταγωνιστικές με τα καθιερωμένα σχέδια, δεδομένου του ότι ήταν απαραίτητο να παρασχεθεί ένα κιβώτιο μείωσης ταχύτητας, που να ταιριάζει με τις αντλίες ή με άλλες οδηγημένες μηχανές. Η διαστρέβλωση που εμφανίστηκε στους δίσκους αποδόθηκε στην ελαφριά κατασκευή. Η άποψη που επικρατούσε ήταν ότι σε γρήγορο χρονικό διάστημα θα είχαν οδηγηθεί στην αποτυχία. Η αποδοτικότητα της μηχανής δεν ήταν αποδεκτή, σε σύγκριση με τους καθιερωμένους τύπους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα μεγάλο μέρος της κριτικής απέτυχε να λάβει υπόψιν την πολύ μικρή ποσότητα των εργασιών που απαιτούνταν για να πραγματοποιηθεί η αρχή λειτουργίας και στάθηκε στο ότι χρησιμοποιήθηκε μόνον ένας ενιαίος στροφέας/ρότορας. Λόγω έλλειψης των σχεδίων και των τεχνικών στοιχείων, τροφοδοτούμενα από τον Tesla, η εταιρεία δεν κατασκεύασε άλλον αεροστρόβιλο και το ενδιαφέρον για την αρχή λειτουργίας έπαψε. ⁽¹⁰⁾

1.3.4. Οι πολυβάθμιες μηχανές

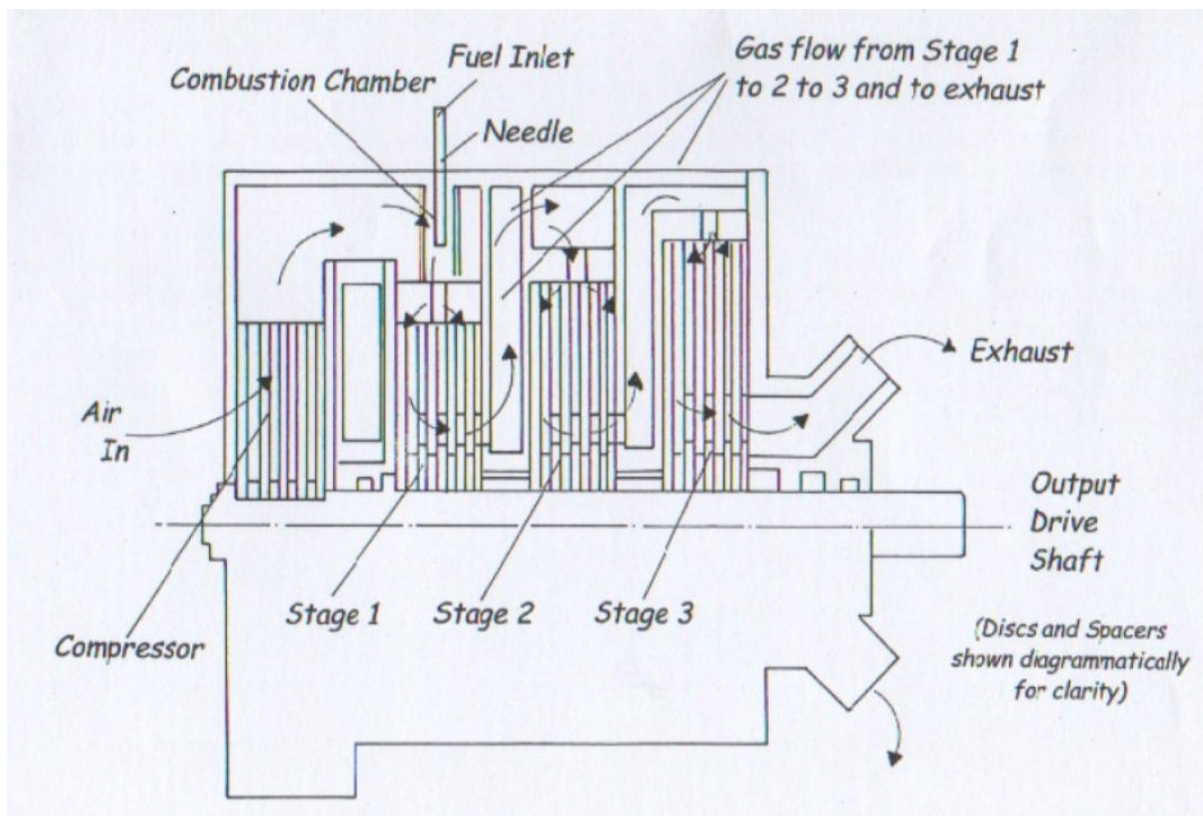
Αν αυξηθεί ο αριθμός και η διάμετρος των δίσκων, τότε η μηχανή μπορεί να επεκταθεί για να παράσχει μεγαλύτερη υποδύναμη. Επομένως, καθώς το μέσο (ρευστό) εισέρχεται στην πρώτη συστοιχία δίσκων, διαθέτοντας τη μέγιστη θερμοκρασία και πίεση, αλλά και καθώς κινείται από το ένα στάδιο στο άλλο, τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του μεταβάλλονται, αφού η ενέργεια χρησιμοποιείται από τη μηχανή.

10 Διασκευή από Cairns (2001) & Σταυρόπουλος (2012)

Η διαμόρφωση αποσκοπεί στο να οργανωθούν τα κυριότερα μέρη, όπως ο αεροσυμπιεστής, ο θάλαμος καύσης, η τουρμπίνα και τα ενδιάμεσα τμήματα, σε έναν μόνον άξονα, ιδιαίτερα όταν απαιτείται ένα σταθερό φορτίο και σταθερή ταχύτητα κινητήρα. Σε περιπτώσεις όπου συμβαίνουν διακυμάνσεις της παραγωγής και των συνθηκών λειτουργίας, απαιτείται μια διαμόρφωση όπου η κίνηση του συμπιεστή να γίνεται από τη δική του αποκλειστική τουρμπίνα, με δικό του άξονα κι επίσης με την ισχύ της γεννήτριας να σχηματίζεται από δύο ή περισσότερα στάδια, στερεωμένο σε έναν δεύτερο άξονα, το οποίο επιτρέπει την καλύτερη αντιστοίχιση του συμπιεστή. Τέλος, η τελική απόδοση μπορεί να προέρχεται από ένα αναπόσπαστο κιβώτιο ταχυτήτων, καθιστώντας το έτσι έναν τρίτο άξονα διαμόρφωσης.

Ποτέ δεν αξιολογήθηκε το εύρος και η εξαγόμενη ισχύς που μπορεί να παραχθεί από το δίσκο στροβιλισμού, χρησιμοποιώντας σταδιακά ρότορες, κάνοντας εξατμισμό μέσω ενός συμπυκνωτή και με χρήση ατμού ως μέσου, παρόλο που ο Tesla είχε εκδηλώσει ενδιαφέρον για να το πράξει.

Με τη λειτουργία ενός κινητήρα τύπου κύκλου Brayton μπορεί να βελτιωθεί η θερμική απόδοση του αεροστρόβιλου με δίσκους, ενσωματώνοντας τον με τα κατάλληλα εξαρτήματα στο σύστημα, έτσι ώστε να εξαχθεί η μέγιστη ενέργεια από το μέσο. Η αρχή λειτουργίας του πολυβάθμιου στρόβιλου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Εικ. 8). Εκεί βλέπουμε την κατεύθυνση της ροής του μέσου από στάδιο σε στάδιο, μέσα από τους δίσκους, και των ενδιάμεσων τμημάτων, όπου τελικά γίνεται η εξάντληση του στην ατμόσφαιρα.⁽¹¹⁾



Εικόνα 8: Πολυβάθμιος στρόβιλος ⁽¹¹⁾.

11 Διασκευή από Cairns (2001) & Σταυρόπουλος (2012).

1.4. Λίγα λόγια για τον εφευρέτη Nicola Tesla

Ο Nicola Tesla γεννήθηκε στις 10 Ιουλίου 1856 στην πόλη Σμίλιαν (τότε Αυστρία, σήμερα Κροατία). Πατέρας του ήταν ο Μιλιούτιν, ένας ορθόδοξος ιερέας, και μητέρα του η Μάντιτς. Από τον πατέρα του ο Tesla έλεγε ότι κληρονόμησε τη θεωρητική και φιλοσοφική φύση και από τη μητέρα του την πρακτική σκέψη και την ισχυρή μνήμη.

Οι περισσότεροι άνθρωποι στη σημερινή εποχή γνωρίζουν τον όρο Tesla από την ομώνυμη μονάδα του μαγνητικού πεδίου. Στην πραγματικότητα, η μονάδα μέτρησης ονομάστηκε έτσι προς τιμή του μεγάλου Σερβοαμερικάνου εφευρέτη-επιστήμονα, που θεωρείται από πολλούς μελετητές ως μία παρεξηγημένη ιδιοφυΐα.

Στα 19 του χρόνια έγινε δεκτός στο Πολυτεχνείο του Graaz για να σπουδάσει ηλεκτρολόγος μηχανικός, αν και αρχικά η οικογένειά του τον προόριζε για εκκλησιαστικές ή στρατιωτικές σπουδές. Ως φοιτητής στο πολυτεχνείο διαφώνησε με τους καθηγητές του κι έγινε αντικείμενο χλευασμού, όταν απέρριπτε τις γνωστές τεχνικές για τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών. Το μοναδικό σύστημα την εποχή εκείνη ήταν το συνεχές ρεύμα και οι ηλεκτρικές μηχανές έπρεπε να παράγουν περιστροφή από ένα ρεύμα σταθερής πολικότητας. Αυτό γινόταν (και γίνεται σήμερα) με ένα πολύπλοκο σύστημα μεταγωγών και επαφών. Ο Tesla ήταν από τότε σίγουρος ότι η μέθοδος αυτή ήταν λανθασμένη και ότι σίγουρα υπήρχε κάποιος πιο φυσικός τρόπος.

Το 1879 αποφοίτησε από το Graaz και εργάστηκε σε μερικές εταιρείες, εφαρμόζοντας βελτιώσεις σε διάφορες συσκευές. Την εποχή εκείνη κατάφερε τελικά να συλλάβει στο μυαλό του την εικόνα του εναλλασσόμενου ρεύματος και της ηλεκτρικής μηχανής που θα το παρήγαγε. Έφυγε για το Παρίσι και γρήγορα, το 1884, ξεκινά για την Αμερική. Είχε μαζί του τις συστατικές επιστολές που τον παρουσιάζουν εξάισιο μηχανικό, ισάξιο μόνο του Edison, και τα σχέδια της καινούριας του μηχανής.

Στην Αμερική επισκέπτεται τον Edison και προσλαμβάνεται στα εργαστήριά του. Σε λίγο όμως καιρό διαφώνησε με τον Edison, γιατί εκείνος απέρριπτε πεισματικά την ανακάλυψη του Tesla για το εναλλασσόμενο ρεύμα. Εργάστηκε σε διάφορες δουλειές, ώσπου να ξεκινήσει το εργαστήριό του στη Ν. Υόρκη. Συνάντησε τον George Westinghouse, έναν επιχειρηματία της ηλεκτρικής βιομηχανίας, που τον υποστήριξε και τον εμπιστεύτηκε. Τελικά το εναλλασσόμενο σύστημα του Tesla κέρδισε στο διαγωνισμό για την κατασκευή του πρώτου υδροηλεκτρικού σταθμού των ΗΠΑ, στο Νιαγάρα, και ο Tesla απέκτησε μεγάλη φήμη. Κέρδιζε μεγάλα ποσά και ζούσε ακριβή ζωή.

Γρήγορα έφυγε από τη Ν. Υόρκη για το Colorado Springs, όπου έχτισε το εργαστήριό του σε έναν χώρο που διάλεξε για τις κλιματολογικές συνθήκες. Σε μια έκταση περιφραγμένη με υψηλό φράκτη και πινακίδες που απαγόρευαν την είσοδο, προειδοποιώντας για «μεγάλο κίνδυνο», υπήρχαν τεράστιοι πύργοι, υπόστεγα και περίεργες κεραίες. Εκεί άρχισε να δουλεύει στο παντοτινό του όνειρο, την ασύρματη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον πλανήτη και εκεί πραγματοποίησε τις περισσότερες εφευρέσεις του. Κατάφερε την πρώτη ασύρματη μετάδοση μηνύματος, αν και δεν ήταν ο στόχος του αυτός. Σκόπευε στη μετάδοση ενέργειας και όχι απλά μηνυμάτων. Όταν ο Marconi ανακοίνωσε την εφεύρεση του ασυρμάτου, δεν ήταν παρά μια αντιγραφή των ευρεσιτεχνιών του Tesla.

Το 1912 του προτάθηκε το βραβείο Nobel για τις εργασίες του, αλλά το αρνήθηκε γιατί πίστευε ότι είχε έρθει πολύ αργά.

Ο Nikola Tesla πέθανε στις 7 Ιανουαρίου 1943, στο δωμάτιο ενός ξενοδοχείου στη Ν. Υόρκη, μόνος, φτωχός και σίγουρα ξεχασμένος. Κράταγε κλειδωμένες τις σημειώσεις του, που οι φήμες λένε ότι κατέληξαν στα χέρια μυστικών υπηρεσιών μετά τον θάνατό του.

Λίγες προσπάθειες έγιναν για την αποκατάσταση της φήμης του, αλλά παραμένει άγνωστος σε ευρείς κύκλους. Μεγάλα επιστημονικά ιδρύματα αρνούνται ακόμα και σήμερα να τον αναφέρουν στην ιστορία της επιστήμης. Οι μεγαλύτερες ανακαλύψεις του ήταν το εναλλασσόμενο ρεύμα, συσκευές που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα, ο μετασχηματιστής Tesla, η τηλεκατεύθυνση, η ασύρματη μετάδοση ενέργειας, το ραδιόφωνο, η τουρμπίνα Tesla. Έχει κατασκευάσει αρκετά πολλές μηχανές, πράγμα που αποδεικνύουν τα εκατοντάδες διπλώματα ευρεσιτεχνίας που κατείχε και δίκαια τον κατατάσσουν ως έναν από τους κορυφαίους εφευρέτες του 20ου αιώνα, ασχέτως εάν πολλοί δεν τον αποδέχονται (¹²).

Βιβλιογραφία - Ιστογραφία

- el.sodiummedia, “Turbine - μια απλή και όμορφη λύση σε ένα τεχνικό πρόβλημα” Διαθέσιμο στο: <https://el.sodiummedia.com/4210434-tesla-turbine-a-simple-and-beautiful-solution-to-a-technical-problem> , Ανακτήθηκε 5/4/2021
- «Νικόλα Τέσλα», Βικιπαίδεια. Διαθέσιμο στο: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%AF%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%B1_%CE%A4%CE%AD%CF%83%CE%BB%CE%B1, Ανακτήθηκε 5/4/2021
- KISHO (2019), “Αρχή του στροβίλου Tesla” Διαθέσιμο στο: <http://gr.kisho-nano-coating.com/info/tesla-turbine-principle-37478647.html> , Ανακτήθηκε 5/4/2021
- Peshlakai A. (2012), “Challenging the Versatility of the Tesla Turbine: Working Fluid Variations and Turbine Performance”. Arizona State University
- Σταυρόπουλος Δ.(2012), «ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΟΠΟΥ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΡΜΠΙΝΑΣ TESLA» , Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά
- Cairns WM.J. (2001), “The Tesla Disc Turbine” Camden Miniature Steam Services
- Δ.Μ(2018), “Νικόλα Τέσλα: το αρχέτυπο όλων των επιστημόνων του 20ου αιώνα”. Διαθέσιμο στο: <http://physics4u.gr/blog/2018/07/10/%CE%BD%CE%AF%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%B1-%CF%84%CE%AD%CF%83%CE%BB%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%B1%CF%81%CF%87%CE%AD%CF%84%CF%85%CF%80%CE%BF-%CF%8C%CE%BB%CF%89%CE%BD-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83/> Ανακτήθηκε 10/4/2021

12 Διασκευή από <http://physics4u.gr/blog/2018/07/10/%CE%BD%CE%AF%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%B1-%CF%84%CE%AD%CF%83%CE%BB%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%B1%CF%81%CF%87%CE%AD%CF%84%CF%85%CF%80%CE%BF-%CF%8C%CE%BB%CF%89%CE%BD-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83/> (2018).

2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Θα πραγματοποιηθεί μια μελέτη των ιδιοτήτων του αεροστροβίλου Τέσλα, με σύγκριση των επιδόσεων διαφορετικών εκδόσεων του αεροστροβίλου ως προς τα βασικά του κατασκευαστικά μεγέθη (μέγεθος και πλήθος δίσκων), όπως και διερεύνηση των πιθανών εφαρμογών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1 Σύντομη περίληψη κάθε κεφαλαίου

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία θα αναλυθούν εις βάθος διάφορα στοιχεία που περιγράφουν και καθορίζουν τη λειτουργία του στροβίλου Τέσλα.

Στο κεφάλαιο 2, αρχικά θα ασχοληθούμε με διάφορες θεωρητικές σχέσεις που περιγράφουν την εισαγωγή του ρευστού στην τουρμπίνα. Θα διαπιστώσουμε και στα επόμενα κεφάλαια τον πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η ταχύτητα και ο τρόπος εισαγωγής του ρευστού στη τουρμπίνα. Έτσι η διατήρηση της μάζας, η διατήρηση της ορμής, η εξίσωση του Euler και ο νόμος του Bernoulli θα μας βοηθήσουν να παρατηρήσουμε τα στοιχεία που διέπουν το στάδιο αυτό της εισαγωγής του ρευστού. Στο δεύτερο μισό του κεφαλαίου θα μελετήσουμε τη θεωρία του οριακού στρώματος. Είναι το βασικό φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η λειτουργία της τουρμπίνας. Θα μελετήσουμε τις ιδιότητες και τα στοιχεία του φαινομένου αλλά και τις εξισώσεις που το χαρακτηρίζουν.

Το κεφάλαιο 3, είναι το μεγαλύτερο και πολυσύνθετο κομμάτι της εργασίας. Περιγράφει μια ποικιλία χαρακτηριστικών που διέπουν τη λειτουργία του στροβίλου. Αρχικά θα εξετάσουμε τις δυνάμεις που προκαλούνται στο εσωτερικό του στροβίλου και τις σχέσεις που περιγράφουν την δυναμική των ρευστών. Ακολουθεί η μελέτη της απόδοσης, οι απώλειες και οι σχέσεις που την διέπουν. Θα παρουσιαστούν σημαντικές παράμετροι που διαμορφώνουν την κατασκευή της τουρμπίνας όπως διάμετρος δίσκων, πάχος δίσκων, αριθμός δίσκων, RPM κτλπ. Ταυτόχρονα θα παρουσιάζονται μελέτες και τα πειράματα διάφορων επιστημών για την επίδραση αυτών των παραμέτρων στην απόδοση της τουρμπίνας. Τέλος, θα δούμε κάποια διαγράμματα που προέρχονται από CFD αναλύσεις και αφορούν την οπτικοποίηση της ρευματογραμμής ρευστού, τις επιδράσεις της αναλογίας ακτίνας και τις αδιάστατες συνθήκες εισόδου.

Στο κεφάλαιο 4, θα πραγματοποιηθεί μια θεωρητική διερεύνηση στο κατά πόσο η απόδοση και το παραγόμενο έργο της τουρμπίνας επηρεάζεται από την πειραματική αλλαγή των μεταβλητών της ταχύτητας ρευστού στην είσοδο $V(m/s)$, τον αριθμό δίσκων A και της ακτίνας δίσκου $r(m)$. Ύστερα θα συζητήσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Στο τέλος θα βρούμε την ενδεικτική θεωρητική απόδοση της τουρμπίνας.

Στο κεφάλαιο 5, θα ανακεφαλαιώσουμε παρουσιάζοντας κάποια στοιχεία από τα προηγούμενα κεφάλαια και θα καταλήξουμε στα κατάλληλα συμπεράσματα παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τουρμπίνας Τέσλα. Τέλος, θα δούμε την εφαρμογή του στροβίλου Τέσλα σε κάποιες κατασκευές που έχουν σκοπό την εμπορική χρήση.

2.2 Θεωρία για την εισαγωγή του ρευστού

2.2.1 Η διατήρηση της μάζας και η εξίσωση συνέχειας

Η διατήρηση της μάζας εκφράζεται από την εξίσωση συνέχειας. Έστω ότι μια μάζα ρευστού εκρέει από κάποιο συγκεκριμένο σημείο, τότε η υπολειπόμενη μάζα στο σημείο αυτό πρέπει να μειώνεται. Στην προκειμένη περίπτωση έστω ότι V είναι όγκος ρευστού και S η περιβαλλόμενη κλειστή του επιφάνεια. Αν η ταχύτητα του ρευστού είναι \vec{u} τότε $\rho \vec{u}$ θα είναι η ροή μάζας που εκρέει ανά μονάδα επιφάνειας. Άρα η μάζα που θα εκρέει από την κλειστή επιφάνεια \vec{S} είναι: $\int_S \rho \vec{u} \cdot d\vec{S}$

Η παραπάνω σχέση πρέπει να ισούται με τη σχέση $\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV$ που εκφράζει το ρυθμό μείωσης της μάζας ανά μονάδα επιφάνειας για τον όγκο .

Δηλαδή πρέπει : $\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV = - \int_S \rho \vec{u} \cdot d\vec{S}$, όπου με το πρόσημο του μείον στο δεύτερο σκέλος συμβολίζεται η μείωση της μάζας που περιέχεται στον όγκο V λόγω του ότι τα διανύσματα \vec{u} και $d\vec{S}$ είναι της ίδιας φοράς.

Ενσωματώνοντας στην τελευταία σχέση το θεώρημα της αποκλίσεως, έχουμε:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV = \int_V \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) \cdot dV = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.2)$$

Η εξίσωση υποδηλώνει ότι υπάρχει ένα μέγεθος που ούτε καταστρέφεται και ούτε δημιουργείται. Συγκεκριμένα είναι μια μάζα όπου έχει πυκνότητα ρ και ροή ανά μονάδα επιφάνειας $(\rho \vec{u})$. Η (2.1) δείχνει το μηδενισμό του αθροίσματος της χρονικής παραγώγου της πυκνότητας συν την απόκλιση της ροής.

Η εξίσωση (2.2) ονομάζεται εξίσωση συνέχειας και ισχύει για όλα τα ρευστά είτε ιδανικά είτε πραγματικά. Σε περίπτωση που υπάρχουν πηγές ή καταβόθρες, αυτές προστίθενται στο δεξιό μέρος της εξίσωσης. Γενικά η εξίσωση της συνέχειας δηλώνει ότι η παροχή παραμένει σταθερή κατά μήκος μίας φλέβας (ενός σωλήνα), που διαρρέεται από υγρό.

Σε περίπτωση που η ροή είναι μόνιμη ή αλλιώς καμία παράμετρος της εξίσωσης δεν μεταβάλλεται

με το χρόνο τότε ισχύει $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ και η (2.2) γράφεται: $\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$ (2.3)

Το ρευστό το οποίο έχει σταθερή πυκνότητα σε όλο το χώρο του πεδίου ροής ονομάζεται ασυμπίεστο ρευστό. Όπως μπορούμε να υποθέσουμε για τη ροή υγρών ότι η πυκνότητα είναι σταθερή, έτσι μπορούμε να κάνουμε το ίδιο και για τα αέρια παρατηρώντας το αν η ταχύτητα ροής είναι μικρότερη από $100 m \cdot s^{-1}$ ($< 0.3 Mach$). Άρα η εξίσωση της συνέχειας για μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού είναι: $\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$ (2.4)

(13)

13 βλ. Αργυρίου (2005).

2.2.2 Η διατήρηση της ορμής

Κινητική ορμή αποκαλούμε την ορμή που έχει ένα κινούμενο ρευστό λόγω της ταχύτητάς του. Θεωρούμε το διανυσματικό πεδίο $\rho \vec{u}$ ως την πυκνότητα της κινητικής ροής. Η εξίσωση της ροής της κινητικής ορμής είναι: $d\vec{J} = (\rho \vec{u} * d\vec{S}) \vec{u}$.

Αναλυτικά μιλάμε για τη στοιχειώδη ορμή $d\vec{J}$ η οποία περνά διαμέσου της στοιχειώδους επιφάνειας $d\vec{S}$ ανά μονάδα χρόνου με κατεύθυνση από την πίσω προς την εμπρός πλευρά.

Η ποσότητα $d\vec{J}$ είναι ένα διάνυσμα που είναι γραμμική συνάρτηση της επιφάνειας $d\vec{S}$. Έτσι μπορεί να οριστεί ένας συμμετρικός τανυστής πυκνότητας κινητικής ορμής μέσω των σχέσεων:

$$d\vec{J} = (\rho \vec{u} * d\vec{S}) \vec{u} = T_m(, d\vec{S}), T_m = \rho \vec{u} \otimes \vec{u}.$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να γραφτεί το ίδιο η εξίσωση της διατήρησης της ορμής με την εξίσωση διατήρησης της μάζας, δηλαδή: $\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} * T_m = 0$ (2.5)

Στα ρευστά, η ορμή μεταβάλλεται επίσης και λόγω της ύπαρξης δυνάμεων που ασκούνται στην πίεση. Έτσι λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις δυνάμεις και τον τύπο η (2.5) γράφεται ως:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} * (\rho \vec{u} \otimes \vec{u} + pg) = 0$$
 (2.6)

Στην περίπτωση που το ρευστό βρίσκεται υπό την επίδραση βαρυτικού πεδίου τότε χρησιμοποιούμε την εξίσωση της ορμής (2.6) και προσθέτουμε στο δεξί μέλος της, την πυκνότητα της βαρυτικής δύναμης.

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} * (\rho \vec{u} \otimes \vec{u} + pg) = \rho \vec{g}$$
 (2.7)

Να σημειωθεί ότι το g δηλώνει το μετρικό τανυστή και το \vec{g} την επιτάχυνση της βαρύτητας.⁽¹⁴⁾

2.2.3 Η εξίσωση του Euler

Συνδυάζοντας της εξισώσεις διατήρησης της μάζας (2.2) και ορμής (2.5), προκύπτει η εξίσωση του Euler. Η εξίσωση διατήρησης της ορμής ρευστού σε βαρυτικό πεδίο είναι:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} * (\rho \vec{u} \otimes \vec{u} + pg) = \rho \vec{g} \rightarrow \\ & \rightarrow \vec{u} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} (\vec{\nabla} * (\rho \vec{u})) + \rho \vec{u} (\vec{\nabla} * \vec{u}) + \vec{\nabla} p = \rho \vec{g} \quad \text{με} \quad \vec{\nabla} * g = 0 \end{aligned}$$

14 βλ. Αργυρίου (2005).

Κάνοντας ομαδοποίηση των όρων έχουμε:

$$\vec{u} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) \right) + \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \right) + \vec{\nabla} p = \rho \vec{g}$$

Το άθροισμα των όρων στην πρώτη παρένθεση είναι μηδέν, καθώς οι όροι εκφράζουν το νόμο διατήρησης της μάζας. Στη συνέχεια θα διαιρέσουμε τους υπόλοιπους όρους κατά μέλη με την πυκνότητα ρ έτσι ώστε να βρούμε την έκφραση της εξίσωσης Euler.

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} \quad (2.8)$$

Αυτή η εξίσωση ισχύει για συμπιεστά και ασυμπίεστα ρευστά.

Στην περίπτωση των καρτεσιανών συντεταγμένων, οι εξισώσεις του Euler και της διατήρησης της μάζας συνθέτουν ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων με πέντε αγνώστους, όπως τους ρ , p , u , v , w . Για να λυθεί το συγκεκριμένο σύστημα χρειάζεται μία επιπλέον εξίσωση, η οποία πρέπει να συσχετίζει την πίεση p με την πυκνότητα ρ .⁽¹⁴⁾

2.2.4 Ο νόμος του Bernoulli

Αφετηρία για τη διατύπωση του νόμου του Bernoulli είναι η εξίσωση του Euler (2.8). Για να εκφράσουμε το νόμο του Bernoulli θα πρέπει πρώτα να ορίσουμε ένα φυσικό μέγεθος το οποίο το αποκαλούμε στροβιλότητα (vorticity) $\vec{\omega}$: $\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{u}$ (2.9)

Η μελέτη μας εδώ αφορά τα ιδανικά ρευστά στα οποία το ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα έχουν αμελητέα επίδραση. Έτσι αφού δεν είναι δυνατή η ανταλλαγή ποσών θερμότητας μεταξύ των στοιχείων του ρευστού και με το περιβάλλον της ροής, η ροή ιδανικού ρευστού είναι υποχρεωτικά αδιαβατική. Η εντροπία κάθε στοιχείου ρευστού κατά την αδιαβατική ροή παραμένει σταθερή. Αν θεωρήσουμε S την εντροπία ανά μονάδα μάζας τότε ισχύει: $S = const$. Η σχέση που αφορά την ενθαλπία ανά μονάδα μάζας του ρευστού H , σύμφωνα με τη θερμοδυναμική είναι:

$$dH = TdS + Vdp + \sum_i m_i dn_i$$

$$V = \frac{1}{\rho}$$

όπου T η θερμοκρασία του ρευστού, ρ ο ειδικός όγκος του, p η πίεση, m_i το χημικό δυναμικό, n_i ο αριθμός των γραμμομορίων του συστατικού i .

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο όρος $\sum_i m_i dn_i$ μηδενίζεται καθώς δέ γίνονται χημικές αντιδράσεις ή αν γίνονται είναι τόσο ταχείες που υπάρχει τοπική θερμοδυναμική ισορροπία ανάμεσα στην ευθεία αντίδραση και την αμφίδρομή της.

Η μεταβολή της ενθαλπίας με βάση το ότι η εντροπία είναι σταθερή γράφεται:

$$dH = Vdp = \frac{(dp)}{\rho}$$

Για την εξίσωση του Euler για ιδανικό ρευστό, θα αναπτύξουμε την υλική παράγωγο:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} * \vec{\nabla}) \vec{u} + \vec{\nabla} H = -\vec{\nabla} \Phi \quad (2.10)$$

όπου $-\vec{\nabla} = \vec{g}$

Χρησιμοποιώντας την ταυτότητα διανυσματικού λογισμού αλλά και την εξίσωση στροβιλότητας (2.9) έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \vec{\nabla} u^2 &= \vec{u} * (\vec{\nabla} * \vec{u}) + (\vec{u} * \vec{\nabla}) \vec{u} \rightarrow \\ &\rightarrow (\vec{u} * \vec{\nabla}) \vec{u} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} u^2 - \vec{u} * \vec{\omega} \end{aligned}$$

Επομένως, ένας διαφορετικός τρόπος γραφής της εξίσωση Euler αλλά και μια γενικότερη έκφραση του νόμου του Bernoulli είναι:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \left(\frac{1}{2} u^2 + H + \Phi \right) - \vec{u} * \vec{\omega} = 0 \quad (2.11)$$

Έστω ότι η ροή είναι μόνιμη και ισχύει $\frac{d\vec{u}}{dt} = 0$, τότε η εξίσωση (2.11) γίνεται:

$$\vec{\nabla} \left(\frac{1}{2} u^2 + H + \Phi \right) - \vec{u} * \vec{\omega} = 0 \quad (2.12)$$

Αν \hat{l} το μοναδιαίο διάνυσμα το οποίο εφάπτεται σε κάθε σημείο της ρευματικής γραμμής, το εσωτερικό γινόμενο του \hat{l} και της εξίσωσης (2.12) θα είναι:

$$\hat{l} * \vec{\nabla} \left(\frac{1}{2} u^2 + H + \Phi \right) - \hat{l} * (\vec{u} * \vec{\omega}) = 0 \quad (2.13)$$

Ξέρουμε ότι η προβολή της βαθμίδας μεγέθους A προς μία διεύθυνση είναι η παράγωγος του μεγέθους ως προς τη διεύθυνση αυτή, δηλαδή $\hat{l} * \vec{\nabla} A = \frac{\partial A}{\partial l}$. Ακόμη, το διάνυσμα $\vec{u} * \vec{\omega} = \vec{u} * \vec{\nabla} * \vec{u}$

είναι κάθετο στη διεύθυνση του \vec{u} κι επομένως η προβολή του $\vec{u} * \vec{\nabla} * \vec{u}$ στο \hat{l} θα είναι ίση με μηδέν. Άρα η εξίσωση κατά μήκος μίας ρευματικής γραμμής εκφράζεται ως:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{1}{2} u^2 + H + \Phi \right) = 0 \rightarrow \frac{1}{2} u^2 + H + \Phi = \text{Constant} . \quad (2.14)$$

Ο όρος $\frac{1}{2} u^2 + H + \Phi$ αποκαλείται σταθερά Bernoulli. Η έκφραση *Constant* μας δηλώνει ότι κατά τη μόνιμη ροή ιδανικού ρευστού, η σταθερά Bernoulli έχει την ίδια τιμή κατά μήκος της ίδιας ρευματικής γραμμής.

Αν αντικαταστήσουμε στην εξίσωση (2.10) όπου $\vec{\nabla} H = \vec{\nabla} \frac{p}{\rho}$ και $\vec{\Phi} = -\vec{g}$, μπορεί να αποδειχτεί ότι η σχέση (2.14) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p + \rho g z = \text{Constant} \quad (2.15)$$

Δηλαδή αυτή μορφή μας λέει ότι κατά τη μόνιμη ροή ιδανικού ρευστού, το άθροισμα της δυναμικής, της στατικής και της υψομετρικής πίεσης έχει την ίδια τιμή κατά μήκος της ίδιας ρευματικής γραμμής⁽¹⁵⁾.

2.3 Θεωρία οριακού στρώματος

2.3.1 Εισαγωγή στη θεωρία οριακού στρώματος

Η θεωρία του οριακού στρώματος ξεκίνησε με μια εργασία του Ludwig Prandtl σχετικά με την κίνηση ενός υγρού με πολύ μικρό ιξώδες, η οποία παρουσιάστηκε στο Τρίτο Διεθνές Συνέδριο Μαθηματικών τον Αύγουστο του 1904 στη Χαϊδελβέργη και δημοσιεύτηκε στα Πρακτικά του Συνεδρίου τον επόμενο χρόνο. Αυτό το έγγραφο σηματοδότησε μια νέα εποχή στην ιστορία της μηχανικής των ρευστών, ανοίγοντας τον τρόπο κατανόησης της κίνησης πραγματικών υγρών⁽¹⁶⁾. Έδειξε πως η ροή γύρω από ένα στερεό όριο είναι δυνατό να αναλυθεί σε δύο περιοχές. Η πρώτη είναι μία λεπτή στιβάδα πολύ κοντά στην περιοχή του στερεού ορίου, το γνωστό οριακό στρώμα. Η δεύτερη είναι μία περιοχή έξω από αυτό όπου η τριβή μπορεί να αγνοηθεί και η ροή εκεί χαρακτηρίζεται ως δυναμική ροή.

Σύμφωνα με τη φυσική οριακή συνθήκη, τα ρευστά σωματίδια τείνουν να προσκολλώνται με το στερεό όριο που βρίσκονται σε επαφή. Η ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων πάνω στην επιφάνεια του στερεού ορίου είναι μηδενική όσο η επιφάνεια του στερεού ορίου είναι ακίνητη. Έτσι παρατηρείται ότι η ταχύτητα του ρευστού γνωρίζει μια έντονη μεταβολή που οφείλεται στη ροή του

ρευστού γύρω από το σταθερό όριο. Η βαθμίδα της ταχύτητας $\frac{\partial u}{\partial y}$, αποκτά αρκετά μεγάλες τιμές στην περιοχή του στερεού ορίου, κατά διεύθυνση κάθετη πάνω σ' αυτό, με επακόλουθο όσο μικρό και να είναι το ιξώδες μ του ρευστού, η διατμητική τάση που δίνεται από τον νόμο του Νεύτωνα,

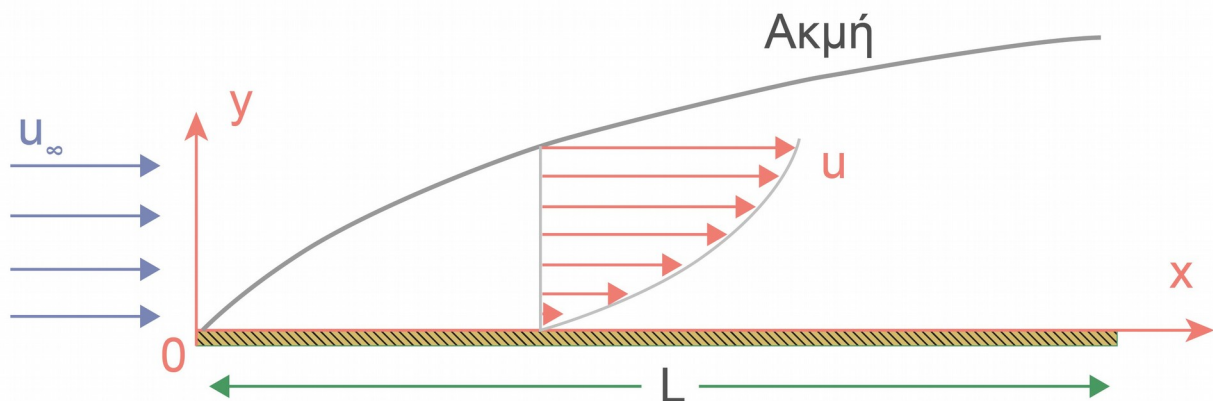
$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$, να λαμβάνει μεγάλες τιμές. Το περιστατικό αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αντίστασης κατά την κίνηση ενός στερεού σώματος μέσα στο ρευστό. Συνεπώς η επίδραση του ιξώδους στην περιοχή του στερεού ορίου δεν μπορεί να παραβλεφθεί.

Επομένως, οριακό στρώμα (boundary layer) ονομάζεται το λεπτό στρώμα ρευστού που βρίσκεται γύρω από το στερεό στην περιοχή της ροής, μέσα στην οποία η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει από την τιμή μηδέν, πάνω στην επιφάνεια του ορίου, έως την τιμή της ταχύτητας του ελευθέρου σώματος όπου η ροή θεωρείται ιδανική (χωρίς τριβή) (**Εικ. 9**).⁽¹⁷⁾

15 βλ. Αργυρίου (2005).

16 βλ. Tani (1997).

17 βλ. Ξένος & Τζιρτζιλιάκης (2018).



Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση οριακού στρώματος πάνω σε επίπεδη πλάκα ⁽¹⁸⁾

2.3.2 Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που διέπουν τη θεωρία οριακού στρώματος

Τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το οριακό στρώμα είναι το πάχος δ , το πάχος μετατόπισης δ^* και το πάχος ορμής δ_2 .

Συγκεκριμένα, πάχος του οριακού στρώματος δ ονομάζεται το εύρος της περιοχής μεταβολής της ταχύτητας. Λεπτομερώς, δ αποκαλούμε την απόσταση που είναι κάθετη στην επιφάνεια του στερεού ορίου κι εκεί η ταχύτητα του ρευστού γίνεται ίση με το 99% της ελεύθερης ρευματικής

ταχύτητας u_∞ . Η σχέση που δίνει το πάχος του οριακού στρώματος είναι: $\delta \simeq \sqrt{\frac{\nu \cdot L}{u_\infty}}$

όπου $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ είναι το κινηματικό ιξώδες και L το χαρακτηριστικό μήκος του στερεού.

Πάχος μετατόπισης ή μετάθεσης δ^* καλείται το πάχος ενός ιδεατού στρώματος ρευστού, το οποίο έχει ταχύτητα ίση με την ελεύθερη ρευματική ταχύτητα. Μέσα στο πάχος αυτό, η παροχή του ρευστού είναι ίση με τη μείωση της παροχής μέσα στο οριακό στρώμα, λόγω της επιβράδυνσης της

ροής. Η σχέση του είναι:
$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{u_\infty} \right) dy$$

Ακμή (edge) του οριακού στρώματος αποκαλούμε τη νοητή γραμμή που σχηματίζεται εκεί όπου η ταχύτητα είναι 1% μικρότερη της ελεύθερης ρευματικής ταχύτητας u_∞ . Κάθε μέγεθος σε αυτό το σημείο συμβολίζεται με τον δείκτη e (βλ. **Εικ. 9**).

Ελαττώνοντας την ταχύτητα του ρευστού μέσα στο οριακό στρώμα πραγματοποιείται ελάττωση της παροχής αλλά και της ορμής ή της κινητικής ενέργειας (ποσότητα κίνησης) μέσα σε αυτό.

Πάχος ορμής δ_2 ονομάζουμε το πάχος ενός ιδεατού στρώματος ρευστού που έχει ταχύτητα ίσης με την ελεύθερη ρευματική ταχύτητα u_∞ . Στο πάχος αυτό, η εισροή ποσότητας κίνησης είναι ίση με την αντίστοιχη μείωση δια μέσου του οριακού στρώματος. Η σχέση του είναι: ⁽¹⁸⁾

¹⁸ βλ. Ξένος & Τζιρτζιλάκης (2018).

$$\delta_2 = \int_0^{\delta} \left(\frac{u}{u_{\infty}} \right) \left(1 - \frac{u}{u_{\infty}} \right) dy$$

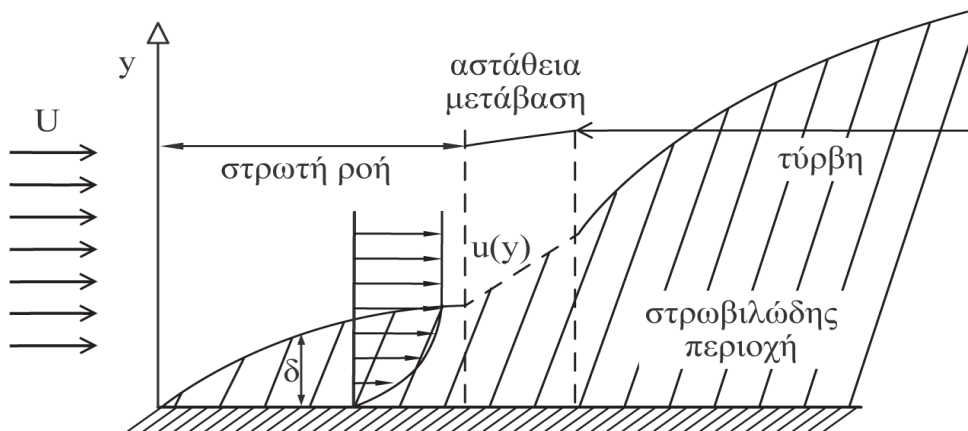
2.3.3 Ο αριθμός Reynolds και οι μορφές ροής

Ο αριθμός Reynolds έχει έναν πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς καθορίζει τον τύπο της ροής ενός ρευστού που κινείται μέσα σε έναν αγωγό ή γύρω από ένα στερεό όριο. Ορίζεται ως ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους και κατά συνέπεια ποσοτικοποιεί τη σχετική σημασία αυτών των δύο τύπων των δυνάμεων για δεδομένες συνθήκες ροής. Ο αριθμός αυτός χαρακτηρίζεται ως αδιάστατος αλλά παρόλα αυτά αποκτά έναν τοπικό χαρακτήρα και παύει να είναι σταθερός για ολόκληρη τη ροή. Έχει άμεση εξάρτηση από τη θέση που βρίσκεται το ρευστό σωματίδιο, δείχνοντας σε κάθε σημείο το πόσο μεταβάλλεται ο λόγος των δυνάμεων. Ο τοπικός αριθμός Reynold ορίζεται ως:

$$Re_x = \frac{u_e \cdot x}{\nu_e} \quad (3.1)$$

όπου u_e , ν_e συμβολίζεται η ταχύτητα του ελευθέρου ρεύματος και το κινηματικό ιξώδες του ρευστού στην ακμή του οριακού στρώματος, ενώ με το x εννοούμε το εκάστοτε μήκος.

Τα χαρακτηριστικά είδη ροής που εμφανίζονται στη φύση είναι τρία. Αυτά είναι η στρωτή ροή, η μεταπτωτική ροή και η τυρβώδης ροή. Κάθε μια από αυτές τις ροές διακρίνονται από διαφορετικά χαρακτηριστικά και συμπεριφορά.



Εικόνα 10: Σχηματική αναπαράσταση των τριών περιοχών με μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή, κατά μήκος της επιφάνειας (¹⁹).

19

Όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα (**Εικ.8**) τη ροή πάνω από μία πλάκα μεγάλου μήκους, αρχικά η ροή είναι στρωτή και το οριακό στρώμα είναι λεπτό. Εκεί τα ρευστά σωματίδια κινούνται σε παράλληλες στρώσεις χωρίς να υπάρχει μακροσκοπική μίξη μεταξύ των μορίων της μιας στρώσης με τις γειτονικές της. Επιπλέον η τροχιά των σωματιδίων διακρίνεται από μια προβλεψιμότητα αλλά όχι τυχαιότητα.

19 βλ. Φλυτζάνης (2015).

Στη συνέχεια, μετά τη στρωτή ροή διακρίνουμε τη μεταβατική ροή όπου χαρακτηρίζεται από κατά διαστήματα αστάθεια και λαμβάνει μέρος σε κυρίως μικρή περιοχή σε σχέση με την περιοχή των άλλων δυο τύπων ροής. Διάφοροι εξωτερικοί παράγοντες όπως τραχύτητα της επιφάνειας, η θέρμανση λόγω τριβής κ.ά. προκαλούν διαταραχές στη ροή, με αποτέλεσμα τα σωματίδια του ρευστού να αλλάζουν κατάσταση, μετακινούμενα από τη μια στρώση στην άλλη με έναν αυξανόμενο ταλαντούμενο τρόπο και έτσι δημιουργείται ένα ασταθές πεδίο ροής.

Στον τρίτο τύπο ροής που αποκαλείται τυρβώδης κι έχει πολύπλοκη δομή, τα ρευστά σωματίδια τείνουν να κινούνται και στις τρεις διαστάσεις με τελείως ακανόνιστο τρόπο. Η κίνηση αυτή των ρευστών σωματιδίων οδηγεί στην εμφάνιση δινών μέσα σε ολόκληρο το πεδίο ροής που διαφέρουν σε μέγεθος και κάνουν την ανάλυση του φαινομένου εξαιρετικά δύσκολη και προβληματική.

Προηγουμένως μιλήσαμε για τον τοπικό αριθμό Reynolds, Re_x , ο οποίος χαρακτηρίζει το είδος του οριακού στρώματος, σε δεδομένη απόσταση x από την αρχή της πλάκας. Στην πράξη, η μετατροπή της ροής εντός του οριακού στρώματος από στρωτή σε τυρβώδη θεωρείται ότι γίνεται όταν ο αριθμός Re_x υπερβεί μια κρίσιμη τιμή Re_{xp} , που ονομάζεται κρίσιμος αριθμός Reynolds. Το σημείο στο οποίο ο αριθμός Reynolds παίρνει αυτή του την τιμή λέγεται κρίσιμο σημείο και είναι ένα σημείο της μεταβατικής ροής. Θα πρέπει να σημειωθεί πως η τιμή του Re_{xp} ποτέ δεν είναι επακριβώς καθορισμένη, καθώς επηρεάζεται από παραμέτρους της ροής, όπως είναι η τραχύτητα των τοιχωμάτων και οι συνθήκες στην εισαγωγή του αγωγού.

Οι τρεις τύποι ροής έχουν άμεση εξάρτηση μεταξύ τους και συνήθως η μια ροή διαδέχεται την άλλη. Στο παράδειγμα της ροής πάνω από επίπεδη επιφάνεια ξεκινώντας από την οδηγούσα ακμή της πλάκας, ο αριθμός Reynolds που περιγράφει τη ροή τείνει να αυξάνεται όσο η ροή προχωράει από στρωτή σε τυρβώδη. Ο αριθμός Reynolds της μετάβασης για την περίπτωση της πλάκας μπορεί να μεταβάλλεται από 4×10^5 έως 4×10^6 κι έχει εξάρτηση από διάφορους παράγοντες, όπως την τύρβη του ελεύθερου ρεύματος, από τον αριθμό Mach του ομοιόμορφου ρεύματος αλλά και από τις συνθήκες που ισχύουν στην επιφάνεια του στερεού ορίου, όπως η θέρμανση ή ψύξη της συνοριακής επιφάνειας, η τραχύτητα αυτής, η βαθμίδα πίεσης και η απορρόφηση ή έγχυση που εφαρμόζεται σ' αυτήν.

Η ροή ενός ρευστού μέσα σ' έναν αγωγό εξασφαλίζεται από την πτώση της πίεσης. Έτσι ορίζουμε ως βαθμίδα πίεσης τον ρυθμό μεταβολής της πίεσης κατά την κύρια διεύθυνση της ροής.

Αξιοσημείωτη επίδραση στη ροή έχει η βαθμίδα πίεσης, η οποία επηρεάζει τόσο τη θέση του σημείου μετάπτωσης του οριακού στρώματος όσο και την ίδια την ύπαρξή του. Όποτε υπάρχει μείωση της πίεσης (επιταχυνόμενη ροή) σε μια περιοχή, τότε το οριακό στρώμα διατηρείται στρωτό, ενώ όταν υπάρχει αύξηση της πίεσης (επιβραδυνόμενη ροή) μπορεί να προκαλέσει και την αποκόλλησή του. Μετατοπίζοντας το σημείο μετάπτωσης επιτυγχάνεται η μείωση της επιδερμικής τριβής σε λεπτά στερεά όρια, κάνοντας την κατάλληλη επιλογή του σχήματος του στερεού ορίου αλλά και της αντίστοιχης κατανομής της πίεσης. Τα σώματα με αεροδυναμικό σχήμα έχουν μικρότερη επιδερμική τριβή (αντίσταση) σε σχέση με τα σώματα με μη αεροδυναμικό σχήμα, σε όσον αφορά την επίτευξη στρωτού οριακού στρώματος. Ροή με αντίξοη βαθμίδα πίεσης οδηγεί κατά κανόνα στην αποκόλληση του οριακού στρώματος από τη στερεή επιφάνεια ⁽²⁰⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾⁽²³⁾.

20 βλ. Φλυτζάνης (2015).

21 βλ. Σιδερίδης (2015).

22 βλ. Παπαϊωάννου (2013).

23 <http://iek-tripol.ark.sch.gr/autosch/joomla15/images/simeioseis/Reynolds.pdf>

2.3.4 Η αποκόλληση οριακού στρώματος

Η αποκόλληση (separation) του οριακού στρώματος είναι ένα μη θεμιτό φαινόμενο, καθώς προκαλεί πολλά προβλήματα όταν εμφανίζεται στη ροή, όπως για παράδειγμα την απότομη αύξηση της επιδερμικής τριβής. Σε περιοχές που εμφανίζεται αρνητική βαθμίδα πίεσης υπάρχει σοβαρός κίνδυνος αποκόλλησης του οριακού στρώματος.

Η τριβή και η αντίξοχη βαθμίδα πίεσης που υπάρχει στη ροή έχουν σοβαρή ευθύνη για την επιβάρυνση των ρευστών σωματιδίων μέσα στο οριακό στρώμα που βρίσκονται κοντά στο τοίχωμα του στερεού ορίου.

Αυτό έχει ως επακόλουθο τα ρευστά σωματίδια κοντά στο τοίχωμα να ακινητοποιούνται, καθώς δεν έχουν αρκετή ορμή να συνεχίσουν την κίνησή τους.

Το πάχος του οριακού στρώματος αποκτά μια αύξηση κατά την κατεύθυνση της κίνησης και η ροή μέσα σε αυτά τελικά αντιστρέφεται.

Έτσι τα ρευστά σωματίδια με επιβράδυνση που βρίσκονται στην επιφάνεια του στερεού ορίου τείνουν να κινηθούν προς τα έξω και κάθετα στην επιφάνεια της πλάκας και να αποκολληθούν από αυτό το τοίχωμα.

Το αναφερόμενο φυσικό φαινόμενο αποκαλείται αποκόλληση του οριακού στρώματος και συνδέεται με τον σχηματισμό στροβίλων, δημιουργώντας στο πίσω μέρος του στερεού σώματος μεγάλες απώλειες ενέργειας.

Στην περιοχή του σημείου αποκόλλησης αλλά και σε κάθε διάστημα κατά τη διεύθυνση της καθέτου στο στερεό όριο μέσα στο οριακό στρώμα, η ταχύτητα είναι μηδενική.

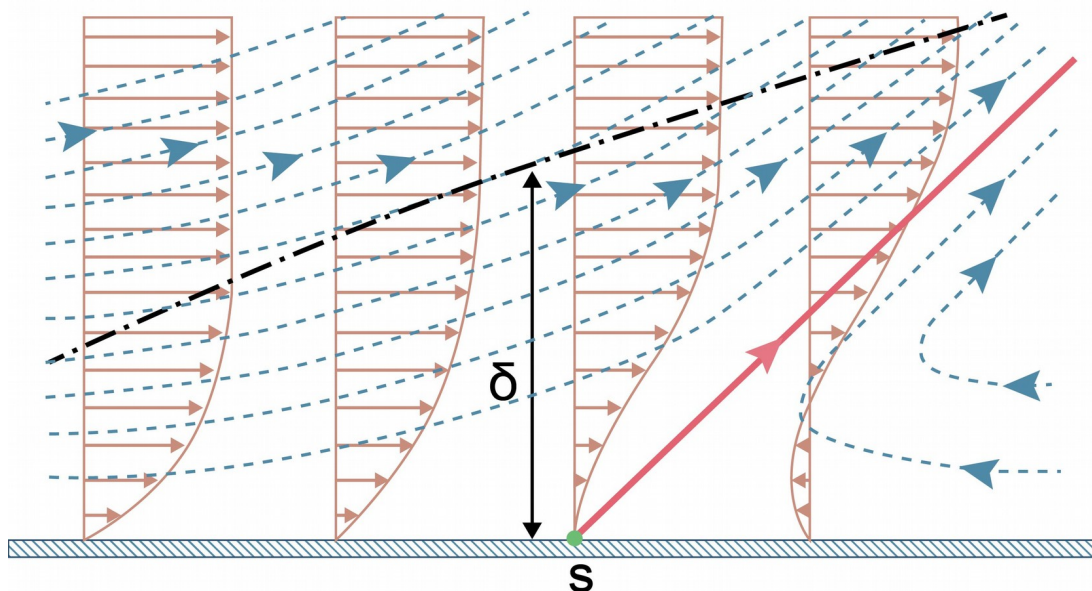
Η συνθήκη του μηδενισμού της βαθμίδας ταχύτητας πάνω στο τοίχωμα καθορίζει το σημείο διαχωρισμού. Άρα με $(wall \leftrightarrow w)$ έχουμε:

$$\left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]_w = 0 \quad (3.2)$$

που σημαίνει ότι η διαμητική τάση σε εκείνο το σημείο μηδενίζεται δηλαδή:

$$T_{wall} = \left[\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right]_w = 0$$

Το φαινόμενο της αποκόλλησης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.⁽²⁴⁾



Εικόνα 10: Αντιστροφή της ροής και αποκόλληση του οριακού στρώματος ⁽²⁴⁾.

24 βλ. Ξένος & Τζιρτζιλάκης (2018).

Τα σώματα που έχουν κυκλική διατομή (μη αεροδυναμικά), όπως κύλινδροι και σφαίρες, είναι αυτά που κάνει κυρίως την εμφάνισή του το φαινόμενο της αποκόλλησης. Αυτό συμβαίνει γιατί πάνω σε αυτά υπάρχει μια συγκεκριμένη περιοχή που το ρευστό παθαίνει μια έντονη επιβράδυνση, αποκτώντας μια αποκλίνουσα κατανομή πίεσης σε σύγκριση με αυτή των ιδανικών ρευστών. Η αποκόλληση σε αυτά τα σώματα οφείλεται στη μεγάλη αντίστασή τους, λόγω της ύπαρξης μεγάλης αντίξοης βαθμίδας πίεσης. Ο Prandtl υποστήριξε ότι το σημείο αποκόλλησης εξαρτάται κυρίως από εξωτερικές συνθήκες. Για να εμφανιστεί αποκόλληση στο στρωτό οριακό στρώμα αρκεί μια μικρή τιμή της αντίξοης βαθμίδας πίεσης. Ενώ όσον αφορά την τυρβώδη ροή υπάρχει μικρότερος κίνδυνος σε σύγκριση με τη στρωτή ροή, καθώς υπάρχει τυρβώδης ανάμιξη. Δηλαδή έχουμε συνεχή ανταλλαγή της ορμής από τη δυναμική ροή προς τη ροή στο οριακό στρώμα, με αποτέλεσμα να επανενεργοποιεί το τυρβώδες οριακό στρώμα, καθιστώντας το λιγότερο ευάλωτο σε σχέση με το στρωτό οριακό στρώμα.

2.3.5 Οι μέθοδοι πρόληψης για την αποκόλληση του οριακού στρώματος

Οι μέθοδοι πρόληψης της αποκόλλησης έχουν ως κύριο στόχο να ελέγξουν τη ροή και να την οδηγήσουν προς μια συγκεκριμένη κατάσταση, επιδρώντας στη δομή του οριακού στρώματος.

Ο έλεγχος του οριακού στρώματος είναι μια σημαντική τεχνική που αφορά την πρόληψη για την αποφυγή της αποκόλλησης. Εφαρμόζεται κυρίως στην αεροναυπηγική, όπου είναι αναγκαία η πρόληψη για την αποφυγή της αποκόλλησης, ώστε να μειωθεί η οπισθέλκουσα (τριβή). Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι ελέγχου του οριακού στρώματος. Μια από αυτές είναι η εφαρμογή κινούμενων ορίων, ώστε να αυξηθεί η άντωση (^{1*}) της πτέρυγας και να αποφευχθεί η απώλεια στήριξής της.

Ίσως η σημαντικότερη μέθοδος είναι η απορρόφηση (suction) μέρους του οριακού στρώματος δια μέσου οπών ή σχισμών της συνοριακής επιφάνειας. Η απορρόφηση συμβάλλει στην απομάκρυνση των επιβραδυνόμενων ρευστών σωματιδίων που βρίσκονται στο οριακό στρώμα πριν προκληθεί αποκόλλησή του. Δημιουργείται ένα νέο οριακό στρώμα που είναι ικανό να εξουδετερώσει την αντίξοη βαθμίδα πίεσης στην περιοχή πίσω από τη σχισμή. Κάνοντας κατάλληλη κατανομή των σχισμών, η αποκόλληση μπορεί να αποφευχθεί.

Άλλες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί είναι ο σχεδιασμός του στερεού σώματος με κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα (laminar airfoils), κάτι που χρησιμοποιείται πάρα πολύ σήμερα. Τέλος υπάρχει και η τεχνική ψύξης/θέρμανσης των τοιχωμάτων του στερεού ορίου που βοηθά στον έλεγχο του οριακού στρώματος. Η δουλειά της ψύξης είναι να περιορίσει το φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος και να σταθεροποιεί τη ροή πάνω από την πλάκα. Απεναντίας, η θέρμανση έχει στόχο να αποσταθεροποιεί τη ροή και να την οδηγεί πιο γρήγορα στην αποκόλληση.⁽²⁵⁾

^{1*}Άντωση ενός σώματος που κινείται μέσα σε ένα ρευστό είναι η συνιστώσα της δύναμης που ασκείται στο σώμα από το ρευστό, σε διεύθυνση κάθετη στην κίνηση του σώματος (<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%86%CE%BD%CF%84%CF%89%CF%83%CE%B7>)

²⁵ βλ. Ξένος & Τζιρτζιλιάκης (2018).

2.3.6 Η αδιαστατοποίηση των εξισώσεων

Παρακάτω θα εξετάσουμε την αδιάστατη μορφή των εξισώσεων. Αυτή η διαδικασία θα μας βοηθήσει να ομαλοποιήσουμε εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές, έτσι ώστε να εμφανιστούν αδιάστατοι παράμετροι και με αυτό τον τρόπο να καταφέρουμε να ομαδοποιήσουμε το πρόβλημα και να το κάνουμε γενικότερο. Θα χρειαστεί να θεωρήσουμε τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής σε διανυσματική μορφή για τη συμπιεστή χρονοανεξάρτητη περίπτωση με μηδενική επίδραση καθολικών δυνάμεων:

$$\text{Εξίσωση συνέχειας : } \nabla \cdot \bar{q}_0 = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{Εξισώσεις Navier-Stokes : } (\tilde{q}_0 * \nabla) \bar{q}_0 = \frac{-1}{\rho} \nabla p_0 + \nu \nabla^2 \bar{q}_0 \quad (3.4)$$

όπου $\bar{q}_0 = (u_0, v_0)$ θεωρείται το διάνυσμα της διαστατικής ταχύτητας, ρ η πυκνότητα του ρευστού και ν το κινηματικό ιξώδες. Για να πραγματοποιήσουμε την αδιαστατοποίηση των εξισώσεων πρέπει να ενσωματώσουμε τις εξής αδιάστατες ποσότητες:

$$\bar{q} = \frac{\bar{q}_0}{u_\infty}, \quad \bar{q} = (u, v), \quad \bar{q}_0 = (u_0, v_0), \quad (3.5)$$

$$\bar{r} = \frac{[r_0]}{L}, \quad \bar{r} = (x, y), \quad \bar{r}_0 = (x_0, y_0), \quad (3.6)$$

$$p = \frac{p_0}{\rho u_\infty^2} \quad (3.7)$$

όπου u_∞ είναι η ταχύτητα του ελευθέρου ρεύματος. Οι αδιάστατες εξισώσεις σε καρτεσιανές συντεταγμένες έχουν τη μορφή:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (3.8)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\Re} \left(\frac{u \partial^2}{\partial x^2} + \frac{u \partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (3.9)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\Re} \left(\frac{v \partial^2}{\partial x^2} + \frac{v \partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (3.10)$$

Οι συνοριακές συνθήκες της ταχύτητας για τη δισδιάστατη περίπτωση είναι.

$$\begin{aligned} y=0 : u=0, v=0, \\ y \rightarrow \delta : u=1 (u_0=u_\infty) \end{aligned} \quad (3.11)$$

(²⁶)

26 βλ. Ξένος & Τζιρτζιλάκης (2018).

2.3.7 Απλοποίηση των εξισώσεων για δισδιάστατο οριακό στρώμα

Οι εξισώσεις Navier-Stokes μπορούν να απλοποιηθούν, κάνοντας ανάλυση της τάξης μεγέθους των όρων τους για την περίπτωση του οριακού στρώματος. Θα χρειαστεί να κάνουμε κάποιες υποθέσεις, έτσι ώστε να πετύχουμε τον στόχο μας. Αυτές είναι ότι δεν υπάρχει βαθμίδα ταχύτητας (δυναμική ροή) εκτός του οριακού στρώματος και ότι υπάρχουν μηδενικές διατμητικές τάσεις στη δυναμική ροή. Το πάχος του οριακού στρώματος δ είναι πολύ μικρότερο από το μήκος της επίπεδης πλάκας L . Επίσης ισχύουν οι παρακάτω οριακές συνθήκες: $y=0: u=0, v=0,$

$$y \rightarrow \delta: u=1 (u_0 \sim u_\infty)$$

Τέλος πρέπει να ισχύει ότι στην ακμή του οριακού στρώματος: $u_0 \sim u_\infty$

Άρα, από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$u \sim \frac{u_0}{u_\infty} \rightarrow u \sim 1,$$

$$x \sim \frac{x_0}{L} \rightarrow x \sim 1,$$

$$y \sim \frac{y_0}{L} \rightarrow y \sim \frac{\delta}{1} \rightarrow y \sim \delta.$$

Βάσει της εξίσωσης συνέχειας έχουμε:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \rightarrow \frac{1}{1} + \frac{v}{\delta} = 0 \rightarrow v \sim \delta,$$

αφού έχουμε αδιάστατα μεγέθη u, v, x, y . Ισχύει ότι:

$$\frac{\partial v}{\partial x} \sim \frac{\delta}{1} \rightarrow \frac{\partial v}{\partial x} \sim \delta$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} \sim \frac{\delta}{\delta} \sim 1$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \sim \frac{1}{\delta} \sim 1 \quad \text{και} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \sim \delta$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \sim \frac{\partial}{\partial x} 1 \rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \sim 1$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \sim \frac{1}{\delta^2}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \sim \frac{\delta}{\delta^2} \rightarrow \frac{\partial v}{\partial y^2} \sim \frac{1}{\delta}$$

Ενσωματώνοντας αυτούς τους όρους στις εξισώσεις *Navier-Stokes*, προκύπτει ότι κάποιοι από τους όρους ιξώδους είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τους όρους των δυνάμεων αδράνειας, μόνο αν:

$$\Re \sim \frac{1}{\delta^2} \rightarrow \frac{1}{\Re} \sim \delta^2$$

Με τη χρησιμοποίηση των παραπάνω όρων, γίνεται απλοποίηση των εξισώσεων συνέχειας και ορμής στη x - και y - διεύθυνση κι έτσι προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.12)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\Re} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3.14)$$

με συνοριακές συνθήκες: $y=0 : u=0, v=0, \quad y \rightarrow \delta : u=1$ (3.15)

Από την εξίσωση (3.14) προκύπτει ότι $p = p(x)$. Έτσι η πίεση στην y - διεύθυνση είναι σταθερή και εκλαμβάνουμε ότι είναι ίση με την πίεση της εξωτερικής δυναμικής ροής, σύμφωνα με τη θεωρία ροής ιδανικού ρευστού, όπως προβλέπει η εξίσωση Bernoulli.

Σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli που ισχύει για την περίπτωση σταθερής ροής ανιζωδικού ρευστού, υπό την επίδραση συντηρητικού πεδίου δυνάμεων ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή μη του δυναμικού της ταχύτητας, έχουμε ότι:

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho_\infty u_\infty^2 = c_1 \quad (3.16)$$

με C να είναι σταθερά. Αφού παραγωγίσουμε ως προς x_0 την προηγούμενη εξίσωση προκύπτει ότι:

$$\frac{dp_0}{dx_0} + \rho_\infty v_\infty \frac{du_\infty}{dx_0} = 0 \rightarrow -\frac{dp_0}{dx_0} = \rho_\infty u_\infty \frac{du_\infty}{dx_0} \quad (3.17)$$

με p_0 και x_0 να θεωρούνται διαστατικές ποσότητες. Αδιαστατοποιώντας αυτήν τη σχέση, ισχύει:

$$\frac{-dp}{dx} = \frac{1}{u_\infty} \frac{du_\infty}{dx}$$

Συνεπώς, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις (3.12), (3.13) με τις συνοριακές συνθήκες (3.15) με βάση την εξίσωση (3.17) γράφονται ως:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.18)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{u_\infty} \frac{du_\infty}{dx} + \frac{1}{\Re} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.19)$$

με συνοριακές συνθήκες: $y=0 : u=0, v=0$,
 $y \rightarrow \delta : u=1$. (27) (3.20)

2.3.8 Λύσεις ομοιότητας - το πρόβλημα του Blasius

Με τον όρο “πρόβλημα του Blasius” εννοούμε το γενικότερο πρόβλημα της μόνιμης ροής ομογενούς και ασυμπίεστου ρευστού, σταθερής και ελεύθερης ρευματικής ταχύτητας u_∞ , πάνω από λεπτή, ημιάπειρη, επίπεδη επιφάνεια (πλάκα) ⁽²⁸⁾. Ο Blasius είχε βγάλει το συμπέρασμα ότι υπάρχει ομοιότητα στις κατανομές της ταχύτητας $u = u(x, y)$ σε διάφορα σημεία στις τρέχουσες αποστάσεις x κατά μήκος του οριακού στρώματος. Σε αυτήν τη γεωμετρική ομοιότητα, οι κατανομές της ταχύτητας κατά μήκος του οριακού στρώματος μπορούν να συμπέσουν, σε περίπτωση που σχεδιαστούν με κατάλληλη κλίμακα για την ταχύτητα u και για την εγκάρσια διάσταση y . Θεωρώντας έτσι ότι υπάρχει μόνιμη ροή ομογενούς και ασυμπίεστου ρευστού, με σταθερή ομοιόμορφη ταχύτητα ελευθέρου ρεύματος u_∞ (= σταθερά), παράλληλη προς την πλάκα, θα ισχύει:

$$\frac{du_\infty}{dx} = 0 \quad \text{και} \quad \frac{dp}{dx} = 0$$

Συνεπώς, δεν υπάρχει βαθμίδα πίεσης κατά μήκος του οριακού στρώματος. Στην προκειμένη περίπτωση, η ροή στο οριακό στρώμα πραγματοποιείται μέσω της παρουσίας ελευθέρου ρεύματος. Οι εξισώσεις και οι αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες που καθορίζουν τη ροή αυτή είναι οι εξής:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.21)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.22)$$

$$y=0 : u=0, v=0,$$

$$y \rightarrow \infty : u = u_\infty \quad (2.23)$$

Ενσωματώνουμε τον μετασχηματισμό ομοιότητας και τη ρευματική συνάρτηση $\Psi(x, y)$:

27 βλ. Ξένος & Τζιρτζιλάκης (2018).

28 βλ. Κορμανιώτης (2006).

$$\eta = y \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} = \frac{y}{x} \sqrt{Re}, \quad \Psi(x, y) = \sqrt{\nu x u_\infty} f(\eta) \quad (2.24)$$

όπου $f(\eta)$ είναι η αδιάστατη ρευματική συνάρτηση και το η δηλώνει την αδιάστατη κατακόρυφη συνιστώσα στη ροή, Re είναι ο αριθμός Reynolds και ισχύει $Re = \frac{u_\infty x}{\nu}$. Οι υπολογισμοί για τις συνιστώσες της ταχύτητας:

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} = \sqrt{\nu x u_\infty} f'(\eta) \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} = u_\infty f'(\eta),$$

$$v = \frac{-\partial \Psi}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\sqrt{\nu x u_\infty} f(\eta) \right] = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\nu u_\infty}}{x} \left[\eta f'(\eta) - f(\eta) \right],$$

αφού

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{-1}{2} \frac{y}{x} \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} = \frac{-1}{2} \frac{\eta}{x},$$

Τότε:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [u_\infty f'(\eta)] = u_\infty f''(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{-1}{2} \frac{\eta}{x} u_\infty f''(\eta),$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu u_\infty}{x}} \left[\eta f'(\eta) - f(\eta) \right] \right] = \frac{1}{2} \frac{u_\infty}{x} \eta f''(\eta),$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} u_\infty f'(\eta) = u_\infty \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} f''(\eta),$$

$$\frac{u \partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left[u_\infty \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} f''(\eta) \right] = \frac{u_\infty^2}{\nu x} f'''(\eta).$$

Με αυτήν την επιλογή ρευματικής συνάρτησης ικανοποιείται αυτόματα η εξίσωση συνέχειας. Με βάση τα παραπάνω, η εξίσωση ορμής γράφεται:

$$u_\infty f'(\eta) \left| \frac{-1}{2} \frac{\eta}{x} u_\infty f''(\eta) \right| + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu u_\infty}{x}} \left[\eta f'(\eta) - f(\eta) \right] u_\infty \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} f''(\eta) = \frac{u_\infty^2}{\nu x} f'''(\eta)$$

ύστερα από απλοποιήσεις γίνεται:

$$f'''(\eta) + \frac{1}{2} f(\eta) f''(\eta) = 0 \quad (2.25)$$

Οι ανάλογες συνοριακές συνθήκες είναι:

$$\eta = 0: f = f' = 0, \eta = \infty: f' = 1 \quad (2.26)$$

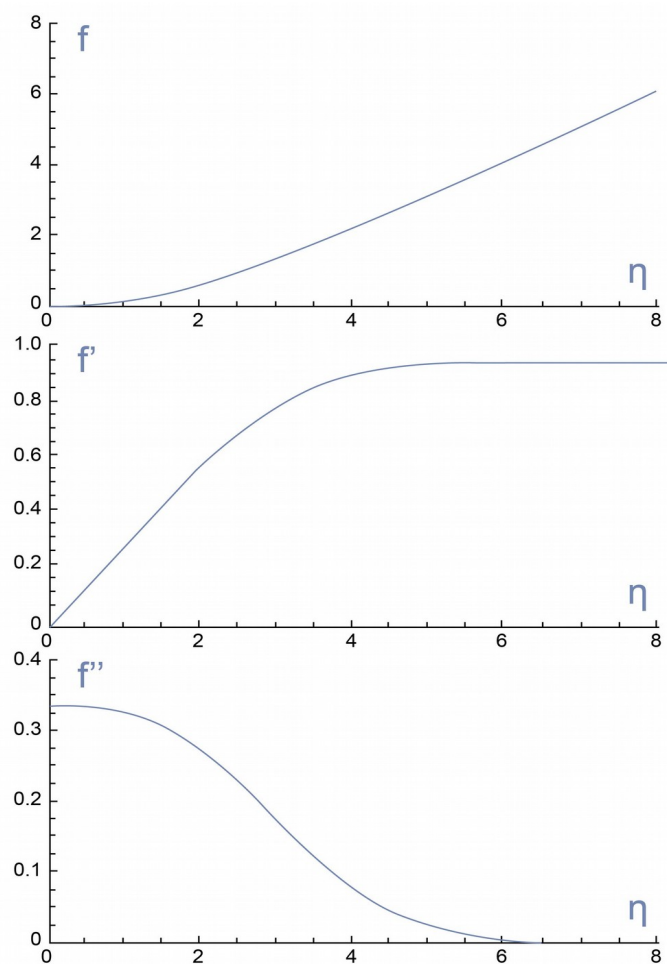
Έτσι το αρχικά πολύπλοκο πρόβλημα με πολλές διαφορικές εξισώσεις μετατράπηκε στο πλήρως ισοδύναμο και σαφώς απλούστερο πρόβλημα συνοριακών τιμών που αφορά τελικά μόνο μια διαφορική εξίσωση. Ο Blasius χρησιμοποίησε τη μέθοδο των σειρών για να δώσει τη λύση των εξισώσεων (2.25) και (2.26). Συγκεκριμένα, βρήκε τη λύση αναπτύσσοντας μια σειρά δυνάμεων του η , της μορφής $f(\eta) = a_2 \eta^2 + a_3 \eta^3 + a_4 \eta^4 + \dots$ γύρω από $\eta=0$, υπολογίζοντας μία ασυμπτωτική έκφραση της $f(\eta)$ για μεγαλύτερες τιμές του η και συνδυάζοντας και τις δύο λύσεις σε μια κατάλληλη τιμή του η . Ακολουθεί η εξίσωση της λύσης σε μορφή σειρών, χωρίς να δίνεται περαιτέρω συνέχεια ⁽²⁹⁾:

$$f(\eta) = \sum_{k=0}^{+\infty} \left(\frac{-1}{2}\right)^k \frac{A_k \sigma^{k+1}}{(3k+2)!} \eta^{3k+2} \quad (2.27)$$

όπου $A_0 = A_1 = 1$

$$A_k = \sum_{r=0}^{k-1} \frac{(3k-1)}{3r} A_r A_{k-r-1}, k \geq 2 \quad (2.28)$$

⁽³⁰⁾



Εικόνα 12: Οι γραφικές παραστάσεις των $f(\eta)$, $f'(\eta)$ και $f''(\eta)$ ⁽³⁰⁾

29 βλ. Παναγούλα (2014)

30 βλ. Ξένος & Τζιρτζιλάκης (2018).

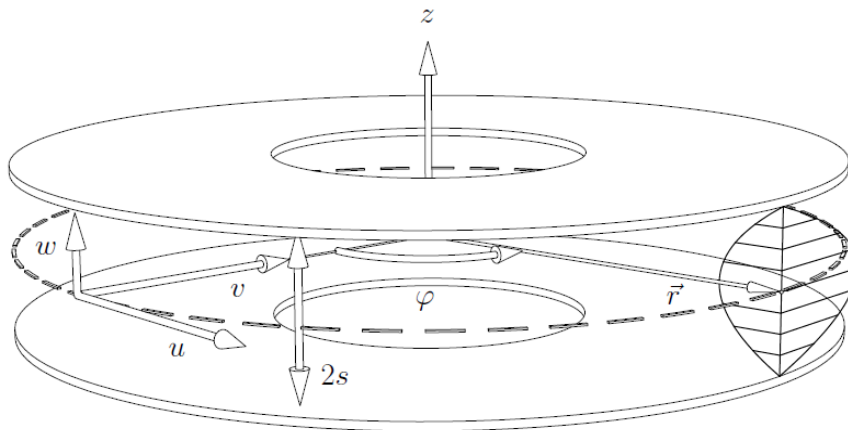
Βιβλιογραφία - Ιστογραφία

- Αργυρίου Α.(2005), «Μηχανική των Ρευστών: Πανεπιστημιακές Παραδόσεις». Πανεπιστήμιο Πατρών:Τμήμα Φυσικής
- Tani I. (1977), ‘‘HISTORY OF BOUNDARY LA YER THEORY’’, Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 9, pp. 87-111
- Ξένος Μ. & Τζιρτζιλάκης Ε.(2018), «Μηχανική Ρευστών με εφαρμογές». Εκδόσεις Gotsis, Πάτρα
- Φλυτζάνης Ν. (2015), «Εισαγωγή στη Μηχανική των Ρευστών». Διαθέσιμο στο: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5345/2/00_master_document-KOY.pdf , Ανακτήθηκε 5/5/2021
- Σιδερίδης Γ.Α. (2015), «Εργαστηριακές Ασκήσεις Ρευστομηχανικής». Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/4183> , Ανακτήθηκε 6/5/2021
- Παπαϊωάννου Α. (2013), «ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ, Σημειώσεις». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Ιέκ Τρίπολης, «Σημειώσεις:Αριθμός Reynolds». Διαθέσιμο στο: <http://iek-tripol.ark.sch.gr/autosch/joomla15/images/simeioseis/Reynolds.pdf> , Ανακτήθηκε 1/5/2021
- Κορμανιώτης Ε. (2006), «Έλεγχος του Οριακού Στρώματος Η Μέθοδος Απορρόφησης - Έγχυσης ». Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μαθηματικών, Τομέας Εφαρμοσμένης Ανάλυσης
- Παναγούλα Β.(2014), «Λύσεις Ομοιότητας σε Προβλήματα Μηχανικής των Ρευστών» . Τμήμα Μαθηματικών Πανεπιστήμιο Πατρών

3. ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

3.1 Θεωρητική ανάλυση μοντέλου ροής

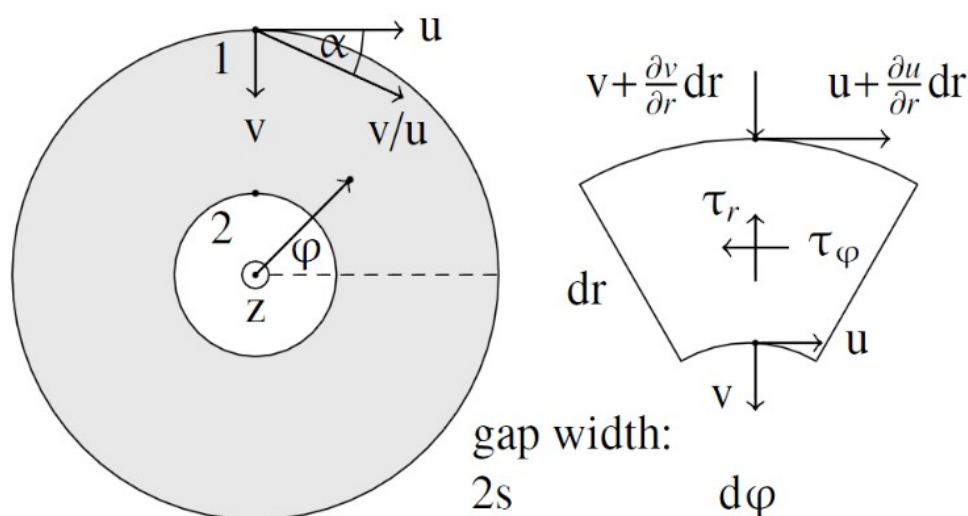
Οι κατανομές ακτινικής και εφαπτομενικής ταχύτητας μεταξύ περιστρεφόμενων, παράλληλων δίσκων απεικονίζονται στην **Εικόνα 13**.⁽³¹⁾



Εικόνα 13: Η ροή του ρότορα μέσω σύνθεσης κυλινδρικών συντεταγμένων⁽³¹⁾

3.1.1 Περιγραφή ασυμπίεστης στρωτής ροής

Από τον ημι-απειροελάχιστο όγκο ελέγχου, που φαίνεται στην **Εικόνα 14**, μπορούν να ληφθούν οι εξισώσεις που διέπουν την ασυμπίεστη, στρωτή ροή του ρότορα, η οποία υπολογίζεται κατά μέσο όρο στο διάστημα μεταξύ των δίσκων. Το απόλυτο πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιείται εδώ.



Εικόνα 14: Ημι-απειροελάχιστος όγκος ελέγχου (ενσωματωμένος στο πλάτος του χάσματος)⁽³¹⁾

31 Από Schosser, Lecheler & Pfitzner (2017)

Προκειμένου να υπολογιστεί η εφαπτομενική τάση διάτμησης, οι απόλυτες συντεταγμένες μετατρέπονται σε σχετικό πλαίσιο χρησιμοποιώντας την ακόλουθη έκφραση:

$$u = c + \omega * r \quad (3.1.1)$$

όπου c η σχετική περιφερειακή ταχύτητα (m/s), ω η γωνιακή ταχύτητα ($1/s$) και r η ακτίνα ρότορα (m)

Η εξίσωση συνέχειας σταθερής κατάστασης, οι εφαπτομενικές (φ -) και οι ακτινικές (r -) εξισώσεις ορμής για τη μαζική ροή μπορούν να γραφτούν ως:

$$\frac{d(\rho * r * v)}{dr} = 0 \quad (3.1.2)$$

$$\rho * v * \left[\frac{du}{dr} + \frac{u(r)}{r} \right] - \frac{\mu}{s} \left(\frac{dc}{dz} \right) = 0 \quad (3.1.3)$$

και

$$\rho \left[v(r) * \frac{du}{dr} + \frac{u(r)^2}{r} \right] + \frac{dp}{dr} - \frac{\mu}{s} \left(\frac{dv}{dz} \right) = 0 \quad (3.1.4)$$

όπου ρ η πυκνότητα (kg/m^3), v το κινηματικό ιξώδες (m^2/s), μ το δυναμικό ιξώδες ($Pa \cdot s$), s το το ήμισυ του πλάτους του διακένου ρότορα (m)

Οι εξισώσεις (3.1.1) και (3.1.2) γίνονται αδιάστατες χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες αλγεβρικές εκφράσεις:

$$C(R) = \frac{c(r)}{u_1}, \quad U(R) = \frac{u(r)}{u_1}, \quad V(R) = \frac{v(r)}{u_1} \quad (3.1.5)$$

η αδιάστατη πίεση είναι: $P(R) = \frac{p(r)}{\rho * u_1^2} \quad (3.1.6)$

Οι αδιάστατες παράμετροι μηχανής, οι οποίες έχουν ήδη εισαχθεί από τον Beans το 1961 και παρουσιάστηκαν πιο πρόσφατα από Schosser, Lecheler, Pfitzner το 2014 είναι:

$$\beta = \frac{3}{2} * \frac{r_1}{s} * \frac{v}{v_1 s} = \frac{3}{2} * \frac{r_1}{s} * \frac{1}{Re} \quad (3.1.7)$$

$$V_1 = \frac{v_1}{u_1}, \quad \Omega = \frac{\omega * r_1}{u_1}, \quad R = \frac{r}{r_1} \quad (3.1.8)$$

όπου Re ο αριθμός Reynolds

Οι αδιάστατες εξισώσεις έχουν ως αποτέλεσμα την αδιάστατη εφαπτομενική εξίσωση ορμής στο απόλυτο πλαίσιο:

$$\frac{dU(R)}{dR} + \left(\frac{1}{R} - 2\beta R\right) * U(R) + 2\beta\Omega R^2 = 0 \quad (3.1.9)$$

ή με την περιφερειακή ταχύτητα του δίσκου:

$$U(R) = C(R) + \Omega * R \quad (3.1.10)$$

στο σχετικό πλαίσιο είναι :

$$\frac{dC(R)}{dR} + \left(\frac{1}{R} - 2\beta R\right) * C(R) + 2\Omega = 0 \quad (3.1.11)$$

και η εξίσωση αδιάστατης ακτινικής ορμής :

$$\frac{dP}{dR} - V_1^2 * \left(\frac{1}{R^3} + \frac{2\beta}{R} - \frac{U(R)^2}{R}\right) = 0 \quad (3.1.12)$$

Για την αξιολόγηση και τη σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων CFD, καθορίζονται οι ακόλουθοι συντελεστές.

$$C_{to} = \frac{A_1 v_1 \rho_1 * (u_1 r_1 - u_2 r_2)}{M_{max}} \quad (3.1.13)$$

όπου M_{max} η μέγιστη ισχύουσα ροπή (Nm)

Ο συντελεστής ισχύος είναι η ισχύς του άξονα κανονικοποιημένη με τη μέγιστη ισχύ που προκύπτει:

$$C_{po} = \frac{M * \omega}{P_{max}} \quad (3.1.14)$$

όπου M η ροπή (Nm)

Ένας καλός δείκτης για τη βέλτιστη απόδοση είναι ένας άλλος ορισμός της ισχύος του άξονα:

$$C_{pt} = \frac{P_{shaft}}{A_1} * (p_{1,t} - p_2)^{\frac{3}{2}} \quad (3.1.15)$$

Η συνολική απόδοση του ισεντροπικού ρότορα για την ασυμπιεστη ροή είναι αυτή που δίνεται από:

$$\eta_{is} = \frac{P_{shaft}}{\dot{m} \left[\left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \frac{v_2^2}{2} \right) - \left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + \frac{v_1^2}{2} \right) \right]} \quad (3.1.16)$$

όπου \dot{m} ο ρυθμός ροής μάζας (g/s)

Ξεκινώντας με μια δισδιάστατη κατανομή ταχύτητας σε όλη την ακτίνα του ρότορα, η μεταφορά ορμής μεταξύ τοιχώματος και ρευστού δεν είναι ακόμη περιγράψιμη. Επομένως, η ροπή και η ισχύς είναι εφικτές μόνο με μια πρόσθετη υπόθεση. Αυτό γίνεται με την παραδοχή του παραβολικού προφίλ ταχύτητας μεταξύ των δίσκων για στρωτή ροή. Η προκύπτουσα τάση διάτμησης τοιχώματος σε περιφερειακή κατεύθυνση ενσωματωμένη στην ακτίνα οδηγεί στο χάρτη απόδοσης. Τα υποτιθέμενα προφίλ κλιμακώνονται με τις επικρατούσες μαζικές ταχύτητες σε

ακτινική και περιφερειακή κατεύθυνση. Τα αποτελέσματα ανάπτυξης της ροής στην είσοδο του ρότορα αγνοούνται σε αυτό το μοντέλο ροής. Η παράμετρος β περιγράφει το ρυθμό ροής και καθορίζει τον τύπο της δίνης στο διάκενο και επομένως είναι ζωτικής σημασίας για την παραγόμενη απόδοση.

Άλλες σημαντικές παράμετροι για τη βέλτιστη απόδοση είναι η γωνία ταχύτητας εισόδου V_1 (ή α), ο λόγος ακτίνας R και η γωνιακή ταχύτητα Ω , καθώς και η πραγματική κατανομή αξονικής ταχύτητας, οι οποίες διερευνώνται και επικυρώνονται με CFD (Δυναμική υπολογιστικών ρευστών).⁽³²⁾

Μιας και αναφέραμε το CFD, είναι σημαντικό να μιλήσουμε λίγο παραπάνω για αυτό καθώς στη συνέχεια και κυρίως στο τέλος του κεφαλαίου θα αποτελέσει σημαντικό εργαλείο. Η δυναμική των υπολογιστικών ρευστών (CFD) είναι ένας κλάδος της μηχανικής ρευστών που χρησιμοποιεί αριθμητική ανάλυση και δομές δεδομένων για να αναλύσει και να λύσει προβλήματα που περιλαμβάνουν ροές ρευστών. Υπολογιστές χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των απαιτούμενων υπολογισμών, για την προσομοίωση της ροής ελεύθερου ρεύματος του ρευστού και την αλληλεπίδραση του ρευστού (υγρά και αέρια) με επιφάνειες που ορίζονται από οριακές συνθήκες. Η συνεχιζόμενη έρευνα αποδίδει λογισμικό που βελτιώνει την ακρίβεια και την ταχύτητα σύνθετων σεναρίων προσομοίωσης, όπως διατονικές ή ταραγμένες ροές. Η αρχική επικύρωση ενός τέτοιου λογισμικού πραγματοποιείται συνήθως χρησιμοποιώντας πειραματικές συσκευές. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύγκριση αναλυτική ή εμπειρική ανάλυση που έχει πραγματοποιηθεί προηγουμένως. Μια τελική επικύρωση πραγματοποιείται συχνά χρησιμοποιώντας δοκιμές πλήρους κλίμακας. Μια αδιάστατη ανάλυση και μελέτες CFD πραγματοποιήθηκαν από τους A. Guha και S. Sengupta το 2014. Οι CFD μελέτες που θα δούμε στη συνέχεια βασίζονται στην εργασία τους.⁽³³⁾

3.1.2 Επέκταση σε συμπίεστη, στρωτή ροή

Με βάση την υπόθεση του ασυμπίεστου μοντέλου για την στρωτή ροή, οι εξισώσεις ορμής επεκτείνονται σε συνθήκες συμπίεσιμης ροής. Η ενεργειακή εξίσωση απαιτείται επιπλέον σε αυτήν την περίπτωση. Λόγω της μεταβολής της πυκνότητας, η εξίσωση συνέχειας γράφεται ως εξής:

$$\rho(r) * r * v = \rho_1 * r_1 * v_1 \quad (3.1.17)$$

Η εξίσωση εφαπτομενικής ορμής ορίζεται στη συνέχεια ως:

$$\rho(r) * v(r) * \left[\frac{du}{dr} + \frac{u(r)}{r} \right] - \frac{\mu}{s} \left(\frac{dc}{dz} \right) = 0 \quad (3.1.18)$$

Η εξίσωση της ακτινικής ορμής δίνεται από :

$$\rho(r) * \left[v(r) * \frac{dv}{dr} + \frac{u(r)^2}{r} \right] + \frac{dp}{dr} - \frac{\mu}{s} \left(\frac{dv}{dz} \right) = 0 \quad (3.1.19)$$

Η ενεργειακή εξίσωση σε αλγεβρικό ορισμό είναι:

$$\dot{m} (u(r)r - u_1 r_1) \omega + \dot{m} [c_p (T(r) - T_1)] + \frac{1}{2} [(u(r)^2 - u_1^2) + (v(r)^2 - v_1^2)] = 0 \quad (3.1.20)$$

32 Από Schosser, Lecheler & Pfitzner (2017).

33 Διασκευή από https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics

Για τον ορισμό των αδιάστατων εξισώσεων, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις: Η αδιάστατη θερμοκρασία είναι:

$$T'(R) = \frac{T(r)}{T_1} \quad (3.1.21)$$

Η αδιάστατη ενθαλπία είναι:

$$H_1 = \frac{u_1^2}{c_p * T_1} \quad (3.1.22)$$

όπου c_p η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση (J/kgK)

Η εισαγωγή της εξίσωσης συνέχειας (3.1.19) στην τέλεια εξίσωση αερίου οδηγεί στην αδιάστατη έκφραση πυκνότητας:

$$P_\rho(R) = \frac{\rho(r, T)}{\rho_1} = \frac{V_1}{R * V(R)} \quad (3.1.23)$$

Για την έκφραση του αδιάστατου δυναμικού ιξώδους, ο τύπος Sutherland μαζί με την εξίσωση (3.1.21) χρησιμοποιείται:

$$M_\mu(R) = \frac{\mu(r, T)}{\mu_1} = \frac{\mu_0}{\mu_1} * \frac{T_0 + C_0}{T'(R) * T_1 + C_0} * \left(\frac{T'(R) * T_1}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.1.24)$$

όπου C_0 η σταθερά του Sutherland (K), T_0 θερμοκρασία αναφοράς του τύπου Sutherland (K), μ_0 το ιξώδες αναφοράς του τύπου Sutherland (Pa*s)

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.1.5) έως (3.1.8) και (3.1.21) έως (3.1.24), οι ρυθμιστικές εξισώσεις μπορούν να διατυπωθούν σε αδιάστατη περιγραφή. Η αδιάστατη εφαπτομενική εξίσωση ορμής είναι:

$$\frac{du}{dR} + R(U(R) + 2\beta M_\mu(R)(\Omega - U(R))) = 0 \quad (3.1.25)$$

όπου M_μ ο αδιάστατος συντελεστής δυναμικού ιξώδους

Η εξίσωση ακτινικής ορμής σε αδιάστατη μορφή είναι:

$$\frac{dP}{dR} - V_1 \left(\frac{dV}{dR} + \frac{U(R)^2}{V(R)R^2} + 2\beta M_\mu(R)V(R) \right) = 0 \quad (3.1.26)$$

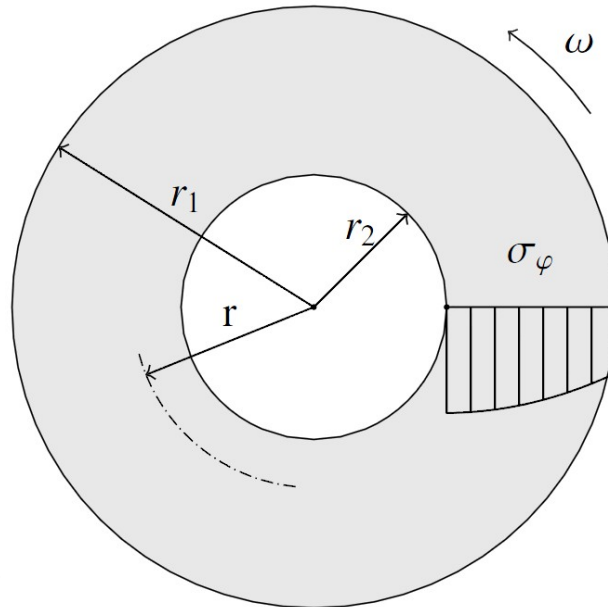
Ως εκ τούτου, η ενεργειακή εξίσωση ορίζεται ως:

$$T'(R) = \frac{H_1}{2} \left(\frac{\Omega}{2} (1 - R * U(R)) - U(R)^2 - V(R)^2 + V_1^2 + 1 \right) + 1 \quad (3.1.27)$$

(34)

3.1.3 Μηχανικοί περιορισμοί

Ένας διάτρητος δίσκος υπό συνεχή περιστροφή (χωρίς επιτάχυνση), δημιουργεί εφαπτομενική και ακτινική μηχανική τάση, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 15**.



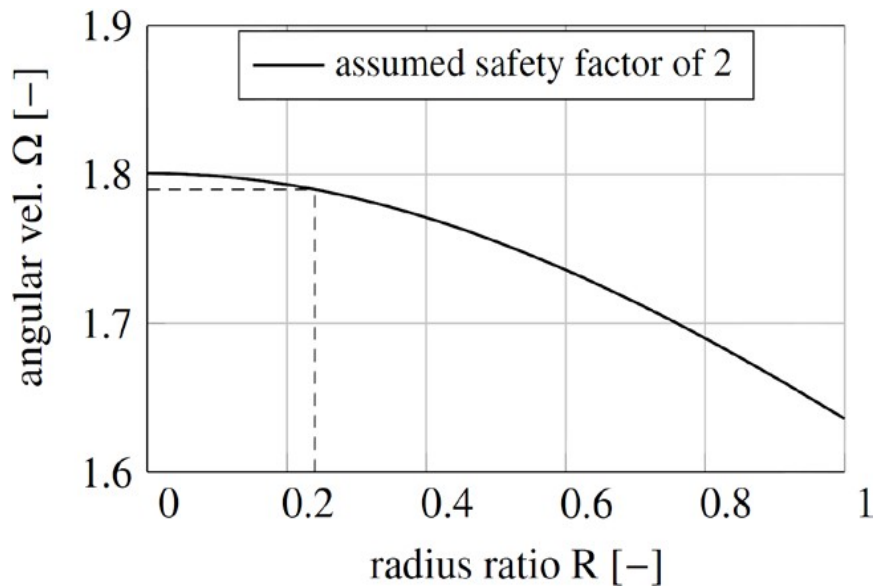
Εικόνα 15: Κεντρικά τρυπημένος δίσκος υπό συνεχή περιστροφή⁽³⁵⁾

Η μέγιστη τάση είναι στην εσωτερική ακτίνα r_2 . Συγκρίνοντας αυτήν την τιμή από την εξίσωση (3.1.17) με την αντοχή θραύσης του υλικού δίσκου, καθορίζει τη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα πριν από την καταστροφή των δίσκων.

$$\sigma_{\varphi}(r=r_2) = \frac{3+\nu_p}{8} \rho \omega^2 r_1^2 \left[1 + \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{r_1}{r}\right)^2 - \frac{1+3\nu_p}{3+\nu_p} \left(\frac{r}{r_1}\right)^2 \right] \quad (3.1.28)$$

Η μέγιστη εφαρμοζόμενη γωνιακή ταχύτητα είναι σαφώς συνάρτηση της εσωτερικής ακτίνας r_2 , η οποία περιορίζει ολόκληρο το εύρος στροφών του στροβίλου Tesla, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 16**. Επομένως, η εξίσωση (3.1.17) λύνεται για ω και καθίσταται αδιάστατη με την εξίσωση (3.1.8). Το μέγιστο όριο γωνιακής ταχύτητας μειώνεται με την αύξηση του λόγου ακτίνας R (ή υψηλότερου ρότορα εσωτερικής ακτίνας r_2). Ο αναλυτικός υπολογισμός μηχανικής καταπόνησης καταναλώνει χαμηλή υπολογιστική ισχύ και προσφέρει πλεονεκτήματα κατά τη διαδικασία σχεδιασμού. Μια γεωμετρία δίσκου για βέλτιστη κατάσταση ροής δεν είναι απαραίτητα λογική από άποψη μηχανικού σχεδιασμού. Αυτό μπορεί τώρα να κριθεί αμέσως. Οι μηχανικοί περιορισμοί λαμβάνονται υπόψη στην ακόλουθη ανάλυση μοντέλου και CFD.

³⁵ Από Schosser, Lecheler & Pfitzner (2017).



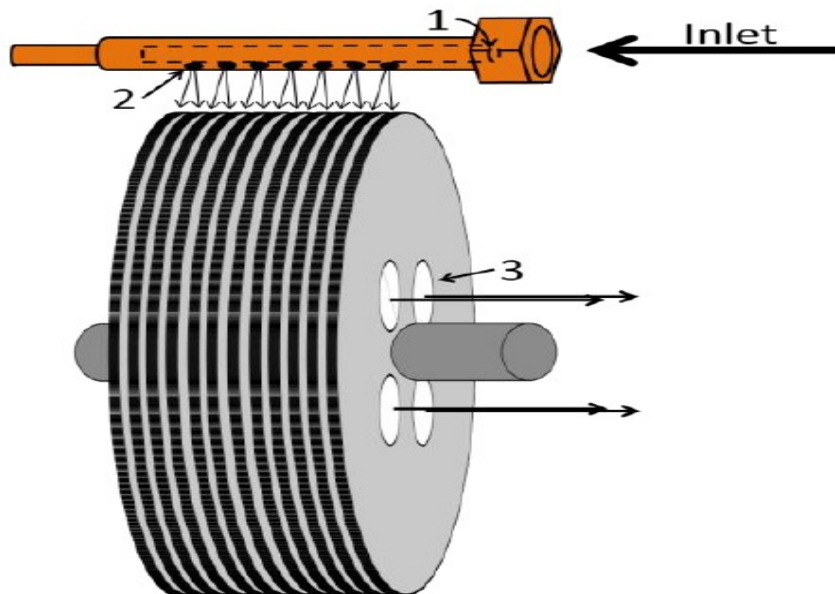
(³⁶)

Εικόνα 16: Περιορισμοί γωνιακής ταχύτητας (³⁶)

3.2 Στοιχεία που διέπουν την απόδοση της τουρμπίνας

3.2.1 Απόδοση του ρότορα και ο υπολογισμός της

Στην παρακάτω εικόνα (**Εικ.17**) βλέπουμε τη θέση των σημείων κατάστασης που χρησιμοποιούνται κατά τις διάφορες αναλύσεις ρευστών. Το σημείο 1 είναι η είσοδος του άξονα που έχει τρυπηθεί στο ακροφύσιο. Το σημείο 2 βρίσκεται στις οπές εξόδου του ακροφυσίου. Το σημείο 3 βρίσκεται στην εξάτμιση του ρότορα, που αντιστοιχεί και στην εξάτμιση της τουρμπίνας.



Εικόνα 17: Σχέδιο σημείων κατάστασης προσδιορισμού ακροφυσίων και ρότορα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση.⁽³⁷⁾

³⁶ Από Schosser, Lecheler & Pfitzner (2017).

³⁷ Διασκευή από Peshlakai (2012).

Η απόδοση του ρότορα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις συνθήκες ρευστού στα σημεία κατάστασης 2 και 3 (βλ. **Εικ.17**).

Το πραγματικό έργο πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μετρήσεις της παραγωγής της γεννήτριας και υπολογίζοντας την αποδοτικότητα της γεννήτριας αλλά και τις 15% άλλες απώλειες. Η απόδοση του ρότορα ορίζεται ως η έξοδος της μηχανικής ενέργειας προς την μείωση της μηχανικής ενέργειας του ρευστού κατά μήκος του ρότορα. Το πραγματικό έργο και η απόδοση του ρότορα υπολογίζονται ως:

$$\dot{W} = \frac{1.15}{0.93} * Voltage * Amperange \quad (3.2.1)$$

$$\eta_{rotor} = \frac{\dot{W}}{W_f} \quad (3.2.2)$$

όπου W_f είναι το μηχανικό έργο του ρευστού. ⁽³⁸⁾

3.2.2 Υπολογισμός απόδοσης τουρμπίνας

Λόγω της αδυναμίας της πειραματικής επαλήθευσης των συνθηκών ρευστού στο σημείο κατάστασης 2 (μετά το ακροφύσιο και πριν από την είσοδο του ρότορα), μπορεί να είναι πιο ακριβές να προσδιοριστεί η συνολική απόδοση του στροβίλου χρησιμοποιώντας μετρούμενες συνθήκες στα σημεία κατάστασης 1 και 3. Αυτή η απόδοση θα απαιτεί πρώτα τον υπολογισμό του έργου του στροβίλου από 1 έως 3 χρησιμοποιώντας την ενθαλπία στα σημεία αυτά:

$$\dot{W}_t = \dot{m} [(h_1 - h_3) + \frac{1}{2}(V_1^2 - V_3^2)] - \dot{Q}_k \quad (3.2.3)$$

όπου h_1, h_3 η ενθαλπία στα σημεία 1-3 (kJ/kg), V_1, V_3 η ταχύτητα ρευστού έργου (m/s), \dot{Q}_k η συνολική μεταφορά θερμότητας σε περιβάλλοντα χώρο (W) και \dot{m} ο ρυθμός ροής μάζας (g/s)

Έτσι η απόδοση του στροβίλου θα υπολογιζόταν ως εξής: ⁽³⁸⁾

$$\eta_{Turbine} = \frac{\dot{W}}{W_t} \quad (3.2.4)$$

3.2.3 Η σημασία του ακροφύσιου στην απόδοση της τουρμπίνας μέσα από μελέτες

Ο Krishnan ⁽³⁹⁾, δοκίμασε συνολικά οκτώ διαφορετικά ακροφύσια. Τέσσερα από τα ακροφύσια είχαν κυκλική είσοδο, αλλά μακρόστενη έξοδο. Η περιοχή, το πλάτος και το μήκος αυτών των ακροφυσίων ήταν σταθερά. Ωστόσο, το τόξο πλάτους και η γωνία που σχηματιζόταν με τους ρότορες ήταν διαφορετικά. Ένα από τα ακροφύσια είχε παρόμοια κυκλική είσοδο αλλά είχε πέντε μικρότερους κυκλικούς σωλήνες ως την έξοδο. Ένα άλλο ακροφύσιο είχε σχήμα χωνιού, με φθίνουσα περιοχή κατά μήκος του, αλλά με μικρή αύξηση στην έξοδο για να καλύψει ένα ευρύτερο τόξο. Το μήκος και το πλάτος του ήταν μόνο οριακά μεγαλύτερο από τα άλλα, αλλά η περιοχή ήταν σχεδόν διπλάσια. Δοκιμάστηκαν τέσσερις διαφορετικές γωνίες ακροφυσίων. Από αυτά τα πειράματα, διαπιστώθηκε ότι για τις γωνίες των ακροφυσίων που είναι πιο μακριά από την

38 Διασκευή από Peshlakai (2012).

39 Krishnan(2015).

εφαπτομένη γωνία με το ρότορα, οι στροφές ανά λεπτό του στροβίλου μειώθηκαν. Αυτή η μείωση αποδόθηκε στην αύξηση της ακτινικής ταχύτητας και στον ταχύτερο ρυθμό εξόδου, με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη μεταφορά ενέργειας. Τα ακροφύσια με μικρότερες επιφάνειες ανέπτυξαν υψηλότερες στροφές ανά λεπτό που ήταν αποτέλεσμα της υψηλότερης κινητικής ενέργειας του ρευστού που εισέρχεται στον ρότορα.

Οι Guha και Smiley⁽⁴⁰⁾ πραγματοποίησαν πειραματικές και αριθμητικές δοκιμές για να μελετήσουν τις απώλειες που συμβαίνουν στα ακροφύσια ώστε να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητά τους. Νέα ακροφύσια αναπτύχθηκαν τροποποιώντας ακροφύσια που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενη δοκιμή. Ενώ άλλοι συγγραφείς όπως ο Lawn and Rice⁽⁴¹⁾ ανέφεραν ότι η απόδοση του ρότορα μπορεί να φτάσει τιμές κοντά στο 95% , οι Guha και Smiley⁽⁴⁰⁾ ανέπτυξαν μια πειραματική ρύθμιση για να τη μετρήσουν για πρώτη φορά. Η απόδοση του στροβίλου ήταν περίπου 25% και από τις αναλύσεις CFD, οι Guha και Smiley βρήκαν ότι το ακροφύσιο και η είσοδος αυτού του παλιού σχεδίου συμβάλλουν στο 35% της απώλειας της πίεσης ανακοπής. Οι Guha και Smiley δοκίμασαν ένα νέο ακροφύσιο το οποίο είχε μια ορθογώνια περιοχή εξόδου και έναν συνοδευτικό θάλαμο. Η απώλεια πίεσης ανακοπής σε αυτό το ακροφύσιο ήταν μικρότερη από 1%. Το ακροφύσιο είχε ένθετα για να το κάνει συμβατό με ρότορες που περιείχαν διαφορετικό αριθμό δίσκων κλείνοντας τις υπερβολικές εξόδους. Ωστόσο τα ένθετα ήταν ύποπτα ότι δεν κατάφεραν να αποτρέψουν τη διαρροή. Η μείωση της απώλειας πίεσης ανακοπής αποδόθηκε στον θάλαμο ολομέλειας, καθώς επέτρεψε μια πιο ομοιόμορφη ροή μέσω του ακροφυσίου.

Οι Lampart και Jędrzejewski⁽⁴²⁾ βελτίωσαν την υπολογιστική εργασία που είχαν πραγματοποιήσει στο παρελθόν. Δύο μοντέλα εξετάστηκαν για αριθμητική προσομοίωση. Το απλούστερο μοντέλο θεωρούσε τη συμμετρική ροή στο κενό μεταξύ των δίσκων. Τέσσερα, έξι και οκτώ ακροφύσια σε γωνίες 10° και 15° σχεδιάστηκαν για το μοντέλο. Για απλότητα, η περιοχή του άξονα αντιμετωπίστηκε ως η εξάτμιση. Δεν υπήρχαν ειδικές οπές εξάτμισης στους δίσκους όπως υπήρχαν σε ρεαλιστικά μοντέλα. Εξετάστηκε ένας άπειρος αριθμός δίσκων. Η υψηλότερη απόδοση που ελήφθη από τους Lampart και Jędrzejewski ήταν με τη διαμόρφωση των τεσσάρων ακροφυσίων σε γωνία εισόδου 10° και με ταχύτητα περιστροφής 18000 RPM . Μια περαιτέρω αύξηση στον αριθμό των ακροφυσίων είχε αρνητική επίδραση στην απόδοση. Το εύρημα ήταν παρόμοιο με την προηγούμενη εργασία τους⁽⁴³⁾, η οποία έλεγε επίσης ότι η διαμόρφωση των τεσσάρων ακροφυσίων ήταν η πιο αποτελεσματική. Μια αύξηση της γωνίας από 10° σε 15° προκάλεσε πτώση απόδοσης 8%.

Ο Kristian Holland⁽⁴⁴⁾ χρησιμοποίησε τρισδιάστατα εκτυπωμένα ακροφύσια κατασκευασμένα από γυαλί γεμάτο με νάιλον. Το σχέδιο του ακροφυσίου ήταν εύκολα ανταλλάξιμο για το συγκρότημα του στροβίλου, αλλά ήταν πολύπλοκο, γεγονός που δικαιολογούσε τη χρήση της 3D εκτύπωσης. Δοκιμάστηκαν συνολικά πέντε γωνίες ακροφυσίου – 2.5° , 5° , 7.5° , 12.5° και 45° , σε σχέση με την εφαπτομενική διεύθυνση. Σε αντίθεση με άλλη βιβλιογραφία, η μέγιστη ροπή και επιτάχυνση παρατηρήθηκαν όταν το ακροφύσιο ήταν ακτινωτό (45°) προς τους δίσκους. Ο Kristian Holland σχολίασε ότι απαιτείται πρόσθετη μελέτη για την κατανόηση της υποκείμενης αιτίας.

Ο James H. Armstrong⁽⁴⁵⁾ δοκίμασε μια ποικιλία ακροφυσίων. Αρχικά, ένα μικρό μήκος σωλήνα με εσωτερική διάμετρο $0,269$ ίντσες χρησιμοποιήθηκε ως ακροφύσιο και αργότερα χρησιμοποιήθηκαν αρκετά αποκλίνοντα ακροφύσια. Αυτά αποτελούνταν από ένα ακροφύσιο

40 Guha & Smiley (2010).

41 Lawn & Rice (1974).

42 Lampart & Jędrzejewski (2011).

43 Lampart, Jędrzejewski, Kosowski & Piwowski (2009).

44 Holland (2016).

45 Armstrong (1952).

διαμέτρου 0,125 ιντσών με ένα αποκλίνον τμήμα 15°, ένα ακροφύσιο 0,188 ιντσών με ένα αποκλίνον τμήμα 15 ° και τέλος ένα ακροφύσιο 0,269 ιντσών με ένα αποκλίνον τμήμα 7°. Όλα τα ακροφύσια ήταν ευθυγραμμισμένα για να δέχονται ατμό περίπου εφαπτομενικά στην περιφέρεια των δίσκων του ρότορα. Το ακροφύσιο 0,125 ιντσών βρέθηκε πολύ μικρό για αποτελεσματική λειτουργία. Η μέγιστη ιπποδύναμη και ροπή πέδησης αποκτήθηκαν με το αποκλίνον ακροφύσιο 0,269 ιντσών. Ο Armstrong κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η δοκιμή μόνο τεσσάρων ακροφυσίων δεν μπορεί να καθορίσει το πιο αποτελεσματικό, αλλά έδειξε ότι ο σχεδιασμός του ακροφυσίου είχε σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση του στροβίλου.

Οι Hoya και Guha ⁽⁴⁶⁾ χρησιμοποίησαν έναν ανταλλάξιμο τύπο ακροφυσίου. Αποτελούνταν από μια κυκλική οπή με μια ακτινωτή σχισμή που ενεργούσε ως έξοδος ακροφυσίου. Η αχρησιμοποίητη περιοχή της σχισμής μπλοκαρίστηκε με διαμορφωμένα ένθετα όταν ο στρόβιλος δοκιμαζόταν με ρότορες διαφορετικού πλάτους. Οι Hoya και Guha θεώρησαν την σχέση (3.2.5) για να υπολογιστεί η απόδοση ως ο λόγος της πραγματικής ισχύος προς την ισχύ της ροής εισόδου. Μία σχεδόν εφαπτομενική γωνία ακροφυσίου βρέθηκε να είναι η βέλτιστη, με την απόδοση να παραμένει σχεδόν σταθερή μεταξύ 5° και 15° σε σχέση με την εφαπτομενική διεύθυνση. Το πλάτος του ακροφυσίου δεν είχε σημαντική επίδραση στην απόδοση.

$$\eta_{\Omega, stream} = \frac{\tau * \omega}{Q * p_{01}} \quad (3.2.5)$$

όπου 01 οι συνθήκες στην είσοδο του ακροφυσίου, τ η ροπή, p η πίεση, Q η ταχύτητα ροής όγκου και ω η γωνιακή ταχύτητα ρότορα.

Από τις παραπάνω μελέτες, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι ο σχεδιασμός των ακροφυσίων είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του στροβίλου. Αυτό ήταν ιδιαίτερα εμφανές από τη μελέτη των Guha και Smiley ⁽⁴⁷⁾, η οποία διαπίστωσε μία μείωση της απώλειας πίεσης ανακοπής από 35% σε 1% βελτιστοποιώντας τον σχεδιασμό του ακροφυσίου. Επιπλέον, οι περισσότεροι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι μια σχεδόν εφαπτομενική γωνία ακροφυσίου ήταν κατάλληλη για την καλύτερη απόδοση. Μια μεγάλη απόκλιση από αυτό προς την ακτινική κατεύθυνση προκάλεσε μείωση της απόδοσης.⁽⁴⁸⁾

3.2.4 Σημαντικοί παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της τουρμπίνας μέσω μελετών

Οι Hoya και Guha ⁽⁴⁶⁾ υποστήριξαν ότι οι απώλειες στο ακροφύσιο μπορεί να εξαρτώνται από την ταχύτητα του ρευστού. Σε αυτή την πειραματική μελέτη, παρατηρήθηκε ότι οι απώλειες στο ακροφύσιο μειώνονταν με την αύξηση της ταχύτητας. Μια πιθανή εξήγηση ήταν ότι οι υψηλότερες ταχύτητες οδήγησαν σε υψηλότερους αριθμούς *Reynolds*, και επομένως σε μικρότερα πάχη του οριακού στρώματος. Αυτό κατέστησε δυνατή την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων στο ακροφύσιο. Ο στρόβιλος δοκιμάστηκε στο εύρος πίεσης από 2 έως 4.5 bar και παρατηρήθηκε ότι αποδίδει βέλτιστα στα 3.8 bar.

Οι Li et al. ⁽⁴⁹⁾ μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων εισόδου στον στρόβιλο μέσω πειραματικών δοκιμών. Ο στρόβιλος δοκιμάστηκε σε έξι τιμές πίεσης στην περιοχή από 0.21 έως 0.26 MPa. Η απόδοση της τουρμπίνας βρέθηκε να μειώνεται με τη μείωση της πίεσης εισόδου. Σε

46 Hoya & Guha(2009).

47 Guha, Smiley (2010).

48 Διασκευή από Zuber, Ramesh & Bansal(2019).

49 Ruixiong Li, Wang, Yao, Meng Li & Nan (2017).

μια συγκεκριμένη πίεση, ο στρόβιλος απέδωσε πιο αποτελεσματικά μόνο σε μια συγκεκριμένη RPM. Μια υψηλότερη RPM αντιστοιχούσε σε υψηλότερη πίεση εισόδου.

Οι Lemma et al.⁽⁵⁰⁾, και οι Deam et al. ⁽⁵¹⁾, με ξεχωριστές μελέτες αντίστοιχα, μέσω θεωρητικών αναλύσεων, διαπίστωσαν ότι η απόδοση της τουρμπίνας έφτασε στη μέγιστη τιμή της όταν η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου ήταν ίση με την ταχύτητα εισόδου του ρευστού .

Οι Romanin, Vince, Vedavalli, Krishnan, Carey και Maharbiz, ⁽⁵²⁾ χρησιμοποίησαν ρυθμό ροής σε μια περιοχή από 1 έως 20 mL/sec για να δοκιμάσουν μια πειραματική διάταξη. Μια υψηλότερη ταχύτητα εισόδου είχε ως αποτέλεσμα μια πιο αποτελεσματική λειτουργία αλλά οι απώλειες στο ακροφύσιο έγιναν πιο σημαντικές. Βρέθηκε επίσης ότι στην περίπτωση μιας στρωτής ροής ακροφυσίου, χαμηλότεροι αριθμοί Reynolds είχαν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες. Ενώ σε μια τυρβώδη ροή ακροφυσίου, η υψηλότερη τραχύτητα της επιφάνειας οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες.

Ο Krishnan ⁽⁵³⁾ δοκίμασε συνθέσεις στροβίλου με δύο διαφορετικούς ρυθμούς ροής εισόδου. Η μία είχε ρυθμό ροής τροφοδοτούμενη από χαμηλή κεφαλή 1 m που παρείχε μέγιστο ρυθμό ροής 3 cm³/s. Αυτή χρησιμοποιήθηκε για τουρμπίνες με όγκους μικρότερους από 4 cm³. Μια άλλη πηγή με κεφαλή 10 m που παρέχει ρυθμό ροής 20 cm³/s χρησιμοποιήθηκε για τουρμπίνες με όγκο έως 17 cm³. Ο Krishnan βρήκε ότι μια αύξηση στον ρυθμό ροής προκάλεσε μείωση της απόδοσης. Η ισχύς εξόδου είχε διαφορετική τάση και αυξήθηκε όσο αυξανόταν ο ρυθμός ροής. Το ποσοστό κέρδους ισχύος ήταν μία ή δύο τάξεις υψηλότερο από την απώλεια απόδοσης. Σύμφωνα με τον Krishnan οι ρότορες δεν περιστρέφονται κάτω από ένα ρυθμό ροής που αντιστοιχεί με αντίθετα αποτελέσματα φυγόκεντρων δυνάμεων και δυνάμεων τριβής. Οι χαμηλότεροι ρυθμοί ροής είχαν ως αποτέλεσμα αυξημένη μεταφορά ορμής.

Οι Krishnan et al. ⁽⁵⁴⁾ δοκιμάζοντας έναν στρόβιλο με δίσκους διαμέτρου 1 cm, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι τουρμπίνες Tesla επιτυγχάνουν υψηλές αποδόσεις με χαμηλά ύψη πίεσης. Μελετήθηκε μια περίπτωση παρόμοια με την διαδικασία ανάβασης χυμού στα δέντρα και τη διαφορά πίεσης που αναπτύχθηκε στα δέντρα λόγω της εξάτμισης. Ο στρόβιλος αναπτύχθηκε για να λειτουργεί σε αυτήν την ροή εξάτμισης, η οποία θεωρήθηκε στρωτή με χαμηλό αριθμό Reynolds. Το ύψος πίεσης εξαρτώταν από το ακροφύσιο. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης σε χαμηλότερους ρυθμούς ροής.

Ο Peshlakai ⁽⁵⁵⁾ σχεδίασε την αλλαγή στην απόδοση του δρομέα σε σχέση με τον ρυθμό ροής μάζας αέρα, νερού και ατμού. Χρησιμοποίησε τον ίδιο στρόβιλο για αυτή την διαδικασία, ο οποίος δεν ήταν βελτιστοποιημένος για κανένα συγκεκριμένο μέσο και χρησιμοποίησε την σχέση (3.2.4) για τον υπολογισμό της απόδοσης του στροβίλου. Κατά τη δοκιμή με αέρα, η απόδοση του ρότορα ήταν χαμηλή για ρυθμούς ροής μικρότερους από 4 g/s. Ένα ξαφνικό άλμα σημειώθηκε στα 4 g/s, όπου η απόδοση του ρότορα αυξήθηκε από 20% σε μια κορυφή τιμής 95% στα 7 g/s. Μετά από αυτό παρατηρήθηκε μια σταθερή πτώση.

Δύο μπρούτζινα ακροφύσια διαφορετικών μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν από τον Peshlakai κατά τη σύγκριση διαφορετικών ρευστών. Αυτά τα ακροφύσια σχεδιάστηκαν για να αφαιρούνται εύκολα από τον στρόβιλο. Κατά τον υπολογισμό της συνολικής απόδοσης του στροβίλου ελήφθη υπόψιν η

50 Lemma, Dream, Toncich & Collins (2008).

51 Deam, Lemma, Mace & Collins (2008).

52 Romanin, Krishnan, Carey & Maharbiz (2013).

53 Krishnan (2015).

54 Krishnan, Iqbal & Maharbiz (2011).

55 Peshlakai (2012).

υπόθεση απώλειας 15% στο ακροφύσιο. Αν και περιορισμένος από το εύρος του εξοπλισμού μέτρησης, ο Peshlakai διαπίστωσε ότι το μεγαλύτερο ακροφύσιο ήταν σε θέση να διατηρήσει την κορυφαία απόδοση του ρότορα σε μεγαλύτερο εύρος ρυθμών ροής από το μικρότερο ακροφύσιο. Η μέγιστη απόδοση του ρότορα διατηρήθηκε σε ένα εύρος 2 g/s στο μεγαλύτερο ακροφύσιο σε σύγκριση με ένα εύρος 1 g/s στο μικρότερο ακροφύσιο.

Οι Tan et al. (⁵⁶) προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν τον στρόβιλο ώστε να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε σπίτια στη Μαλαισία από εναέριες δεξαμενές με ελάχιστη απώλεια ύψους (head loss). Οι μεγάλες κεφαλές και οι χαμηλοί ρυθμοί τροφοδοσίας που ήταν διαθέσιμοι κρίθηκαν επιθυμητοί και επωφελείς για αυτήν την προσπάθεια. Η μελέτη ήταν ένας θεωρητικός υπολογισμός του αριθμού των δίσκων, του διάκενου του δίσκου και του μεγέθους του δίσκου όπου βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό στις προηγούμενες εργασίες του Rice. Το νερό ήταν το λειτουργικό μέσο εργασίας σε αυτόν τον σχεδιασμό, παρόμοιο με τη μελέτη του Rice (⁵⁷). Η μελέτη επαλήθευσε το συμπέρασμα του Rice ότι οι χαμηλότεροι ρυθμοί ροής παρήγαγαν υψηλότερη απόδοση. Η μέγιστη απόδοση που επιτεύχθηκε από τους Tan, Foo, Sharil (⁵⁶) ήταν 6,8%, η οποία αποδόθηκε στη στρωτή ροή που επιτεύχθηκε σε χαμηλούς ρυθμούς ροής. Σε αυτές τις δοκιμές, μελετήθηκε η διακύμανση των ρυθμών ροής εισόδου σε σπίτια που βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από τη δεξαμενή. Επιλέχθηκε ο χαμηλότερος ρυθμός ροής. Οι Tan, Foo, Aik (⁵⁸) πραγματοποίησαν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας υπολογιστική ρευστοδυναμική για να βελτιστοποιήσουν τον στρόβιλο που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στην προηγούμενη εργασία τους (⁵⁶). Με τη βελτιστοποίηση της πίεσης εισόδου μέσω επαναληπτικών σχεδίων, η απόδοση του στρόβιλου αυξήθηκε στο 10,7%.

Τέλος, έχουν ειπωθεί αντικρουόμενα δεδομένα όσον αφορά τη σχέση του ρυθμού ροής με το είδος του ρευστού εργασίας. Υποστηρίζεται ότι όταν το νερό χρησιμοποιείται ως ρευστό εργασίας, η μείωση του ρυθμού ροής εισόδου προκαλεί αύξηση της απόδοσης. Το αντίθετο έχει καταγραφεί για τον αέρα. Αυτό υπογραμμίζει την αποτελεσματικότητα του στρόβιλου για τη παραγωγή ενέργειας σε μικρά ρέματα.⁽⁵⁹⁾

3.2.5 Οι απώλειες στην τουρμπίνας

Οι Hoya και Guha (⁶⁰) χρησιμοποίησαν δύο παραμέτρους για να εκτιμήσουν τις απώλειες στο ακροφύσιο. Η πρώτη παράμετρος, που περιγράφεται από την σχέση (3.2.6), βασίστηκε στη χρήση των πιέσεων εισόδου και εξόδου του ακροφυσίου για την ανάλυση της απώλειας στην διαστολή (expansion). Οι κύριες απώλειες σχετίζονται στενά με την απώλεια της συνολικής πίεσης στο ακροφύσιο.

$$\pi_N = \frac{P_{02}}{P_{01}} < 1 \quad (3.2.6)$$

Η δεύτερη παράμετρος ήταν ο συντελεστής απώλειας (3.2.7), ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας που υποβαθμίζεται από την τριβή. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τους Hoya και Guha υποδεικνύουν σημαντική απώλεια ολικής πίεσης στο ακροφύσιο. Για παράδειγμα, η τιμή του

56 Tan, Foo & Sharil (2010).

57 Rice (1991).

58 Tan Wee Choon, Rahman, Foo Shy Jer & Lim Eng Aik (2011).

59 Διασκευή από Zuber, Ramesh & Bansal (2019).

60 Hoya & Guha (2009).

συντελεστή απώλειας που λήφθηκε ήταν περίπου 0.4, ενώ η τυπική τιμή του για τα ακροφύσια αεριοστροβίλων είναι κοντά στο 0.05 .

$$Y_N = \frac{\left(\frac{P_{01}}{P_{02}}\right) - 1}{1 - \left(\frac{P_2}{P_{02}}\right)} \quad (3.2.7)$$

όπου p_{02} είναι η πίεση στην έξοδο του ακροφυσίου/είσοδος του ρότορα και p_{01} είναι η πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου.

Οι Li et al. ⁽⁶¹⁾ ανέλυσαν εκτενώς τις απώλειες του στροβίλου και τις ταξινόμησαν ως απώλειες κατά την είσοδο, την έξοδο και στα ρουλεμάν. Η απώλεια στα ρουλεμάν είναι αυτονόητη και γι' αυτό πρέπει να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο στα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής. Στην είσοδο, συμβαίνει απώλεια κραδασμών λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του υγρού και των άκρων του δίσκου. Επίσης, σε αυτό συμβάλλει η τοπική διαστολή που προκαλείται λόγω εισόδου ρευστού στην κοιλότητα του στροβίλου. Στην έξοδο, η μεγάλη απώλεια συμβαίνει λόγω της ξαφνικής αλλαγής της κατάστασης ροής, από ακτινική σε κατεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα. Επιπλέον, δημιουργείται απώλεια κραδασμών λόγω του υγρού που προσκρούει στην άκρη του δίσκου κατά μήκος της εξόδου. Οι απώλειες εισόδου και εξόδου υπολογίστηκαν με βάση την αρχή της διατήρησης της ενέργειας.

Οι Krishnan et al. ⁽⁶²⁾ μελέτησαν την επίδραση της κλιμάκωσης των χαρακτηριστικών της τουρμπίνας και τις σχετικές απώλειες. Το πειραματικό και θεωρητικό μοντέλο που εξετάστηκε ήταν το ίδιο με αυτό που είχαν κάνει στο παρελθόν. Το έγγραφο τους σημείωσε τις ακόλουθες παρατηρήσεις. Η απώλεια ύψους, που ονομάζεται επίσης απώλεια ακροφυσίων, μπορεί να μειωθεί με τραχιά ακροφύσια για χαμηλούς αριθμούς *Reynolds* και ομαλά για υψηλότερους αριθμούς *Reynolds*. Η απώλεια ισχύος του άξονα που περιλαμβάνει απώλεια διακένου και τριβή στο άκρο, μπορεί να μειωθεί με καλύτερη σφράγιση και με μείωση του πάχους του δίσκου αντίστοιχα. Οι λεπτοί δίσκοι μειώνουν επίσης την απώλεια πρόσκρουσης. Οι ρότορες χωρίς άξονα έχουν βελτιστοποιημένες εξατμίσεις και υψηλή μεταφορά ισχύος. Ακόμη διαπιστώθηκε ότι οι πειραματικά προερχόμενες τιμές των απωλειών εισόδου και εξόδου ήταν περίπου οι ίδιες με τις θεωρητικά υπολογισμένες τιμές, επικυρώνοντας έτσι τους τύπους που χρησιμοποιήθηκαν. Η απώλεια εξόδου ήταν πολύ μεγαλύτερη από την απώλεια εισόδου και ως εκ τούτου είχε σημαντική επίδραση στην απόδοση του στροβίλου. Αυτό όμως ισχύει μόνο όταν το μέσο εργασίας είναι ασυμπίεστο, καθώς είχε χρησιμοποιηθεί νερό. Η απώλεια εισόδου γίνεται πιο σημαντική για την απόδοση του στροβίλου όταν χρησιμοποιείται ένα συμπίεστο μέσο εργασίας σύμφωνα με τους Hoya και Guha ⁽⁶³⁾.

Συνολικά, έχουν εντοπιστεί δύο μεγάλα είδη απωλειών, το πρώτο είναι στην είσοδο, που σχετίζεται με τη διαστολή στο ακροφύσιο και το δεύτερο είναι στην έξοδο που συμβαίνει λόγω της ξαφνικής αλλαγής στην κατεύθυνση ροής. Το πρώτο βρέθηκε να κυριαρχεί όταν χρησιμοποιείται ένα συμπίεστο υγρό εργασίας. Το δεύτερο γίνεται πιο σημαντικό στην περίπτωση ενός ασυμπίεστου ρευστού. Και οι δύο αυτές απώλειες έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στην απόδοση του στροβίλου και επομένως είναι σημαντικές παράμετροι που πρέπει να δουλετούν για τη βελτίωση της απόδοσης.⁽⁶⁴⁾

61 Ruixiong Li, Wang, Yao, Meng Li & Nan (2017).

62 Krishnan, Romanin, Carey & Maharbiz (2013).

63 Hoya & Guha (2009).

64 Διασκευή από Zuber, Ramesh & Bansal(2019).

3.3 Διάκενο μεταξύ δίσκων

3.3.1 Υπολογισμός του διάκενου μεταξύ δίσκων

Ο σχεδιασμός του στροβίλου Tesla χαρακτηρίζεται από μια ροή ρευστού μεταξύ δύο παράλληλων δίσκων στους οποίους το διάκενο είναι αρκετά μικρό για να περιορίσει τη ροή σε συνθήκες οριακού στρώματος. Εάν ο ρυθμός ροής είναι περιορισμένος, το αποτέλεσμα είναι η στρωτή ροή. Η μεταφορά ενέργειας πραγματοποιείται από τις διατμητικές δυνάμεις μεταξύ του ρευστού και ρότορα.

Το διάκενο δίσκου είναι μια κρίσιμη παράμετρος στο σχέδιο. Η ανάλυση των Brieter και Pohlhausen ⁽⁶⁵⁾ δείχνει ότι το βέλτιστο μέγεθος διακένου για τη διατήρηση του οριακού στρώματος υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Κενό δίσκων: } b = \pi * \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \quad (3.3.1)$$

$$\text{Polhausen Parameter: } Ph = \frac{b}{\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}} \quad (3.3.2)$$

όπου b είναι το διάκενο των δίσκων (m), ω η γωνιακή ταχύτητα ρότορα ($rad.s^{-1}$) και ν το κινηματικό ιξώδες ($m^2.s^{-1}$).

Η παράμετρος *Polhausen* επηρεάζει σημαντικά την απόδοση καθώς καθορίζει σε ποιο βαθμό το ρευστό ακολουθεί την περιστροφή του δίσκου, αλλά και ελέγχει το σχήμα της κατανομής ταχύτητας δίσκου σε δίσκο. Πολύ μικρές τιμές *Ph* πλησιάζουν την περίπτωση της περιστροφής του στερεού σώματος, ενώ οι πολύ μεγάλες τιμές αντιστοιχούν σχεδόν στο αποσυνδεδεμένο οριακό στρώμα στους δύο δίσκους και έναν μη περιστρεφόμενο πυρήνα στο ενδιάμεσο. Για αυτό το λόγο, σε αντλίες τριβής, η παράμετρος *Polhausen* διατηρείται συνήθως σε στενό όριο, $Ph \leq 2.5 - 3.5$ ⁽⁶⁶⁾.

3.3.2 Μελέτες και πειράματα για το διάκενο των δίσκων

Ο Krishnan ⁽⁶⁷⁾ δοκίμασε συνολικά 3 τιμές διάκενου μεταξύ δίσκων, $125 \mu m$, $250 \mu m$ και $500 \mu m$, με ποικίλο αριθμό δίσκων και εξόδους μεταξύ ενός συνολικού συνόλου 6 στοιβών ρότορα. Το συνολικό μέγεθος του στροβίλου διατηρήθηκε σταθερό. Η αύξηση του διάκενου οδήγησε σε μεγαλύτερη παραγωγή *RPM* λόγω της χαμηλότερης μάζας των στοιβών με μικρότερους δίσκους. Και όπως περιγράφεται από τους Romanin et al. ⁽⁶⁸⁾, η μείωση του χώρου μεταξύ των δίσκων αυξάνει την απόδοση. Αυτό το συμπέρασμα υποστηρίχθηκε με δεδομένα από προσομοιώσεις υπολογιστή στο ANSYS, πειραματικά δεδομένα και αναλυτικούς υπολογισμούς. Η αύξηση της αποτελεσματικότητας συνδέθηκε με την αύξηση του αριθμού του *Reynold*. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη μεταφορά ορμής από το ρευστό στους δίσκους λόγω των αυξημένων δυνάμεων ιξώδους. Σύμφωνα με τον Rice ⁽⁶⁹⁾, το ιδανικό κενό μεταξύ του δίσκου θα πρέπει να είναι διπλάσιο από το οριακό στρώμα, για την πιο αποτελεσματική ορμή και μεταφορά.

65 Brieter & Pohlhausen (1962).

66 Tan, Foo & Sharil (2010).

67 Krishnan (2015).

68 Romanin, Krishnan, Carey & Maharbiz (2013).

69 Rice (1991).

Ο Peshlakai ⁽⁷⁰⁾ δοκίμασε τρία διαφορετικά λειτουργικά μέσα εργασίας αέρα, νερό και ατμό, στον ίδιο σχεδιασμό τουρμπίνας για να συγκρίνει την απόδοση των διαφορετικών ρευστών. Επιλέχθηκε διάκενο δίσκου 1.3 mm για τον στρόβιλο. Οι μέγιστες αποδόσεις του ρότορα που αναφέρθηκαν για τον αέρα και το νερό ήταν 95% και 0.49% αντίστοιχα. Η απόδοση του ατμού δεν υπολογίστηκε λόγω χαμηλής ισχύος εξόδου. Ο Peshlakai απέδωσε αυτή την τεράστια διαφορά στη σχέση μεταξύ του διάκενου του δίσκου και του πάχους του οριακού στρώματος, . Για επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση στο νερό, το διάκενο μεταξύ των δίσκων πρέπει να αυξηθεί για να χωρέσουν τα μεγαλύτερα οριακά στρώματα.

Οι Borate et al. ⁽⁷¹⁾ μελέτησαν την επίδραση της απόστασης μεταβάλλοντας το διάκενο από 0.5 mm σε 2.5 mm σε βήματα των 0.5 mm και χρησιμοποίησαν νερό ως ρευστό εργασίας. Παρατήρησαν ότι σε στοίβες με μεγαλύτερα διάκενα, το οριακό στρώμα νερού (water boundary layer) και το οριακό στρώμα φλέβας (jet boundary layer) διαχωρίστηκαν. Αυτό οδήγησε σε μικρότερη μεταφορά ενέργειας από το νερό στους δίσκους. Για την περίπτωση με τη μικρότερη απόσταση, τα δύο οριακά στρώματα αλληλεπικαλύπτονταν και είχαν ως αποτέλεσμα την πιο αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας. Η ταχύτητα του στρόβιλου βρέθηκε να μειώνεται με την αύξηση της απόστασης.

Οι Hoya και Guha ⁽⁷²⁾ ανέλυσαν επίσης την επίδραση της μεταβολής της απόστασης μεταξύ των δίσκων στην απόδοση του στρόβιλου. Οι Hoya και Guha χρησιμοποίησαν τον αέρα ως μέσο εργασίας και διαπίστωσαν ότι η στην κορυφαία απόδοση επιτεύχθηκε σε απόσταση δίσκων 0.6 mm . Για αποστάσεις δίσκων μικρότερες από 0.4 mm ή μεγαλύτερες από 1 mm , η απόδοση μειώθηκε γρήγορα. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της απόκλισης από το "ιδανικό" κενό δίσκου όπως εξηγήθηκε και από τον Rice ⁽⁷³⁾ .

Οι Couto et al. ⁽⁷⁴⁾ πρότειναν μια αριθμητική προσέγγιση για τον υπολογισμό του αριθμού των δίσκων που απαιτούνται για την επιθυμητή απόδοση, υπολογίζοντας τις στρωτές ή τυρβώδεις ροές. Δήλωσαν ότι για την πιο αποτελεσματική μεταφορά ορμής, η ροή πρέπει να είναι στρωτή και το διάκενο του δίσκου διπλάσιο από το οριακό στρώμα. Η μελέτη τους αποτελείται από τον υπολογισμό του πάχους του οριακού στρώματος για στρωτές και τυρβώδεις ροές. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε ο αριθμός των χασμάτων μεταξύ των δίσκων για μια δεδομένη ροή μάζας, ο συντελεστής ροπής και η ροπή που παράγεται από n αριθμό δίσκων.

Επομένως, από τις παραπάνω μελέτες, μπορεί να συναχθεί ότι υπάρχει ένα ιδανικό διάκενο δίσκου, το οποίο είναι περίπου διπλάσιο από το πάχος του οριακού στρώματος. Ένα μεγαλύτερο διάκενο μεταξύ των δίσκων υποδηλώνει ότι υπάρχει αύξηση στον όγκο του υγρού που δεν κάνει καμία εργασία και ως εκ τούτου μειώνει την απόδοση. Τα μικρότερα κενά οδηγούν σε εξαιρετικά τυρβώδεις αλληλεπιδράσεις των παχύρρευστων οριακών στρωμάτων που μειώνουν επίσης την απόδοση.⁽⁷⁵⁾

70 Peshlakai (2012).

71 Borate & Misal (2013).

72 Hoya & Guha (2009).

73 Rice (1991).

74 Couto, Duarte & Bastos -Netto(2006).

75 Διασκευή από Zuber, Ramesh & Bansal (2019).

3.4 Ο αριθμός των δίσκων

Ο ρυθμός ροής για ένα διάκενο μεταξύ δίσκων μπορεί να υπολογιστεί μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$q = \text{cross section} \times v \quad (3.4.1)$$

όπου v το κινηματικό ιξώδες ($m^2 \cdot s^{-1}$)

Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν πόσοι δίσκοι απαιτούνται για μια δεδομένη ροή της τουρμπίνας. Οι Hasinger και Kehrt, το 1963 παρείχαν μια παράμετρο χωρίς διάσταση που έχει βασικά δεδομένα μηχανής.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις (3.3.1) και (3.3.2), ο αριθμός των δίσκων μπορούν να εκτιμηθούν:

$$A = \frac{g \cdot b}{v \cdot r_i^2} \quad (3.4.2)$$

όπου g είναι επιτάχυνση λόγω βαρύτητας ($m \cdot s^{-2}$), b το διάκενο των δίσκων (m), v το κινηματικό ιξώδες ($m^2 \cdot s^{-1}$) και r_i η εσωτερική ακτίνα (m).

Κανονικά ο αριθμός εύρους δίσκων είναι $A \leq 10 - 20$ και δεδομένου αυτού, ισχύει $r_Q \geq 2.5r_i$, όπου r_Q η εξωτερική ακτίνα (m) και r_i η εσωτερική ακτίνα (m).

Μία μεγαλύτερη διάμετρος παρέχει αυξημένη ροπή άξονα και περιορίζεται από φυγοκεντρική τάση, ενώ μία μικρότερη διάμετρος παρέχει αυξημένη ταχύτητα άξονα και περιορίζεται από τριβή. Ύστερα από κάποιο αλγεβρικό υπολογισμό, σχηματίζεται η ακόλουθη εξίσωση για το ρυθμό ροής:

$$q = \frac{(0.16) \cdot A \cdot v \cdot r_Q^2}{b} \quad (3.4.3)$$

όπου A ο αριθμός των δίσκων, v το κινηματικό ιξώδες ($m^2 \cdot s^{-1}$), r_Q η εξωτερική ακτίνα (m) και b το διάκενο των δίσκων (m).

Οι διάφορες αναλύσεις δείχνουν ότι ο ρυθμός ροής μεταξύ των δίσκων πρέπει να διατηρείται σχετικά χαμηλός για καλή απόδοση. Έτσι αυτό λέει ότι πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός δίσκων ανάλογα με το ρυθμό ροής. Έτσι,

$$n = \frac{Q}{q} \quad (3.4.4)$$

όπου Q ο ρυθμός ροής μάζας ($kg \cdot s^{-1}$) και q ο ρυθμός ροής όγκου ($m^3 \cdot s^{-1}$)⁽⁷⁶⁾.

3.5 Πάχος δίσκου

Ο αρχικός σχεδιασμός του Tesla είχε δίσκους με κωνικές άκρες καθώς ο Tesla πίστευε ότι αυτό θα αύξανε την απόδοση μειώνοντας τις απώλειες στα άκρα⁽⁷⁷⁾. Απώλειες συμβαίνουν στα άκρα λόγω του υγρού που προσπαθεί να μετατοπιστεί από τη μια πλευρά του δίσκου στην άλλη, παρόμοια με τη συμπεριφορά της ροής γύρω από τα άκρα φτερών ενός αεροπλάνου. Ο Tesla υλοποίησε αυτή

76 Tan, Foo & Sharil (2010).

77 Lampart & Jędrzejewski (2011).

την ιδέα χρησιμοποιώντας πολύ λεπτούς δίσκους αλλά αυτοί στρεβλώθηκαν κάτω από τις τάσεις που δημιουργούνταν στις υψηλές στροφές ανά λεπτό. Με περιορισμένη γνώση των υλικών και των τεχνικών κατασκευής, ο Tesla δεν ήταν σε θέση να δοκιμάσει δίσκους που να ήταν αρκετά ισχυροί για να αντέχουν τις υψηλές πιέσεις.

Οι Ruixiong Li et al.⁽⁷⁸⁾ επέλεξαν έναν εξαιρετικά μικρό πάχος δίσκου 0.5 mm για μια πειραματική μελέτη. Υποστήριζαν ότι συμβαίνει απώλεια κραδασμών όταν το λειτουργικό ρευστό προσκρούει στην άκρη του δίσκου. Ως εκ τούτου, προσπάθησαν να μειώσουν αυτή την απώλεια ελαχιστοποιώντας το πάχος των δίσκων. Επιλέγοντας το καθορισμένο μικρό πάχος δίσκου, οι απώλειες κραδασμών θα μπορούσαν να παραβλεφθούν με ασφάλεια.

Γενικά, υπάρχουν μόνο λίγες μελέτες που συζητούν την επίδραση του πάχους του δίσκου. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την αντιμετώπιση του κατάλληλου πάχους δίσκου για διάφορες εφαρμογές του στροβίλου Tesla.⁽⁷⁹⁾

3.6 Διερεύνηση του RPM

Ο Krishnan⁽⁸⁰⁾, από ένα υπολογιστικό μοντέλο, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι υψηλότερες RPM είχαν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες φυγόκεντρες δυνάμεις και μεγαλύτερες διαδρομές ροής. Η μέγιστη απόδοση που επιτεύχθηκε ήταν $36,6\%$, αλλά ο Krishnan δηλώνει ότι ο στρόβιλος έχει τη δυνατότητα να φτάσει και σε απόδοση 40% .

Οι Lampart και Jędrzejewski⁽⁸¹⁾ ανέλυσαν το απλό μοντέλο στις 9000 και 18000 RPM . Σύμφωνα με τη μελέτη του, η ταχύτητα του ρότορα επηρέασε το σχήμα των γραμμών ροής και τον χρόνο που αφιερώνει το ρευστό στον στρόβιλο. Μια μακρύτερη διαδρομή είναι επιθυμητή, καθώς αυξάνει τη μεταφορά ορμής, και ως εκ τούτου, την απόδοση του στροβίλου. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι διαδρομές ήταν κατά 50% μεγαλύτερες όταν οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στις 18000 RPM . Όπως αναμενόταν, η απόδοση ήταν υψηλότερη για τις υψηλότερες RPM. Οι Lampart et al.⁽⁸²⁾ από αριθμητικές προσομοιώσεις κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο στρόβιλος χωρίς λεπίδες δεν μπορεί να ταιριάζει με τις στροφές ανά λεπτό των συμβατικών στροβίλων.

Τα περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν μια παραβολική σχέση μεταξύ της απόδοσης του στροβίλου και του RPM του ρότορα, με την απόδοση να φτάνει σε μια μέγιστη τιμή σε μια συγκεκριμένη RPM. Διάφοροι συγγραφείς μελέτησαν την σχέση της ροπής και του RPM του ρότορα και βρήκαν ότι η ροπή μειώνεται σε μια μη γραμμική τάση με μια αύξηση στις RPM.⁽⁸³⁾⁽⁸⁴⁾⁽⁸⁵⁾⁽⁸⁶⁾⁽⁸⁷⁾. Σημειώθηκε επίσης ότι η ροπή πλησιάζει μια τιμή σταθερής κατάστασης καθώς η ταχύτητα του δίσκου πλησιάζει την ταχύτητα ροής του ρευστού⁽⁸⁵⁾.

Οι Hoya & Guha⁽⁸⁴⁾ και οι Ruixiong Li et al.⁽⁸⁶⁾ βρήκαν επίσης ότι υπάρχει μια βέλτιστη τιμή RPM για τη λειτουργία του στροβίλου σε μια συγκεκριμένη πίεση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απόδοση πρώτα αυξάνεται με την αύξηση του RPM και μετά μειώνεται.

Οι Ruixiong Li et al. που μελέτησαν πειραματικά διάφορες απώλειες τουρμπίνας, παρατήρησαν ότι οι απώλειες εισόδου και εξόδου έδειξαν μόνο μια μικρή αλλαγή με μεταβαλλόμενο RPM. Η

78 Ruixiong Li, Wang, Yao, Meng Li & Nan (2017).

79 Διασκευή από Zuber, Ramesh & Bansal(2019).

80 Krishnan (2015).

81 Lampart & Jędrzejewski (2011).

82 Lampart, Jędrzejewski, Kosowski & Piwowarski (2009).

83 Peirs, Reynaerts & Verplaetsen (2004).

84 Hoya & Guha (2009).

85 Holland (2016).

86 Ruixiong Li, Wang, Yao, Meng Li & Nan (2017).

87 Bloudvček & Paloušek (2007).

απώλεια εξόδου έφτασε την ελάχιστη τιμή της στη βέλτιστη ταχύτητα του ρότορα. Ο στρόβιλος δοκιμάστηκε μέχρι το μέγιστο των 25000 RPM.⁽⁷⁹⁾

3.7 Αριθμός Reynolds

Κατά τη διάρκεια των ετών έρευνας σχετικά με τον στρόβιλο Tesla, οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν διαφορετικές μορφές του αριθμού Reynolds. Στο προηγούμενο κεφάλαιο μιλήσαμε για τον αριθμό Reynolds όπου καθορίζει τον τύπο της ροής ενός ρευστού που κινείται μέσα σε έναν αγωγό ή γύρω από ένα στερεό όριο. Μια παρόμοια εξίσωση του αριθμού Reynolds που είναι σχετικά απλή, απαιτεί μόνο τέσσερις μεταβλητές και αφορά την ακτινική απόσταση από το κέντρο του δίσκου είναι:

$$Re_r = \frac{\rho_r * V_{flow,r} * L_r}{\mu} \quad (3.7.1)$$

όπου ρ_r είναι η πυκνότητα του ρευστού, $V_{flow,r}$ είναι η ταχύτητα ροής, L_r είναι το μήκος όπου ταξιδεύει η ροή και το μ είναι το δυναμικό ιξώδες. Ο δείκτης r υποδηλώνει την εξάρτηση από την ακτινική απόσταση από το κέντρο του δίσκου.

Η γεωμετρία και η συμπεριφορά ροής του στροβίλου Tesla καθιστούν τον υπολογισμό αυτής της σχετικά απλής παραμέτρου, Re_r , περίπλοκη.

Η πυκνότητα και η ταχύτητα ροής ποικίλλουν ανάλογα με την ακτίνα του δίσκου με το μήκος όπου ταξιδεύει το ρευστό να μην μετριέται εύκολα.

Για αυτήν την ανάλυση, η πίεση θεωρείται ότι μεταβάλλεται γραμμικά από το εξωτερικό άκρο των δίσκων έως την εξάτμιση του ρότορα. Η διαδρομή της ροής θεωρείται ότι ακολουθεί μια σπειροειδή κίνηση από την εξωτερική άκρη των δίσκων προς την εξάτμιση του ρότορα. Οι συνθήκες ολίσθησης αναγκάζουν την εφαπτομενική ταχύτητα του ρευστού να είναι ίδια με την εφαπτομενική ταχύτητα των δίσκων στην επιφάνεια του δίσκου. Ο επιστήμονας Guha A. δήλωσε ότι για τη στρωτή ροή, το εφαπτομενικό στοιχείο της ταχύτητας του ρευστού ποικίλλει ανάλογα με την απόσταση από την επιφάνεια του δίσκου και μπορεί να προσδιοριστεί δεδομένης της ταχύτητας του δίσκου χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{tan} = V_{tan, disk surface} * 6 * \frac{z}{b} * (1 - \frac{z}{b}) \quad (3.7.2)$$

όπου z είναι η απόσταση από την επιφάνεια του δίσκου και b είναι το πάχος του διάκενου μεταξύ των γειτονικών δίσκων. Για αυτούς τους υπολογισμούς το V_{tan} υπολογίζεται στο μισό διάκενο πάχους. Η εφαπτομενική ταχύτητα των δίσκων υπολογίζεται εύκολα για οποιαδήποτε ακτινική απόσταση από το κέντρο του δίσκου με:

$$V_{tan, disk surface} = 2 * \pi * f * r \quad (3.7.3)$$

όπου r είναι η ακτίνα του δίσκου και f είναι η συχνότητα περιστροφής του δίσκου, που βρίσκεται μετρώντας τη συχνότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

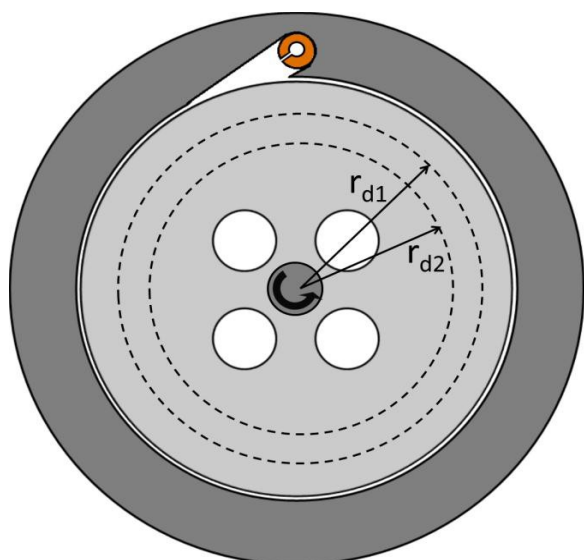
Η ακτινική συνιστώσα της ροής του ρευστού σχετίζεται με τον ρυθμό ροής μάζας. Διαιρώντας τον ρυθμό ροής μάζας (g/s) με την πυκνότητα (kg/m^3) και την περιφερειακή περιοχή μεταξύ των διάκενων (m^2), η ακτινική ταχύτητα, V_{rad} , μπορεί να βρεθεί σε οποιαδήποτε ακτίνα από το κέντρο:

$$V_{rad} = \frac{\dot{m}}{\rho_r * A_r * 11} \quad (3.7.4)$$

$$A_r = 2 * \pi * r * b \quad (3.7.5)$$

Τέλος, οι εφαπτομενικές και ακτινικές συνιστώσες μπορούν να προστεθούν μαζί με την προσθήκη φορέα για να βρεθεί η ταχύτητα ροής:

$$V_{flow} = \sqrt{V_{tan}^2 + V_{rad}^2} \quad (3.7.6)$$



Σχήμα 18: Σχήμα διακριτών ζωνών δίσκου (88)

Για την απλοποίηση των υπολογισμών, ο δίσκος μπορεί να διακριθεί σε ζώνες διαφόρων ακτίνων, r_{d1} και r_{d2} . Μέσα σε αυτές τις ζώνες οι συνθήκες ροής θεωρούνται σταθερές. Ο χρόνος που χρειάζεται το ρευστό για να διασχίσει αυτή τη ζώνη μπορεί τώρα να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$V_{rad} = \frac{dr}{dt} = \frac{\dot{m}}{\rho_r * A_r * 11} \quad (3.7.7)$$

Κάνοντας αναδιάταξη του παραγώγου και ενσωματώνοντάς το από $0 \rightarrow t$ και $r_{d2} \rightarrow r_{d1}$ έχουμε:

$$t = \frac{\rho_r * \pi * b * 11}{\dot{m}} * (r_{d1}^2 - r_{d2}^2) \quad (3.7.8)$$

Το μήκος που κινείται το ρευστό εντός αυτής της διακριτικής περιοχής μπορεί τώρα να υπολογιστεί με:

$$L_d = t * V_{flow} \quad (3.7.9)$$

Κάθε διακριτό μήκος, L_d , θα μπορούσε στη συνέχεια να προστεθεί σε όλα τα προηγούμενα μήκη για να βρεθεί το συνολικό μήκος που είχε διανύσει η ροή: (88)

$$L = \sum L_d \quad (3.7.10)$$

88 Διασκευή από Peshlakai (2012)

3.8 Οπτικοποίηση ρευματογραμμής ρευστού

3.8.1 Οι ρευματογραμμές του μαζικού ρευστού

Θα περιγράψουμε με αναλυτικό τρόπο την κίνηση ροής του μαζικού ρευστού. Η ακτινική ταχύτητα είναι :

$$\frac{dR}{dt} = V(R) = \frac{-V_1}{R} \quad (3.8.1)$$

όπου V_1 είναι η ταχύτητα εισόδου και R η ακτίνα ρότορα.

Η εφαπτομενική απόλυτη ταχύτητα είναι:

$$\frac{d(R*\varphi)}{dt} = U(R) = R*\frac{d\varphi}{dt} + \varphi*\frac{dR}{dt} \quad (3.8.2)$$

όπου φ είναι η εφαπτομενική - κυλινδρική συντεταγμένη και U η εφαπτομενική, απόλυτη ταχύτητα.

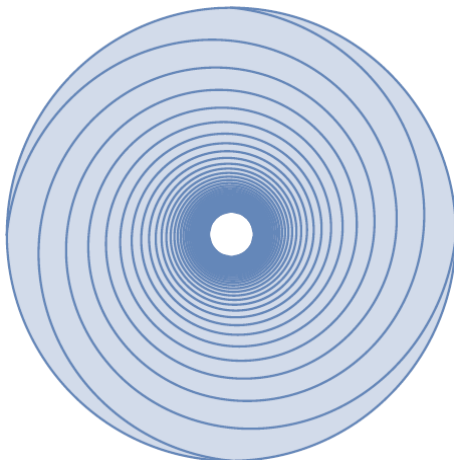
Εισάγοντας τις παραπάνω εξισώσεις (3.8.1), (3.8.2) οδηγούμαστε σε μια αναλυτική συνάρτηση κίνησης ρευματογραμμής του ρευστού, που μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά για την οριακή συνθήκη $\varphi(1) = 0$.

$$\frac{d\varphi}{dR} = \frac{U(R) - V(R)*\varphi}{-V(R)*R} = \frac{-U(R)}{V_1} - \frac{\varphi}{R} \quad (3.8.3)$$

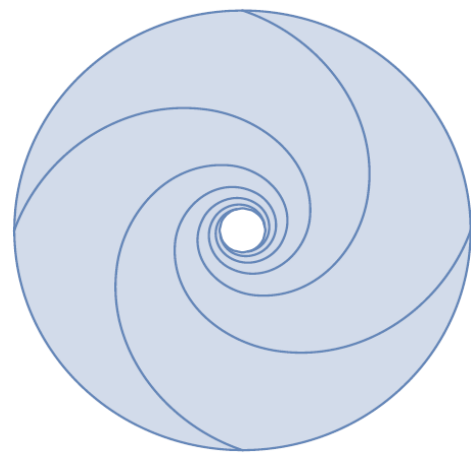
Η συνάρτηση ρευματογραμμής του ρευστού, είναι η αναλυτική λύση της προηγούμενης διαφορικής εξίσωσης πρώτης τάξης (3.8.3). Συγκεκριμένα η λύση είναι:

$$\varphi(R) = \frac{\Omega*(R-1)*(3+\beta+\beta R+\beta R^2)}{3\beta R V_1} - \frac{e^{-\beta*\sqrt{\pi}}*(\beta\Omega+\Omega-\beta)*(Erfi(\sqrt{\beta})-Erfi(\sqrt{\beta}R))}{2\beta^{3/2} R V_1} \quad (3.8.4)$$

Οι κινήσεις των ρευμάτων ρευστού ενός στροβίλου Tesla διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα. Επιλέγοντας ορισμένες τιμές των παραμέτρων όπως Ω (συντελεστής γωνιακής ταχύτητας), β (συντελεστής τριβής), V_1 (ταχύτητα εισόδου) και R (ακτίνα ρότορα) οδηγεί σε διάφορα πεδία ροής. Αυτό προσφέρει μια μεγάλη ευκαιρία να διερευνηθούν οι ροές του ρότορα. ⁽⁸⁹⁾



Εικόνα 19: Κινήσεις ρευμάτων για $\Omega = 0.4, V_1 = 0.1, \beta = 1$ ⁽⁸⁹⁾

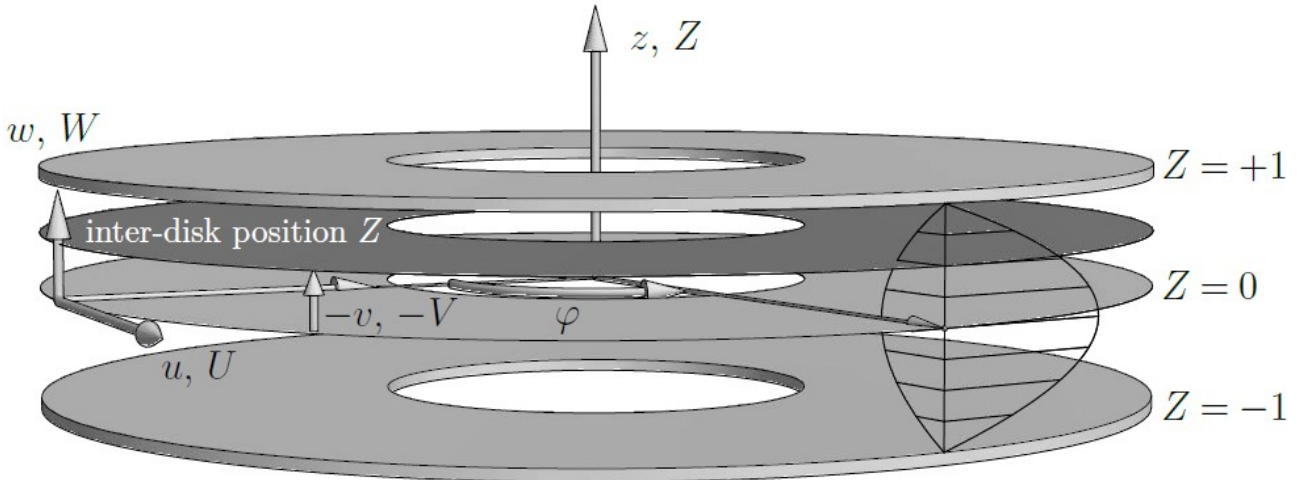


Εικόνα 20: Κινήσεις ρευμάτων για $\Omega = 0.8, V_1 = 0.3, \beta = 100$ ⁽⁸⁹⁾

89 Από Schosser (2016)

3.8.2 Γραμμές ροής μεταξύ δίσκων

Μπορούν να ληφθούν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το πεδίο ροής, εάν οι ρευματογραμμές είναι προσβάσιμες σε διαφορετικά αξονικά επίπεδα του διάκενου, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (**Εικ.21**).



Εικόνα 21: Θέση επιπέδου ρευματογραμμής ρότορα ⁽⁹⁰⁾

Μια καθαρά παραβολική κατανομή ταχύτητας κατά μήκος του διάκενου θεωρείται ότι είναι για στρωτή ροή. Η εφαπτομενική, απόλυτη ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ακτίνας R και της αξονικής μέσης θέσης του δίσκου Z . Δίνεται από τον τύπο:

$$U(R, Z) = \frac{3}{2} * U(R) * (1 - Z^2) \quad (3.8.5)$$

Εισάγοντας την εξίσωση (3.8.3) σε (3.8.5) οδηγούμαστε στην αναλυτική εξίσωση ρευματογραμμής για μια μεταβλητή θέση μεταξύ δίσκων. Το κεντρικό επίπεδο είναι προσβάσιμο για $Z = 0$, η αδιάστατη θέση τοιχώματος είναι στο $Z = \pm 1$.

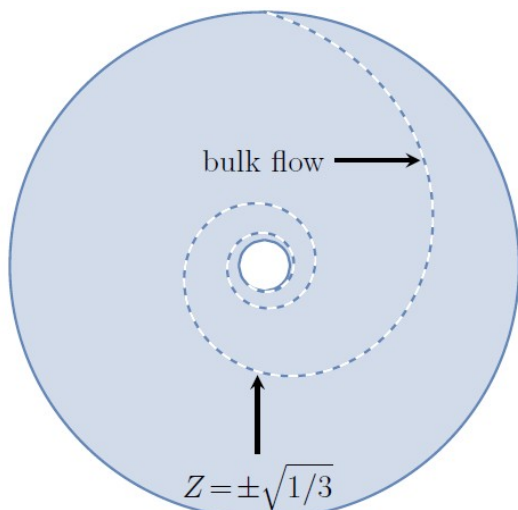
$$\frac{d\Phi}{dR} = \frac{-3 * U(R) * (1 - Z^2)}{2 * V_1} - \frac{\Phi}{R} \quad (3.8.6)$$

Η εξίσωση (3.8.6) επιλύεται για $\Phi'(1) = 0$. Η αναλυτική συνάρτηση ρευματογραμμής για τον ενδιάμεσο δίσκο είναι:

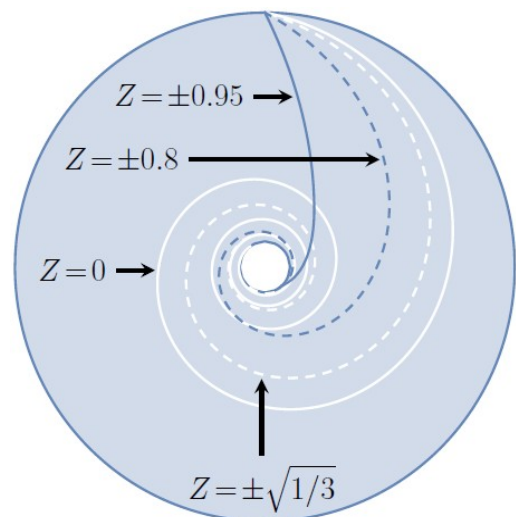
$$\begin{aligned} \varphi(R, Z) = & \frac{\Omega * (R - 1) * (3 + \beta + \beta R + \beta R^2) * (Z^2 - 1)}{2 \beta R V_1} + \\ & + \frac{3 * e^{-\beta} * \sqrt{\pi} * (\beta \Omega + \Omega - \beta) * (Z^2 - 1) * (\operatorname{Erfi}(\sqrt{\beta}) - \operatorname{Erfi}(\sqrt{\beta} R))}{4 \beta^{3/2} R V_1} \end{aligned} \quad (3.8.7)$$

⁽⁹⁰⁾ Από Schosser (2016)

Η **Εικόνα 22** αποδεικνύει ότι οι ρευματογραμμές της μαζικής ροής είναι ίδιες με τις ρευματογραμμές στη θέση μεταξύ δίσκων $Z = \pm\sqrt{\frac{1}{3}}$ για κατανομή παραβολικής ταχύτητας σε ακτινικές και εφαπτομενικές κατευθύνσεις. Οι **Εικόνας 22** και **23** δείχνουν τις ροές του ρότορα στο απόλυτο πλαίσιο αναφοράς.



Εικόνα 22: Πανομοιότητα ρευματογραμμής για $Z = \pm\sqrt{(1/3)}$ και μαζικής ροής ($\beta = 5$)⁽⁹¹⁾



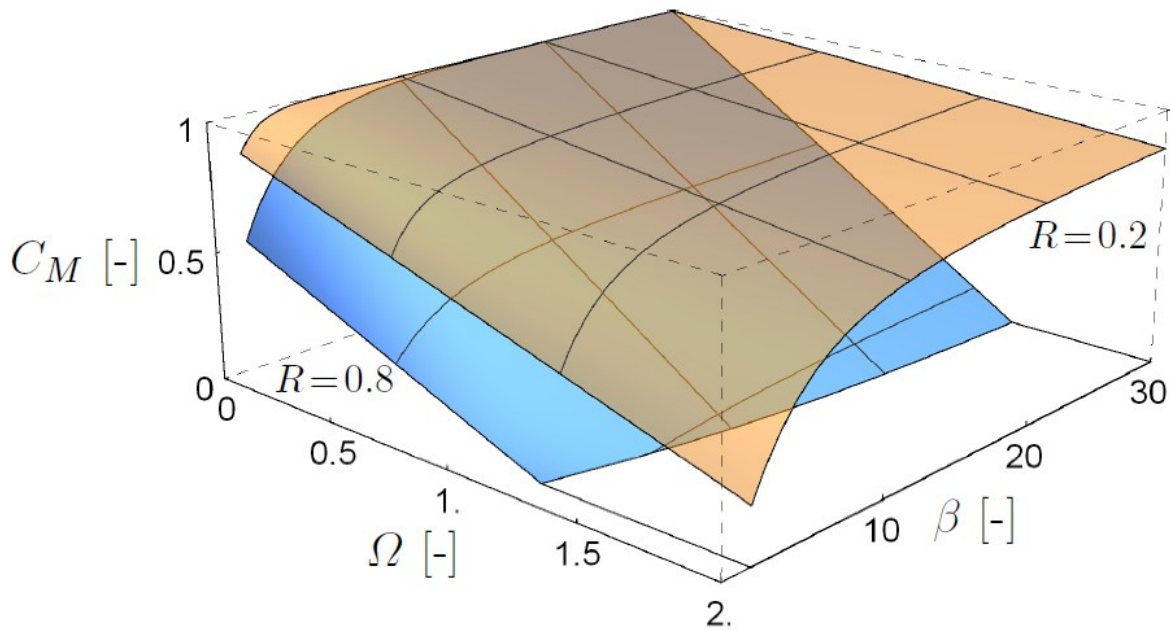
Εικόνα 23: Ρευματογραμμές σε διαφορετικές αξονικές θέσεις ($\beta = 5$, $\Omega = 1$, $V_1 = 0,3$)⁽⁹¹⁾

Η εικόνα 23 δείχνει τη διακύμανση των γραμμών από τη μαζική ροή για $\beta = 5$, $\Omega = 1$ και $V_1 = 0.3$ σε διαφορετικές αξονικές θέσεις διακένου. Η κεντρική ρευματογραμμή έχει τη μεγαλύτερη διαδρομή. Σε σύγκριση με τη μαζική ροή, το ρευστό κάνει λιγότερες περιστροφές πιο κοντά στο τοίχωμα. Η ισχυρή διακύμανση του μήκους της γραμμής σε αξονική κατεύθυνση δείχνει γενικά υψηλές δυνάμεις διάτμησης στον ρότορα. ⁽⁹¹⁾

3.9 Οι επιδράσεις της αναλογίας ακτίνας

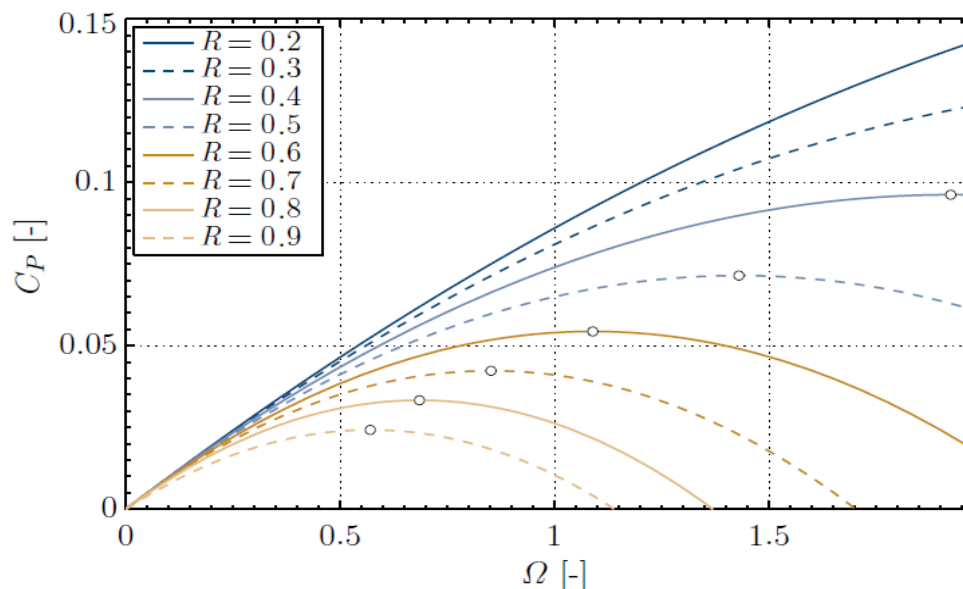
Οι μεγάλες αναλογίες ακτίνας οδηγούν σε απότομες κεκλισμένες ροπές σε συνάρτηση με το Ω (συντελεστής γωνιακής ταχύτητας) σε σύγκριση με αυτές με χαμηλές αναλογίες ακτίνας. Η **Εικόνα 24** δείχνει την ποιοτική πορεία του συντελεστή ροπής χωρίς διάσταση για διαφορετικούς λόγους ακτίνας. Με C_M να συμβολίζει τον αδιάστατο συντελεστή ροπής.

91 Από Schosser (2016)



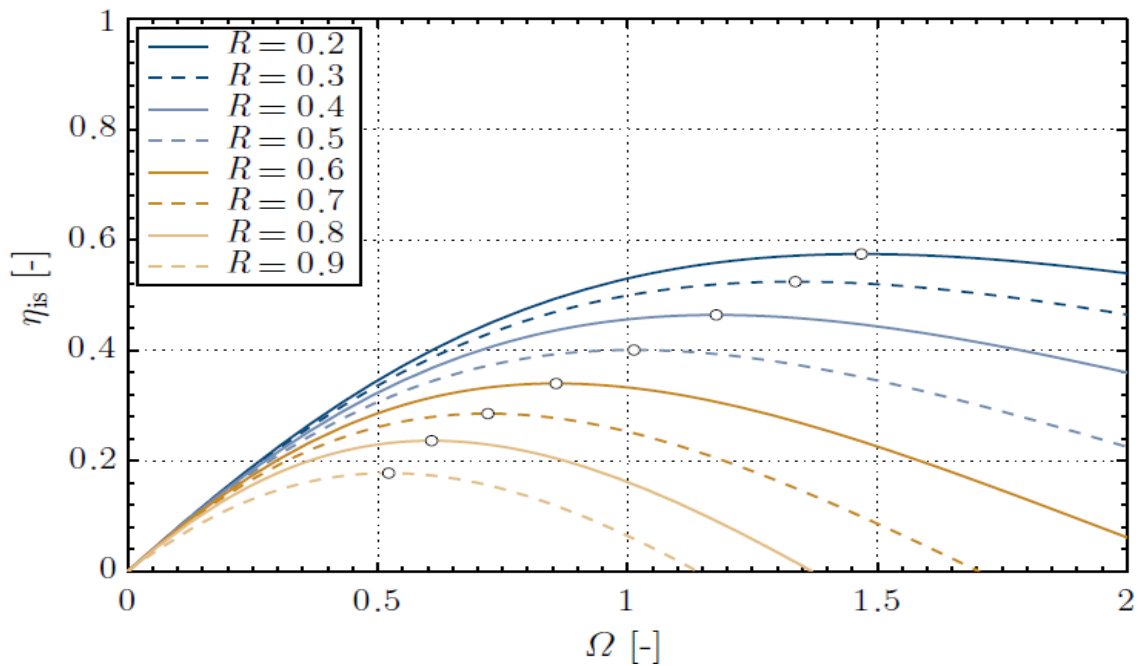
Εικόνα 24: Χάρτης ροπής C_M για αναλογίες μικρών και μεγάλων ακτίνων R ⁽⁹²⁾

Και οι δύο καμπύλες ροπής είναι ίδιες σε μηδενική γωνιακή ταχύτητα, όταν τα επίπεδα υπερβαίνουν τα $\beta \geq 10$. Η απόδοση στροβίλων έναντι της γωνιακής ταχύτητας απεικονίζεται στην **Εικόνα 25**. Επιτρέπει ποσοτικές δηλώσεις σχετικά με την επίδραση της αναλογίας ακτίνας. Οι ρότορες με χαμηλές αναλογίες ακτίνας προσφέρουν περισσότερη ισχύ ανά χάσμα σε όλο το φάσμα των περιστροφικών ταχυτήτων. Οι κορυφές της απόδοσης μετατοπίζονται σε υψηλότερες γωνιακές ταχύτητες με μειωμένες αναλογίες ακτίνας. Η ισεντροπική απόδοση αυξάνεται επίσης με μειωμένη αναλογία ακτίνας, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 26**. Τα μέγιστα της ισεντροπικής απόδοσης μετατοπίζονται επίσης σε υψηλότερες τιμές της γωνιακής ταχύτητας. Όπου C_p είναι ο συντελεστής ισχύος χωρίς διάσταση. Όπου η_{is} είναι η ισεντροπική απόδοση.



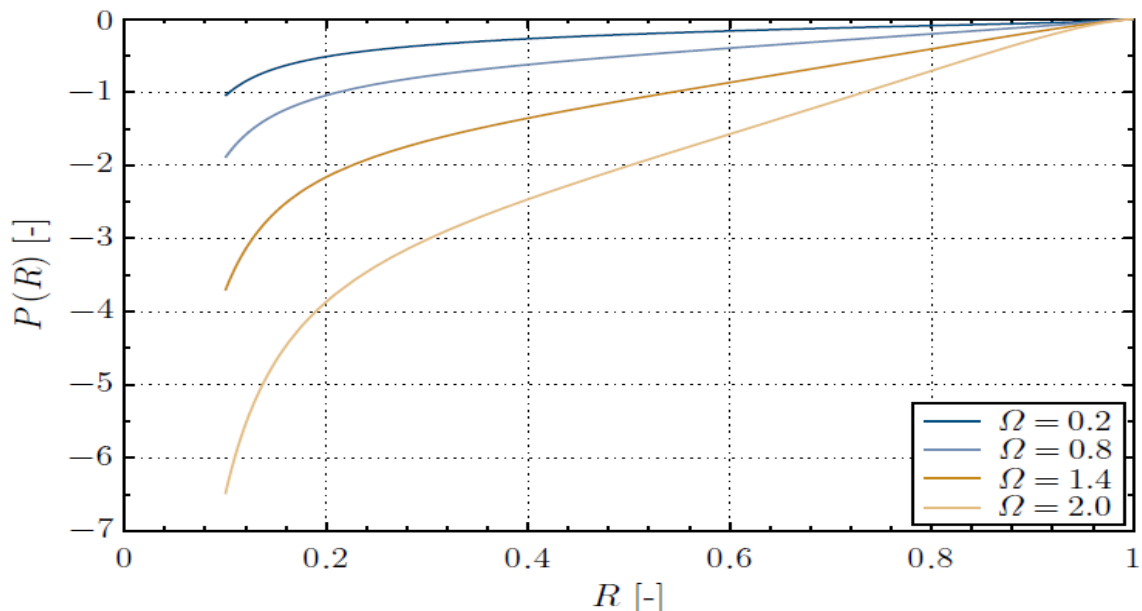
Εικόνα 25: Χάρτης απόδοσης για διαφορετικούς λόγους ακτίνας R ⁽⁹²⁾

⁽⁹²⁾ Από Schosser (2016)



Εικόνα 26: Χάρτης απόδοσης για διαφορετικούς λόγους ακτίνας R ⁽⁹³⁾

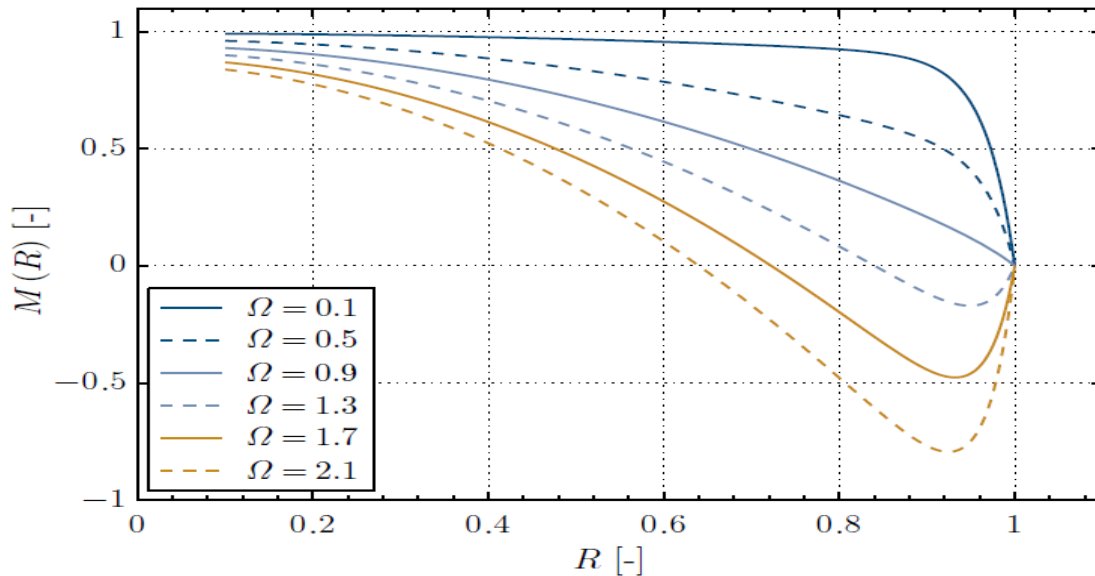
Ωστόσο, η απόδοση δεν αυξάνεται στο βαθμό της επίδοσης του στροβίλου. Αυτό προκαλείται από το γεγονός ότι οι πτώσεις πίεσης γενικά αυξάνονται με τη γωνιακή ταχύτητα και με τη μειωμένη αναλογία ακτίνας, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 27**. Επιπλέον, η διανομή της συνολικής ποσότητας ροπής κατά μήκος της αναλογίας ακτίνας, που απεικονίζεται στην **Εικόνα 28**, παρέχει περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των στροβίλων Tesla. Το μεγαλύτερο μερίδιο ολόκληρης της ροπής που παρέχεται σε χαμηλές γωνιακές ταχύτητες, παράγεται εντός του πρώτου δέκα τοις εκατό της ακτίνας. Η υψηλότερη ροπή παράγεται με τις χαμηλότερες γωνιακές ταχύτητες. Με αυξανόμενη γωνιακή ταχύτητα, το προαναφερθέν σημαντικό μερίδιο της παραγωγής ροπής μετατοπίζεται σε χαμηλότερες αναλογίες ακτίνας.



Εικόνα 27: Πτώση πίεσης ΔP σε όλη την ακτίνα ⁽⁹³⁾

.93 Από Schosser (2016)

Η περιφερειακή ταχύτητα των δίσκων στην εξωτερική ακτίνα του ρότορα ισούται με την εφαπτομενική απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο του ρότορα σε τιμή $\Omega = 1.0$. Τιμές του Ω που υπερβαίνουν το 1.0 συνεπάγονται με μια χαμηλότερη εφαπτομενική, απόλυτη ταχύτητα σε σύγκριση με την περιφερειακή ταχύτητα των δίσκων στην είσοδο του ρότορα, η οποία παράγει μια αρνητική ροπή. Σε αυτήν την περίπτωση, η τουρμπίνα λειτουργεί ως συμπιεστής στα πρώτα είκοσι έως σαράντα τοις εκατό της ακτίνας. Προφανώς, η εφαπτομενική, απόλυτη ταχύτητα αυξάνεται κατά μήκος της ακτίνας του ρότορα. Με αυτόν τον τρόπο, ξεπερνά τη περιφερειακή ταχύτητα δίσκου σε συγκεκριμένη ακτίνα και αρχίζει να δημιουργεί θετικές ροπές. Ωστόσο, στην **Εικόνα 28** διευκρινίζεται γιατί η ροπή μειώνεται αρκετά με τη γωνιακή ταχύτητα σε υψηλές αναλογίες ακτίνας.⁽⁹⁴⁾



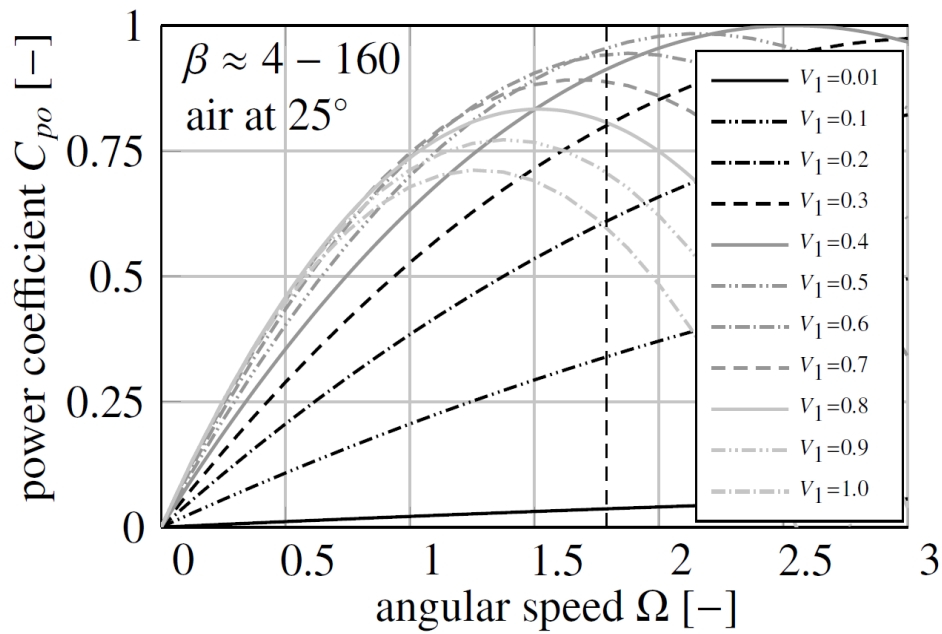
Εικόνα 28: Ανάπτυξη συνολικής ροπής M κατά μήκος των ακτίνων R ⁽⁹⁴⁾

3.10 Αδιάστατες συνθήκες εισόδου

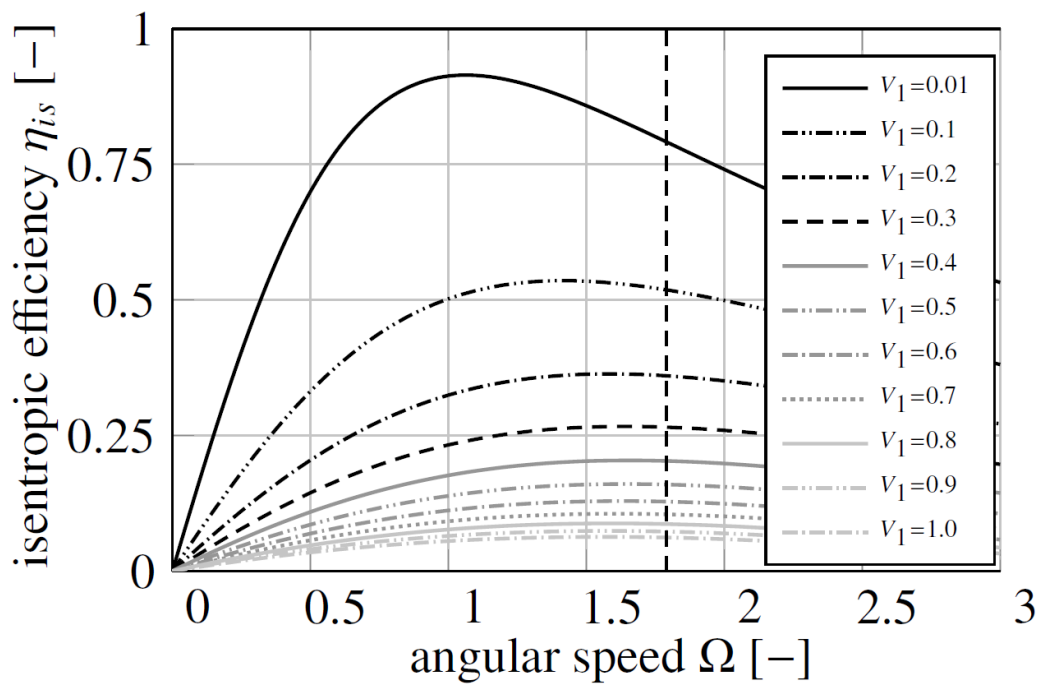
Οι ρότορες Tesla μπορούν είτε να είναι αποδοτικοί είτε ισχυροί. Όσο χαμηλότερη είναι η V_1 , τόσο υψηλότερη είναι η ισεντροπική απόδοση. Από την άλλη πλευρά, μια χαμηλή ροή μάζας V_1 και ακτινικής μάζας οδηγεί σε χαμηλή ισχύ άξονα ανά διάκενο. Οι **Εικόνες 29** και **30** δείχνουν κανονικοποιημένη ισχύ και απόδοση του άξονα ως συνάρτηση της γωνιακής ταχύτητας. Το μέγεθος της ταχύτητας εισόδου διατηρείται σταθερό, τα συστατικά της ταχύτητάς τους είναι συστηματικά μεταβαλλόμενα. Αυτό οδηγεί σε αλλαγή του β και επηρεάζει τη δύναμη και την απόδοση. Το χαμηλό V_1 αντιστοιχεί στο υψηλό β . ⁽⁹⁵⁾

94 Από Schosser (2016)

95 Από Schosser, Lecheler & Pfitzner (2017)



Εικόνα 29: Επίδραση της γωνίας εισόδου στην απόδοση (η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το μηχανικό όριο)⁽⁹⁶⁾



Εικόνα 30: Επίδραση της γωνίας εισόδου στην ισεντροπική απόδοση (η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το μηχανικό όριο)⁽⁹⁶⁾

⁽⁹⁶⁾ Από Schosser, Lecheler & Pfitzner (2017)

Βιβλιογραφία - Ιστογραφία

- Schosser C., Lecheler S. & Pfitzner M. (2017). “Analytical and Numerical Solutions of the Rotor Flow in Tesla Turbines”. Άρθρο στο *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*.
- Wikipedia, “Computational fluid dynamics”. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics , Ανακτήθηκε 10/5/2021
- Peshlakai A. (2012), “Challenging the Versatility of the Tesla Turbine: Working Fluid Variations and Turbine Performance”. Arizona State University
- Krishnan V. G. (2015). “Design and Fabrication of cm-scale Tesla Turbines”. PhD diss., UC Berkeley.
- Guha A., και Smiley B. (2010). “Experiment and analysis for an improved design of the inlet and nozzle in Tesla disc turbines.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 224, no. 2: 261-277.
- Lawn M. J., και Rice W. (1974), “Calculated design data for the multiple-disk turbine using incompressible fluid”, *Journal of Fluids Engineering* 96, no. 3: 252-258.
- Lampart P., & Jędrzejewski L. (2011), “Investigations of aerodynamics of Tesla bladeless microturbines.” *Journal of Theoretical And Applied Mechanics* 49, no. 2: 477–499.
- Lampart P., Kosowski K., Piwowarski M., and Jędrzejewski L. (2009). “Design analysis of Tesla micro-turbine operating on a low-boiling medium.” *Polish Maritime Research* 16, no. Special: 28-33.
- Holland K. (2016), “Design, construction and testing of a Tesla turbine”. PhD diss., Laurentian University of Sudbury.
- Armstrong J. H. (1952). “An investigation of the performance of a modified Tesla turbine”. PhD diss., Georgia Institute of Technology.
- Hoya G. P., & Guha A. (2009). “The design of a test rig and study of the performance and efficiency of a tesla disc turbine.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 223, no. 4: 451– 465.
- Zuber M., Ramesh A. & Bansal D. (2019), “The Tesla turbine- A comprehensive review”, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 62.
- Li R., Wang H., Yao E., Li M.& Nan W. (2017). “Experimental study on bladeless turbine using incompressible working medium”. *Advances in Mechanical Engineering* 9, no. 1: 1–12.
- Lemma E., Deam R. T., Toncich D. & Collins R. (2008), “Characterisation of a small viscous flow turbine”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 33, no. 1: 96–105.

- Deam R. T., Lemma E., Mace B. & Collins R. (2008). "On scaling down turbines to millimeter size". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 130, no. 5: 052301.
- Krishnan V., Romanin V., Van P. Carey & Maharbiz M. (2013), "Design and scaling of microscale Tesla turbines". *Journal of Micromechanics and Microengineering* 23, no. 12.
- Romanin V., Krishnan V, Van P. Carey & Maharbiz M. (2013), "Experimental and Analytical study of sub-watt scale Tesla turbine performance". In *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 1005-1014. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection
- Krishnan V. G., Iqbal Z. & Maharbiz M. (2011) "A micro tesla turbine for power generation from low pressure heads and evaporation driven flows". In *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, pp. 1851-1854. IEEE, 2011.
- Foo S. J., Tan W. C. & Shahril M (2010) "Development of tesla turbine for green energy application". In *Proceeding of National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Studies (2nd NCMER 2010)*, pp. 671- 680.
- Rice W. (1991), "Tesla Turbomachinery." In *Conference Proceedings of the IV International Tesla Symposium*.
- Choon Tan Wee, A. A. Rahman, Foo Shy Jer & Lim Eng Aik (2011). "Optimization of Tesla turbine using computational fluid dynamics approach". In *2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, pp. 477-480. IEEE, 2011.
- Mark C. Breiter, & Karl Pohlhausen (1962) "Laminar flow between two parallel rotating disks". Wright-Patterson Air Force Base.
- Borate H. & Misal N. (2013)"An effect of spacing and surface finish on the performance of bladeless turbine". In *ASME 2012 Gas Turbine India Conference*, pp. 165-171. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Couto H. S., Duarte J. B. F & Bastos-Netto D. (2006). "The tesla turbine revisited". In *Proceedings of the Eighth Asia- Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*.
- Peirs J., Reynaerts D. & Verplaetsen F. (2004), "A microturbine for electric power generation". *Sensors and Actuators A: Physical* 113, no. 1: 86-93
- Bloudíček P. & Paloušek D. (2007), "Design of Tesla Turbine". In *Konference Diplomových Prací* p. 1-6.
- Schosser C. (2016), "Experimental and numerical investigations and optimisation of Tesla-radial turbines". Universität der Bundeswehr München Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik Institut für Thermodynamik.

4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΤΟΥΡΜΠΙΝΑΣ

4.1 Εισαγωγή στην θεωρητική διερεύνηση

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μια θεωρητική διερεύνηση στο κατά πόσο η απόδοση της τουρμπίνας επηρεάζεται από την πειραματική αλλαγή των μεταβλητών της ταχύτητας ρευστού στην είσοδο $V(m/s)$, τον αριθμό δίσκων A και της ακτίνας δίσκου $r(m)$.

Αρχικά θα χρησιμοποιήσουμε συγκεκριμένους τύπους από το κεφάλαιο 3 ως εργαλεία, ώστε να καταλήξουμε σε μια τελική σχέση που θα εκφράζει το παραγόμενο έργο. Σε αυτή τη σχέση θα γίνει αντικατάσταση όλων των όρων με μια σταθερή τιμή, εκτός από μία μεταβλητή που μας ενδιαφέρει κάθε φορά όπως V , A ή r . Σε αυτή τη μεταβλητή δίνοντας διαφορετικές τιμές κάθε φορά και κρατώντας τους υπόλοιπους όρους σταθερούς, θα βρούμε κάποιες τιμές παραγόμενου έργου σύμφωνα με τις οποίες θα πραγματοποιηθούν τα διαγράμματα: $\dot{W}_t - V$, $\dot{W}_t - A$, $\dot{W}_t - r$.

Αρχικά υποθέτουμε ότι την θεωρητική μας μελέτη την εξάγουμε πάνω σε μία πολυβάθμια μηχανή όπου την είδαμε και λίγο πιο αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο. Επίσης χρησιμοποιείται αέρας ως λειτουργικό μέσο για τη λειτουργία του στροβίλου.

Η σχέση που χαρακτηρίζει το παραγόμενο έργο του στροβίλου χρησιμοποιώντας μετρούμενες συνθήκες στα σημεία κατάστασης 1 και 3 όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 17** (κεφάλαιο 2) είναι:

$$\dot{W}_t = \dot{m} \left[(h_1 - h_3) + \frac{1}{2} (V_1^2 - V_3^2) \right] - \dot{Q}_k \quad (3.2.3)$$

όπου h_1, h_3 η ενθαλπία στα σημεία 1-3 (kJ/kg), V_1, V_3 η ταχύτητα ρευστού έργου στα σημεία 1-3 (m/s), \dot{Q}_k η συνολική μεταφορά θερμότητας σε περιβάλλοντα χώρο (W) και \dot{m} ο ρυθμός ροής μάζας (kg/s).

Έστω ότι ισχύει $V_3 = \frac{V_1}{2}$ (4.1.1) καθώς η μελέτη γίνεται σε πολυβάθμια μηχανή. Δηλαδή, η ταχύτητα ρευστού έργου V_1 στην είσοδο της πρώτης βαθμίδας της μηχανής είναι διπλάσια σε σύγκριση με την έξοδό της V_3 , όπου στην ουσία η V_3 είναι και είσοδος της δεύτερης βαθμίδας της μηχανής. Επομένως, εισάγοντας τη σχέση (4.1.1) στη σχέση (3.2.3) και κάνοντας κάποιες πράξεις, καταλήγουμε σε μια καινούργια σχέση.

$$\dot{W}_t = \dot{m} \frac{3V_1^2}{8} - \dot{Q}_k + \dot{m}(h_1 - h_3) \quad (4.1.2)$$

Για το ρυθμό ροής μάζας \dot{m} ισχύει: $\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{\rho * V}{t} = \frac{\rho(s*d)}{t} = \frac{\rho * b^2 * d}{t} = \rho * b^2 * V_1$

Άρα αντικαθιστώντας τη νέα σχέση $\dot{m} = \rho * b^2 * V_1$ (4.1.3) στην (4.1.2), προκύπτει μια καινούργια σχέση:

$$\dot{W}t = \frac{\rho * b^2 * 3 V_1^3}{8} - \dot{Q}_k + \rho * b^2 * V_1 * \Delta_h \quad (4.1.4)$$

όπου Δ_h εννοούμε $(h_1 - h_3)$ και h_1, h_3 την ενθαλπία στα σημεία 1-3 (kJ/kg), V_1 η ταχύτητα ρευστού έργου στην είσοδο (m/s), \dot{Q}_k η συνολική μεταφορά θερμότητας σε περιβάλλοντα χώρο (W) και b το διάκενο μεταξύ των δίσκων (m) και ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m³).

4.2 Διερεύνηση για την ταχύτητα εισόδου του ρευστού

4.2.1 Η επίδραση της αύξησης ταχύτητας εισόδου του ρευστού στο παραγόμενο έργο

Για να διερευνήσουμε την επίδραση της αύξησης ταχύτητας εισόδου του ρευστού στο παραγόμενο έργο, θα πρέπει να υλοποιήσουμε το διάγραμμα $\dot{W}t - V$.

Αρχικά η μελέτη μας πρέπει να επικεντρωθεί στη σχέση (4.1.4). Θα βρούμε την τιμή του παραγόμενου έργου $\dot{W}t$ αντικαθιστώντας του όρους με μια συγκεκριμένη τιμή. Ωστόσο για το V_1 θα δίνουμε διαφορετικές τιμές για να παρατηρήσουμε το πως μεταβάλλεται το $\dot{W}t$. Αυτή η διαδικασία θα γίνει με τη βοήθεια του υπολογιστή και συγκεκριμένα με τη βοήθεια του online εργαλείου demos.com/calculator, θα υλοποιηθεί η σχέση (4.1.4).

The image shows a web calculator interface. At the top, there are navigation icons: a plus sign, left and right arrows, a gear icon, and a double left arrow. Below this, there are two input fields. The first field, labeled '1', contains the equation $y = 1.205 \cdot 0.002^2 \cdot \left(\frac{3 \cdot x_1^3}{8} \right) + 1.205 \cdot 0.002^2 \cdot x_1$. The second field, labeled '2', contains the variable assignment $x_1 = 5$. Below the second field, there is a slider control for x_1 with a blue dot at the value 5 and a range from 5 to 20. To the right of the equation field, there is a result box displaying $y = 0.0002500375$.

Εικόνα 31: Εισαγωγή σχέσης (4.1.4) στο demos.com/calculator

Όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα, έγινε η εισαγωγή της σχέσης (4.1.4). Στη θέση του $\dot{W}t$ τοποθετήθηκε το y και στη θέση του V_1 τοποθετήθηκε το x_1 . Στη θέση της πυκνότητας αέρα ρ στους 20°C τοποθετήθηκε η τιμή 1,205 kg/m³ και για το διάκενο μεταξύ των δίσκων b τοποθετήθηκε η τιμή 0,002 m. Οι τιμές που δόθηκαν στο x_1 ήταν 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s ώστε για κάθε τιμή x_1 να υπολογιστεί ένα καινούργιο y . Ενδεικτικά βλέπουμε στην **Εικόνα 31** τον υπολογισμό του y για ταχύτητα ρευστού στην είσοδο 5 m/s.

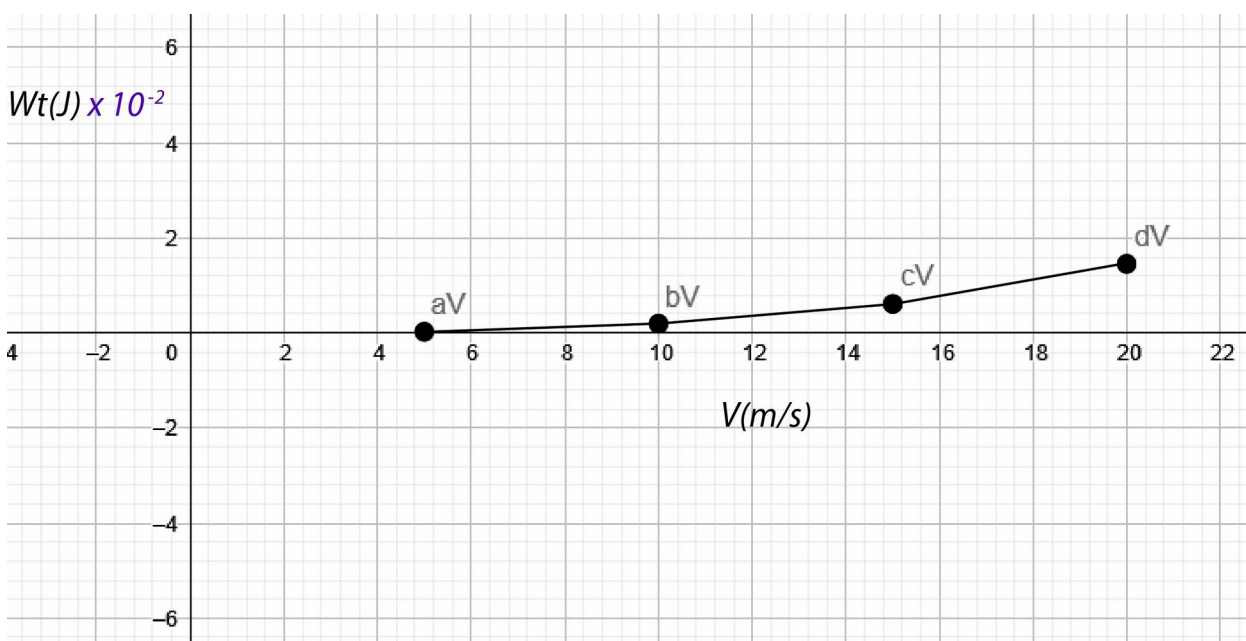
Αποφασίστηκε οι όροι Δ_h και $-Q_k$ να παραλειφθούν από την σχέση για λόγους ευκολότερης αξιοποίησης της σχέσης για την εύρεση αποτελεσμάτων. Η συμβολή τους δεν θα επηρέαζε τα συμπεράσματά μας καθώς απλά θα μετακινούσε τις καμπύλες πάνω-κάτω στο διάγραμμα, χωρίς ν' αλλάξει ιδιαίτερα τη μορφή τους.

Στη συνέχεια αφού βρέθηκαν οι τιμές x και y , δηλαδή η ταχύτητα ρευστού και το παραγόμενο έργο τουρμπίνας αντίστοιχα, είναι καιρός να υλοποιηθεί το διάγραμμα $Wt-V$. Αυτό έγινε πράξη μέσω του online εργαλείου geogebra.org, όπου εκεί έγινε η εισαγωγή των προαναφερόμενων αποτελεσμάτων όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα.

●	$aV = \text{Intersect}(x = 5, y = 0.02500375)$ → (5, 0.02500375)
●	$bV = \text{Intersect}(x = 10, y = 0.18557)$ → (10, 0.18557)
●	$cV = \text{Intersect}(x = 15, y = 0.61726125)$ → (15, 0.61726125)
●	$dV = \text{Intersect}(x = 20, y = 1.45564)$ → (20, 1.45564)

Εικόνα 32: Εισαγωγή τιμών στο geogebra.org

Για λόγους καλύτερης ευκρίνειας της απεικόνισης των σημείων στο διάγραμμα, τα σημεία του y εισήχθησαν στο πρόγραμμα πολλαπλασιασμένα επί 100 έτσι ώστε να είναι πιο παρατηρήσιμα. Παρακάτω διακρίνουμε το τελικό διάγραμμα $Wt-V$, υλοποιημένο από το geogebra.org και τροποποιημένο από το σχεδιαστικό πρόγραμμα Adobe illustrator.



Εικόνα 33: Διάγραμμα $Wt-V$

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή της ταχύτητας εισόδου του ρευστού V , τόσο αυξάνεται και το παραγόμενο έργο της τουρμπίνας. Όπως βλέπουμε η αύξηση του παραγόμενου έργου συμβαίνει με εκθετικό ρυθμό. Όταν η ταχύτητα έχει τιμές από 5 έως 10 m/s (διπλασιάζεται), το παραγόμενο έργο αυξάνεται περίπου 7,5 φορές. Στη συνέχεια καθώς η ταχύτητα φτάνει από 10 έως 15 m/s (αύξηση 50%), παρατηρείται ότι το παραγόμενο έργο αρχίζει να παίρνει μεγαλύτερες τιμές, έως 3,3 φορές. Τέλος, από 15 έως 20 m/s (αύξηση κατά 1/3), φαίνεται ότι το παραγόμενο έργο τείνει να αυξάνεται με ρυθμό 2,4 φορές και συνολικά ο τετραπλασιασμός της ταχύτητας (από 5 σε 20 m/s) προκάλεσε αύξηση της του παραγόμενου έργου κατά 58 φορές. Επομένως, από τη θεωρητική μας διερεύνηση εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αύξηση της ταχύτητας στην είσοδο του ακροφύσιου της τουρμπίνας, οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του συνολικού παραγόμενου έργου.

4.2.2 Μελέτες για την επίδραση της μεταβαλλόμενης ταχύτητας εισόδου του ρευστού στη απόδοση

Οι Hoya και Guha⁽⁹⁷⁾ μέσω μιας πειραματικής τους μελέτης, παρατήρησαν ότι οι απώλειες στο ακροφύσιο μειώνονταν με την αύξηση της ταχύτητας. Αυτό μάλλον οφειλόταν στο ότι οι υψηλότερες ταχύτητες οδήγησαν σε υψηλότερους αριθμούς *Reynolds* και είχε ως επακόλουθο το οριακό στρώμα να έχει μικρότερα πάχη. Αυτό κατέστησε δυνατή την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων στο ακροφύσιο.

Μια ενδιαφέρουσα ανακάλυψη έκαναν οι E. Lemma et al. ⁽⁹⁸⁾ για τη σχέση ταχύτητας εισόδου υγρού και απόδοσης. Μέσω διάφορων θεωρητικών αναλύσεων βρήκαν ότι η απόδοση του στροβίλου έφτανε τη μέγιστή του τιμή όταν η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου ήταν ίση με την ταχύτητα εισόδου του υγρού.

Η αλληλένδετη σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα ρευστού και τον ρυθμό ροής είναι δεδομένη. Γι' αυτό διάφορες μελέτες έχουν ασχοληθεί με το ρυθμό ροής. Οι Romanin et al. ⁽⁹⁹⁾ διαπίστωσαν ότι μια υψηλότερη ταχύτητα εισόδου είχε ως αποτέλεσμα μια πιο αποτελεσματική λειτουργία, αλλά οι απώλειες στο ακροφύσιο έγιναν πιο σημαντικές. Ο Krishnan ⁽¹⁰⁰⁾ μέσω ενός πειράματος που έκανε, βρήκε ότι μια αύξηση στον ρυθμό ροής προκάλεσε μείωση της απόδοσης. Η ισχύς εξόδου είχε διαφορετική τάση και αυξήθηκε όσο αυξανόταν ο ρυθμός ροής. Το ποσοστό αύξησης ισχύος ήταν μία ή δύο τάξεις υψηλότερο από την απώλεια απόδοσης. Τέλος, αντικρουόμενα δεδομένα έχουν ειπωθεί όσον αφορά τη σχέση του ρυθμού ροής με το είδος του ρευστού εργασίας. Συγκεκριμένα υποστηρίζεται ότι όταν το νερό χρησιμοποιείται ως ρευστό εργασίας, η μείωση του ρυθμού ροής εισόδου προκαλεί αύξηση της απόδοσης, αλλά το αντίθετο έχει καταγραφεί για τον αέρα.

4.3 Διερεύνηση για τον αριθμό των δίσκων

4.3.1 Η επίδραση της αύξησης του αριθμού δίσκων στο παραγόμενο έργο

Σε αυτό το μέρος του κεφαλαίου θα ασχοληθούμε με την επίδραση της αύξησης του αριθμού των δίσκων στο συνολικό παραγόμενο έργο της τουρμπίνας. Έτσι καθίσταται αναγκαίο να πραγματοποιηθεί το διάγραμμα $Wt - A$.

97 Hoya & Guha (2009).

98 Lemma, Dream, Toncich & Collins (2008).

99 Romanin, Vince, Krishnan, Carey & Maharbiz (2013).

100 Krishnan (2015).

Πάλι η μελέτη μας πρέπει να επικεντρωθεί στη σχέση (4.1.4) η οποία θα χρειαστεί να τροποποιηθεί.

Η εξίσωση για το ρυθμό ροής όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3 είναι:

$$q = \frac{0.16 * A * v * r_Q^2}{b} \quad (3.4.3)$$

Επίσης ισχύει: $q = b^2 * V_1$ (4.3.1)

Εισάγοντας την σχέση (4.3.1) στην (3.4.3) και λύνοντας ως προς V_1 , προκύπτει :

$$V_1 = \frac{0.16 * A * v * r_Q^2}{b^3} \quad (4.3.2)$$

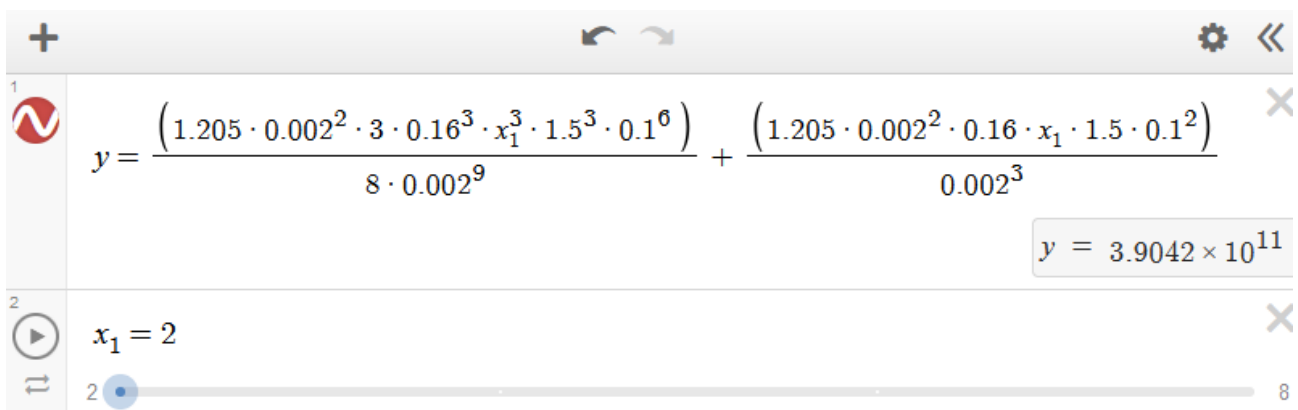
Τέλος εισάγουμε την σχέση (4.3.2) στην πρωταρχική σχέση (4.1.4) έτσι ώστε με διάφορες πράξεις να βρούμε την τελική σχέση που κυρίως θα ασχοληθούμε :

$$\dot{W}t = \frac{\rho * b^2 * 3 * 0.16^3 * A^3 * v^3 * r_Q^6}{8 * b^9} + \frac{\rho * b^2 * 0.16 * A * v * r_Q^2}{b^3} \quad (4.3.3)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), A ο αριθμός των δίσκων, v το κινηματικό ιξώδες (m^2/s), r_Q η εξωτερική ακτίνα (m) και b το διάκενο μεταξύ των δίσκων (m).

Όπως πριν, έτσι για την συνέχεια του κεφαλαίου θα παραλειφθούν οι όροι Δ_h και $-Q_k$ για τους λόγους που αναφέραμε προηγουμένως στο εδάφιο 4.2.

Η διαδικασία που θα τηρηθεί θα είναι παρόμοια με αυτή που τηρήθηκε στο 4.2 για την εύρεση του διαγράμματος $\dot{W}t - V$. Εισάγουμε την σχέση (4.3.3) στο demos.com/calculator όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 34). Εκεί θα αντικαταστήσουμε όλους τους όρους με σταθερές τιμές, εκτός από τον αριθμό των δίσκων A όπου θα έχει μεταβαλλόμενες τιμές.







Εικόνα 34: Εισαγωγή σχέσης (4.3.3) στο demos.com/calculator

Στη θέση της πυκνότητας αέρα ρ στους $20^\circ C$ τοποθετήθηκε η τιμή $1,205 kg/m^3$, για το διάκενο μεταξύ των δίσκων b τοποθετήθηκε η τιμή $0,002m$, για το κινηματικό ιξώδες v στους $20^\circ C$ τοποθετήθηκε η τιμή $1,5 m^2/s$ και για την ακτίνα r_Q του δίσκου η τιμή $0,1 m$. Οι τιμές που δόθηκαν

στο x_i για τον αριθμό των δίσκων ήταν 2, 4, 6 και 8. Για κάθε τιμή αριθμού δίσκων x_i , υπολογίστηκε μία καινούργια τιμή παραγόμενου έργου y .

Στην παραπάνω εικόνα (**Εικ. 34**) βλέπουμε τον υπολογισμό του y για αριθμό δίσκων $A=2$.

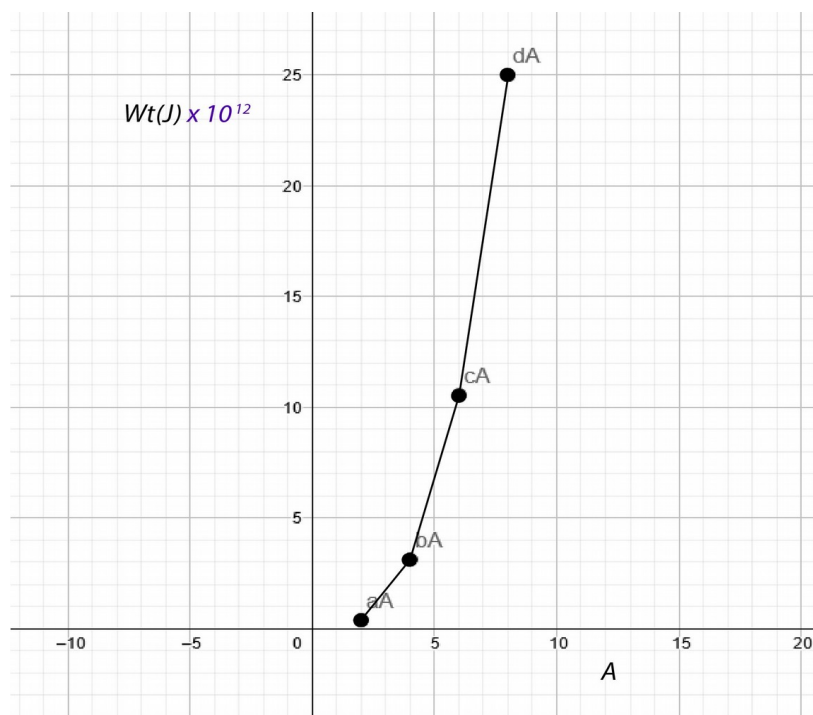
Στη συνέχεια έγινε η εισαγωγή των τιμών x και y στο geogebra.org με τις απαραίτητες εντολές ώστε να εμφανιστούν τα σημεία του διαγράμματος.

	$aA = \text{Intersect}(x = 2, y = 0.39042)$ → (2, 0.39042)
	$bA = \text{Intersect}(x = 4, y = 3.12336)$ → (4, 3.12336)
	$cA = \text{Intersect}(x = 6, y = 10.54134)$ → (6, 10.54134)
	$dA = \text{Intersect}(x = 8, y = 24.98688)$ → (8, 24.98688)

Εικόνα 35: Εισαγωγή τιμών στο geogebra.org

Για λόγους καλύτερης ευκρίνειας της απεικόνισης των σημείων στο διάγραμμα, τα σημεία του y εισήχθησαν στο πρόγραμμα τροποποιημένα σε μικρότερη κλίμακα έτσι ώστε να είναι πιο παρατηρήσιμα. Δηλαδή, όλα τα y της **Εικόνας 35** είναι κανονικά πολλαπλασιασμένα επί 10^{12} .

Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό διάγραμμα $Wt-A$, υλοποιημένο από το geogebra.org και τροποποιημένο από το σχεδιαστικό πρόγραμμα Adobe illustrator .



Εικόνα 36: Διάγραμμα $Wt-A$

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των δίσκου A , τόσο αυξάνεται εκθετικά και το παραγόμενο έργο της τουρμπίνας. Όταν ο αριθμός των δίσκων είναι 2, τότε το παραγόμενο έργο έχει μικρή τιμή. Όταν ο αριθμός των δίσκων είναι 4, το παραγόμενο έργο έχει αύξηση κατά 8 φορές. Στους 6 δίσκους (τριπλασιασμός της αρχικής τιμής), το παραγόμενο έργο έχει αύξηση κατά 27 φορές. Ενώ όταν αριθμός των δίσκων φτάνει στους 8 (τετραπλασιασμός της αρχικής τιμής), το παραγόμενο έργο έχει μια αύξηση κατά 64 φορές. Άρα αυτό που συμπεραίνουμε από το διάγραμμα είναι ότι μετά τους 4 δίσκους, το παραγόμενο έργο εκτινάσσεται.

4.3.2 Μελέτες για την επίδραση του διαφορετικού αριθμού των δίσκων στην απόδοση

Ο Rice ⁽¹⁰¹⁾, ισχυρίστηκε ότι η στρωτή ροή μπορεί να επιτύχει την απόδοση του ρότορα άνω του 95%. Όμως, για να επιτευχθεί αυτή η υψηλή απόδοση, ο ρυθμός ροής του ρευστού θα πρέπει να είναι χαμηλός. Χαμηλότεροι ρυθμοί ροής μπορούν να ληφθούν αυξάνοντας τον αριθμό των δίσκων για μια δεδομένη τροφοδοσία εισόδου. Ως εκ τούτου, αυτή η υψηλή απόδοση επιτυγχάνεται με τη χρήση μεγάλου αριθμού δίσκων και πιθανώς ενός μεγάλου ρότορα.

Οι Romanin et al. ⁽¹⁰²⁾, εξέτασαν ρότορες με 8, 13 και 20 δίσκους. Η απόδοση αυξήθηκε σημαντικά όταν ο αριθμός των δίσκων αυξήθηκε από τους 8. Η απόδοση που λήφθηκε με 8 δίσκους ήταν μεταξύ 0 και 10%, ενώ η απόδοση με 13 και 20 δίσκους ήταν περίπου στο εύρος από 10 έως 20%. Η μέγιστη απόδοση αποκτήθηκε με 13 δίσκους. Οι Hoya και Guha παρατήρησαν παρόμοια ευρήματα σε μια άλλη μελέτη, με την απόδοση να αυξάνεται με περισσότερους δίσκους.

Οι Tan et al. ⁽¹⁰³⁾ προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν τον αριθμό των δίσκων των προηγούμενων εργασιών τους από το 2010, χρησιμοποιώντας μια υπολογιστική προσέγγιση δυναμικής ρευστών. Μειώνοντας τον αριθμό των δίσκων από 21 σε 13, επιτεύχθηκε μια μείωση του ύψους απωλειών. Το ύψος απωλειών συμβαίνει όταν το υγρό πρέπει να πραγματοποιήσει στροφή 90° όταν εξέρχεται από το διάκενο του δίσκου στην έξοδο. Η ροή διαχωρίζεται στις γωνίες και περιορίζεται στην περιοχή *vena contracta*, δηλαδή στο σημείο όπου η διάμετρος του ρεύματος είναι η ελάχιστη και η ταχύτητα του ρευστού είναι στο μέγιστο.

4.4 Διερεύνηση για την ακτίνα των δίσκων

4.4.1 Η επίδραση της αύξησης της ακτίνας των δίσκων στο παραγόμενο έργο

Σε αυτό το σημείο του κεφαλαίου θα μελετήσουμε την επίδραση και το αντίκτυπο της αύξησης της ακτίνας του δίσκου στο παραγόμενο έργο της τουρμπίνας. Αυτό προϋποθέτει την υλοποίηση του διαγράμματος $\dot{W}_t - r$. Η μελέτη μας πάλι πρέπει να επικεντρωθεί στη σχέση (4.3.3).

$$\dot{W}_t = \frac{\rho * b^2 * 3 * 0.16^3 * A^3 * v^3 * r_Q^6}{8 * b^9} + \frac{\rho * b^2 * 0.16 * A * v * r_Q^2}{b^3} \quad (4.3.3)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), A ο αριθμός των δίσκων, v το κινηματικό ιξώδες (m^2/s), r_Q η εξωτερική ακτίνα (m) και b το διάκενο μεταξύ των δίσκων (m).

101 Rice (1991).

102 Romanin, Krishnan, Carey & Maharbiz (2013).

103 Tan, Rahman, Foo Shy & Aik (2011).

Εισάγουμε την σχέση (4.3.3) στο demos.com/calculator όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 37). Εκεί θα αντικαταστήσουμε όλους τους όρους με σταθερές τιμές, εκτός από την ακτίνα του δίσκου όπου θα έχει μεταβαλλόμενες τιμές.

The screenshot shows a web calculator interface. At the top, there is a plus sign, a refresh icon, and a settings icon. Below that, there are two input fields. The first field, labeled '1', contains the formula:
$$y = \frac{(1.205 \cdot 0.002^2 \cdot 3 \cdot 0.16^3 \cdot 4^3 \cdot 1.5^3 \cdot x_1^6)}{8 \cdot 0.002^9} + \frac{(1.205 \cdot 0.002^2 \cdot 3 \cdot 0.16^3 \cdot 4 \cdot 1.5^3 \cdot x_1^2)}{0.002^3}$$
 To the right of the formula, there is a box displaying the result: $y = 4.88025 \times 10^{10}$. The second field, labeled '2', contains the equation $x_1 = 0.05$. Below this field is a slider control with a blue dot at 0.05 and a range from 0.05 to 0.3.

Εικόνα 37: Εισαγωγή σχέσης (4.3.3) στο demos.com/calculator

Στη θέση της πυκνότητας αέρα ρ στους 20°C τοποθετήθηκε η τιμή 1,205 kg/m^3 , για το διάκενο μεταξύ των δίσκων b τοποθετήθηκε η τιμή 0,002m, για το κινηματικό ιξώδες ν στους 20°C τοποθετήθηκε η τιμή 1,5 m^2/s και για τον αριθμό των δίσκων A η τιμή 4. Οι τιμές που δόθηκαν στο x_i για την ακτίνα του δίσκου ήταν 0,05 m, 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m. Δηλαδή μιλάμε για διάμετρο δίσκου 0,1 m, 0,2 m, 0,4 m, 0,6 m αντίστοιχα. Για κάθε τιμή της ακτίνας του δίσκου x_i , υπολογίστηκε μία καινούργια τιμή παραγόμενου έργου y . Στην παραπάνω εικόνα (Εικ. 37) βλέπουμε τον υπολογισμό του y για τιμή της ακτίνας του δίσκου $r_0 = 0,05$.

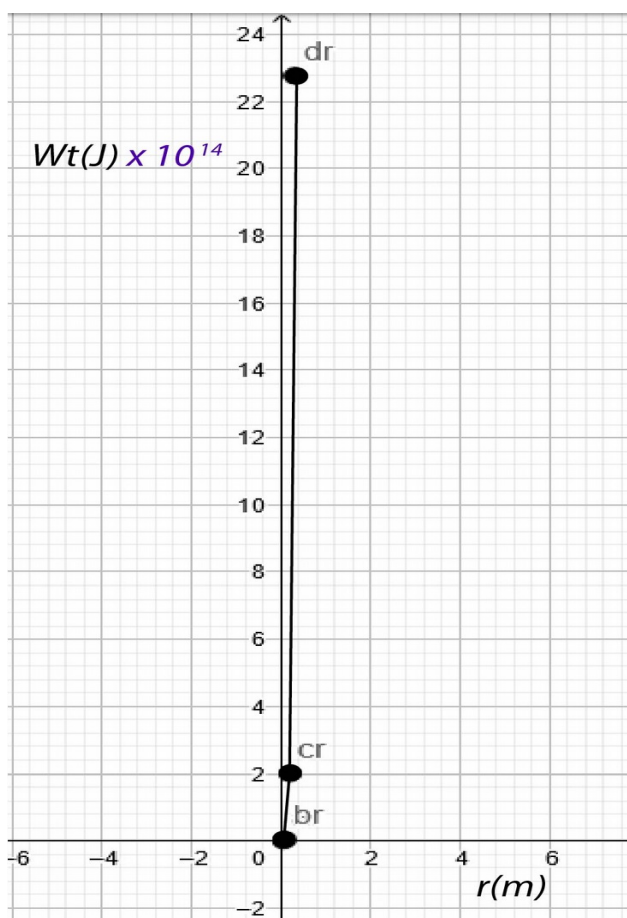
Στη συνέχεια έγινε η εισαγωγή των τιμών x και y στο geogebra.org ώστε να εμφανιστούν τα σημεία του διαγράμματος.

●	ar = Intersect(x = 0.05, y = 0.00048802500023) → (0.05, 0.0004880250002)
●	br = Intersect(x = 0.1, y = 0.031233600001) → (0.1, 0.031233600001)
●	cr = Intersect(x = 0.2, y = 1.9989504) → (0.2, 1.9989504)
●	dr = Intersect(x = 0.3, y = 22.7692944) → (0.3, 22.7692944)

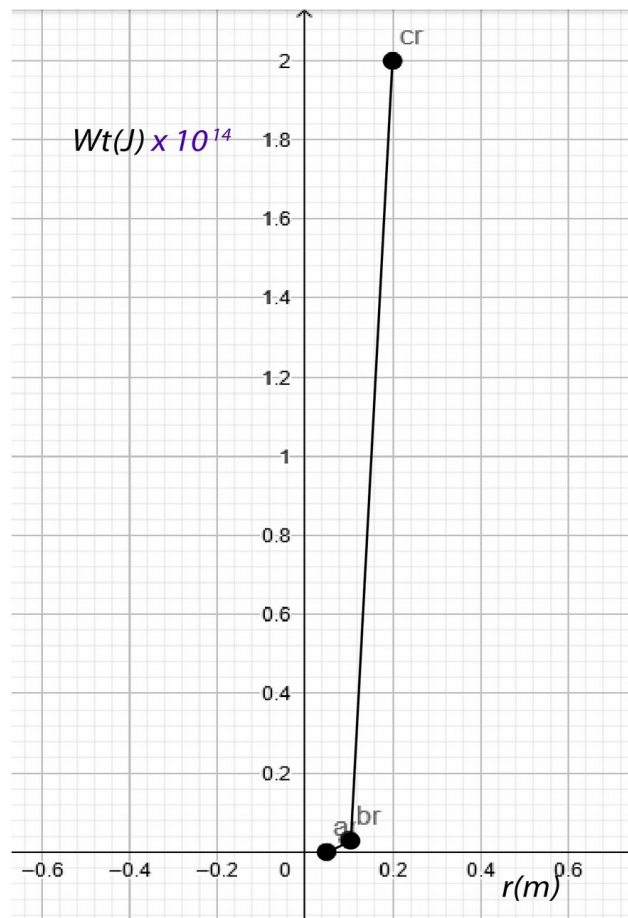
Εικόνα 38: Εισαγωγή τιμών στο geogebra.org

Για λόγους καλύτερης ευκρίνειας της απεικόνισης των σημείων στο διάγραμμα, τα σημεία του y εισήχθησαν στο πρόγραμμα τροποποιημένα σε μικρότερη κλίμακα έτσι ώστε να είναι πιο παρατηρήσιμα. Δηλαδή, όλα τα y της Εικόνας 38 είναι κανονικά πολλαπλασιασμένα επί 10^{14} .

Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό διάγραμμα $Wt-r$, υλοποιημένο από το geogebra.org και τροποποιημένο από το σχεδιαστικό πρόγραμμα Adobe illustrator. Επειδή τα εικονιζόμενα σημεία ar και br βρίσκονται αρκετά κοντά με αποτέλεσμα το σημείο ar να μη φαίνεται, δίνεται και μια δεύτερη εικόνα σε μεγέθυνση στα σημεία αυτά.



Εικόνα 39: Διάγραμμα $Wt-r$



Εικόνα 40: Διάγραμμα $Wt-r$ σε μεγέθυνση

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ακτίνα των δίσκων, τόσο αυξάνεται εκθετικά και το παραγόμενο έργο της τουρμπίνας. Όταν η ακτίνα των δίσκων είναι $0,05\text{ m}$, τότε το παραγόμενο έργο έχει μια μικρή τιμή. Όταν η ακτίνα των δίσκων πάει στα $0,1\text{ m}$, παρατηρείται μια αύξηση κατά 62 φορές. Από αυτό το σημείο και μετά στο παραγόμενο έργο εκτοξεύεται και έχει μια απότομη αύξηση. Δηλαδή το παραγόμενο έργο παίρνει τεράστιες τιμές όταν το μέγεθος της ακτίνας των δίσκων πάει στα $0,2\text{ m}$ και ακόμη μεγαλύτερες όταν πάει στα $0,3\text{ m}$.

4.4.2 Μελέτες για την επίδραση της τιμής της ακτίνας των δίσκων στην απόδοση

Οι Lampart et al. ⁽¹⁰⁴⁾ διεξήγαγαν για πρώτη φορά υπολογιστικές αναλύσεις σε μοντέλα μοναδικών δίσκων, για να μελετήσουν τις επιπτώσεις της χρήσης ποικίλου διαμέτρου δίσκων και διαφορετικού αριθμού εισόδων ακροφυσίων. Τα μοντέλα χρησιμοποιούσαν την περιοχή του κεντρικού άξονα ως έξοδο και δεν είχαν ειδικά προφίλ εξάτμισης, όπως βρίσκονταν σε ρεαλιστικούς στροβίλους. Συνολικά 6 μοντέλα με διάμετρο ρότορα $0,1\text{ m}$ αναλύθηκαν με ποικίλους αριθμούς ακροφυσίων και γωνίες εισόδου. Η μέγιστη απόδοση που επιτεύχθηκε ήταν 30% στις 18.000 RPM , η οποία δεν ήταν

104 Lampart, Jędrzejewski, Kosowski & Piwowarski (2009).

ανταγωνιστική με τους συμβατικούς στροβίλους. Οι Lampart et al., το 2011, αύξησαν τη διάμετρο στα $0,3\text{ m}$ σε μια προσπάθεια να αυξήσουν την απόδοση. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις του μεγαλύτερου ρότορα πραγματοποιήθηκαν μόνο στις 9.000 RPM . Παρατηρήθηκαν βελτιώσεις στη διαδρομή της ρευματογραμμής. Η υψηλότερη απόδοση της νέας μελέτης ήταν μεγαλύτερη από 50% . Αυτό το μοντέλο είχε δύο ακροφύσια με γωνίες εισόδου 10° . Τα σωματίδια του υγρού βρέθηκαν να εκτελούν 6 στροφές πριν βγουν από τον στρόβιλο.

Το πλήρες μοντέλο που δοκιμάστηκε από τους Lampart και Jędrzejewski⁽¹⁰⁵⁾ όπου θεώρησαν ένα κενό μεταξύ του δίσκου και του ακροφυσίου, καθιστώντας το έτσι πιο ρεαλιστικό και ακριβές. Υπήρχαν τέσσερις οπές εξάτμισης σε κάθε ρότορα, κάτι διαφορετικό από το να λειτουργεί ως εξάτμιση η περιοχή του άξονα. Οι μισοί από τους 11 δίσκους εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας μια συνθήκη συμμετρίας. Η γωνία του ακροφυσίου σταθεροποιήθηκε στις 10° και το διάκενο μεταξύ των δίσκων ήταν $0,25\text{ mm}$. Επιτεύχθηκε μια πολύ χαμηλότερη απόδοση 16% , λαμβάνοντας υπόψιν τις διαρροές. Ο αριθμός των περιστροφών που πραγματοποιήθηκαν από τα σωματίδια ρευστού στους δίσκους διαμέτρου $0,1\text{ m}$ ήταν μικρότερος από αυτόν στην απλή ανάλυση. Οι ισχυρές δίνες και οι στροβιλισμοί που σχηματίστηκαν στην έξοδο και οι αλλαγές στην κατεύθυνση του υγρού από ακτινική σε αξονική ήταν οι λόγοι για την πτώση της απόδοσης.

Ο Holland⁽¹⁰⁶⁾, παρουσίασε διάφορες παραμέτρους που μπορούν να ληφθούν υπόψιν για τον καθορισμό του μεγέθους του δίσκου, όπως η ταχύτητα τροφοδοσίας, η πίεση, η θερμοκρασία και η αδράνεια του συστήματος. Μεγαλύτερη αδράνεια του ρότορα θα βοηθούσε στην περίπτωση ξαφνικής φόρτισης καθώς θα απέτρεπε την υπερβολική επιβράδυνση του στροβίλου. Για τη μελέτη αυτή επιλέχθηκαν δίσκοι με εξωτερική και εσωτερική διάμετρο $0,095\text{ m}$ και $0,017\text{ m}$ αντίστοιχα. Αυτή η τιμή ήταν κατάλληλη για τις χαμηλές πιέσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Οι εύκολα διαθέσιμες πλάκες σκληρών δίσκων χρησιμοποιήθηκαν ως δίσκοι αντί να πραγματοποιηθεί διαδικασία για την κατασκευή τους. Αυτός ήταν επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της διαμέτρου του δίσκου για τον Holland.

Ως εκ τούτου, αρκετοί παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την επιλογή της διαμέτρου του δίσκου. Οι Lampart και Jędrzejewski⁽¹⁰⁵⁾ μέσω υπολογιστικών αναλύσεων, παρατήρησαν αύξηση στην απόδοση του στροβίλου με δίσκο μεγαλύτερης διαμέτρου.

Χρησιμοποιώντας τη δυναμική των υπολογιστικών ρευστών, οι Tan et al.⁽¹⁰⁷⁾ προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν τη διάμετρο των δίσκων από τις προηγούμενες εργασίες το 2010. Στη βελτιστοποιημένη τουρμπίνα, η διάμετρος των δίσκων αυξήθηκε από $0,05\text{ m}$ σε $0,07\text{ m}$. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ροπής κατά 57% . Οι μεγαλύτεροι δίσκοι παρήγαγαν περισσότερη ροπή καθώς το υγρό ήταν σε θέση να ταξιδέψει σε μεγαλύτερες διαδρομές. Ωστόσο, οι δίσκοι δεν θα μπορούσαν να είναι τόσο μεγάλοι ώστε η αρχική ροπή που απαιτείται για να τεθούν σε κίνηση, να μη μπορούσε να δημιουργηθεί από τους χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας.

Συνολικά, πολύ λίγες μελέτες έχουν εξετάσει τη συσχέτιση μεταξύ της διαμέτρου του δίσκου και της απόδοσης του στροβίλου. Επομένως, απαιτείται περισσότερη έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

4.5 Εύρεση της ενδεικτικής θεωρητικής απόδοσης

Είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια σύγκριση μεταξύ του παραγόμενου έργου της τουρμπίνας με το έργο που παράγει το κινούμενο ρευστό στο εσωτερικό της τουρμπίνας. Η σύγκριση αυτή θα μας αποφέρει μια ενδεικτική θεωρητική απόδοση.

Το έργο (κινητική ενέργεια) του ρευστού W είναι:

105 Lampart, & Jędrzejewski (2011).

106 Holland (2016).

107 Tan, Rahman, Foo Shy & Aik (2011).

$$W_{\kappa} = \frac{1}{2} * \rho * S * V_1^3 * t$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3), S η επιφάνεια ροής (m), V_1 η ταχύτητα εισόδου του ρευστού (m/s) και t ο χρόνος.

Στην περίπτωση μας, η επιφάνεια ροής S είναι η επιφάνεια του κάθε ακροφυσίου (δηλαδή το τετράγωνο της απόστασης του διακένου b^2) επί το πλήθος των ακροφυσίων που είναι κατά ένα λιγότερα από τους δίσκους ($A - 1$). Επομένως ο παραπάνω τύπος γίνεται:⁽¹⁰⁸⁾⁽¹⁰⁹⁾⁽¹¹⁰⁾

$$W_{\kappa} = \frac{1}{2} * \rho * (A - 1) * b^2 * V_1^3 * t \quad (4.5.1)$$

Επίσης ξέρουμε από παραπάνω ότι η σχέση του παραγόμενου έργου σε μία πολυβάθμια μηχανή είναι :

$$\dot{W}t = \frac{\rho * b^2 * 3 * V_1^3}{8} - \dot{Q}_k + \rho * b^2 * V_1 * \Delta h \quad (4.1.4)$$

όπου Δh εννοούμε ($h_1 - h_3$) και h_1, h_3 την ενθαλπία στα σημεία 1-3 (kJ/kg), V_1 η ταχύτητα ρευστού έργου στην είσοδο (m/s), \dot{Q}_k η συνολική μεταφορά θερμότητας σε περιβάλλοντα χώρο (W) και b το διάκενο μεταξύ των δίσκων (m) και ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3).

Έτσι συγκρίνοντας τις δύο σχέσεις, με εισαγωγή τους σε κλάσμα έχουμε:

$$W_{t,\kappa} = \frac{\rho * b^2 * 3 * \frac{V_1^3}{8} - Q_k + \rho * b^2 * V_1 * \Delta h}{\frac{1}{2} * \rho * (A - 1) * b^2 * V_1^3 * t} \rightarrow$$

$$W_{t,\kappa} = \frac{\rho * b^2 * 3 * \frac{V_1^3}{8}}{\frac{1}{2} * \rho * (A - 1) * b^2 * V_1^3 * t} - \frac{Q_k}{\frac{1}{2} * \rho * (A - 1) * b^2 * V_1^3 * t} + \frac{\rho * b^2 * V_1 * \Delta h}{\frac{1}{2} * \rho * (A - 1) * b^2 * V_1^3 * t} \rightarrow$$

$$W_{t,\kappa} = \frac{3}{4 * \rho * (A - 1) * t} - \frac{Q_k}{\frac{1}{2} * \rho * (A - 1) * b^2 * V_1^3 * t} + \frac{2 * \Delta h}{(A - 1) * V_1^2 * t} \quad (4.5.1)$$

Όπου αντικαθιστώντας τους όρους της σχέσης (4.5.1) με τις εκάστοτε τιμές των στοιχείων λειτουργίας της τουρμπίνας, λαμβάνουμε μία ενδεικτική τιμή σε θεωρητικό επίπεδο, στο που αναμένεται να φτάσει η απόδοση της τουρμπίνας.

108 Καλδέλλης (2005).

109 Γελεγένης & Αξαόπουλος (2005).

110 Παπακίτσος (1990).

Βιβλιογραφία - Ιστογραφία

- Hoya G. P., & Guha A. (2009), “The design of a test rig and study of the performance and efficiency of a tesla disc turbine.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 223, no. 4: 451– 465
- Lemma E., Deam R. T., Toncich D. & Collins R. (2008), “Characterisation of a small viscous flow turbine”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 33, no. 1: 96–105.
- Romanin V., Krishnan V, Van P. Carey & Maharbiz M. (2013). “Experimental and Analytical study of sub-watt scale Tesla turbine performance”. In *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 1005-1014. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Krishnan V. G. (2015), “Design and Fabrication of cm-scale Tesla Turbines”. PhD diss., UC Berkeley.
- Rice W. (1991), “Tesla Turbomachinery.” In *Conference Proceedings of the IV International Tesla Symposium*.
- Choon Tan Wee, A. A. Rahman, Foo Shy Jer & Lim Eng Aik (2011). “Optimization of Tesla turbine using computational fluid dynamics approach”. In *2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, pp. 477-480. IEEE, 2011.
- Lampart P., Kosowski K., Piwowarski M.& Jędrzejewski L. (2009). “Design analysis of Tesla micro-turbine operating on a low-boiling medium.” *Polish Maritime Research* 16, no. Special: 28-33
- Holland K. (2016), “Design, construction and testing of a Tesla turbine”. PhD diss., Laurentian University of Sudbury.
- Lampart P. & Jędrzejewski L. (2011), “Investigations of aerodynamics of Tesla bladeless microturbines.” *Journal of Theoretical And Applied Mechanics* 49, no. 2: 477–499.
- Καλδέλλης Ι.Κ. (2005). *Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας* (2^η Έκδοση). Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη.
- Γελεγένης Ι.Ι. & Αξαόπουλος Π.Ι. (2005). *Πηγές Ενέργειας: Συμβατικές και Ανανεώσιμες*. Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική.
- Παπακίτσος Ε.Χ. (1990). *Θέματα Διδασκαλίας Μαθηματικών – Χημείας – Φυσικής με Εφαρμογές*. Αθήνα: Μ.-Χ.Χ. Χριστοδουλάτου.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Η επίδραση της ταχύτητας ροής εισόδου του ρευστού

Η ταχύτητα ροής του ρευστού στην είσοδο παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία και στην επίτευξη μεγάλης απόδοσης της τουρμπίνας. Επηρεάζει το υπόλοιπο ρευστό που έχει εισέλθει και κινείται μέσα στο ρότορα, όπου με τη σειρά του αυτό κινεί τους δίσκους, με αποτέλεσμα ο στρόβιλος να παράγει το έργο. Εξάλλου είναι γνωστό ότι όσο πιο γρήγορα κινείται το ρευστό και οι δίσκοι μέσα στην τουρμπίνα, τόσο μεγαλύτερη απόδοση θα πραγματοποιείται. Όπως διαπίστωσαν και οι Lemma et al. ⁽¹¹¹⁾ μέσω θεωρητικών αναλύσεων, η απόδοση της τουρμπίνας φτάνει στη μέγιστη τιμή της όταν η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου είναι ίση με την ταχύτητα εισόδου του ρευστού (υγρού).

Η θεωρητική διερεύνηση που διεξήγαμε στο κεφάλαιο 4, μάς έδειξε μέσω του διαγράμματος $\dot{W}_t - V$ ότι η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού στην είσοδο της τουρμπίνας συμβάλλει στην αύξηση του παραγόμενου έργου. Δίνοντας τιμές από 5 έως 20 m/s ανά 5 m/s, παρατηρήσαμε ότι το παραγόμενο έργο αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό, με τη μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρείται στις τελευταίες τιμές.

Το ακροφύσιο και τα στοιχεία που το διέπουν είναι ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την απόδοση της τουρμπίνας κι έχει αλληλένδετη σχέση με το εισερχόμενο ρευστό. Οι Hoya και Guha ⁽¹¹²⁾ μέσω πειραμάτων υποστήριξαν σε μελέτη τους ότι η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού μείωνε τις απώλειες στο ακροφύσιο, με αποτέλεσμα την επίτευξη καλύτερης απόδοσης στη τουρμπίνα. Αυτό οφειλόταν στο ότι οι υψηλότερες ταχύτητες οδήγησαν σε υψηλότερους αριθμούς *Reynolds* κι επομένως σε μικρότερα πάχη του οριακού στρώματος. Από την άλλη, οι Romanin et al. ⁽¹¹³⁾ χρησιμοποίησαν τον ρυθμό ροής σε μια περιοχή από 1 έως 20 mL/sec για να δοκιμάσουν μια πειραματική διάταξη. Βρήκαν ότι μια υψηλότερη ταχύτητα εισόδου είχε ως αποτέλεσμα μια πιο αποτελεσματική λειτουργία αλλά οι απώλειες στο ακροφύσιο έγιναν πιο σημαντικές. Βρέθηκε ακόμη ότι στην περίπτωση μιας στρωτής ροής ακροφυσίου, χαμηλότεροι αριθμοί *Reynolds* είχαν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες. Ενώ σε μια τυρβώδη ροή ακροφυσίου, η υψηλότερη τραχύτητα της επιφάνειας οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες. Οι περισσότεροι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι μια σχεδόν εφαπτομενική γωνία ακροφυσίου ήταν κατάλληλη για την καλύτερη απόδοση και αποτελεσματική είσοδο του ρευστού. Μια μεγάλη απόκλιση από αυτό προς την ακτινική κατεύθυνση θα προκαλούσε μείωση της απόδοσης. Επίσης, τα ακροφύσια με μικρότερες επιφάνειες αναπτύσσουν υψηλότερες στροφές ανά λεπτό που είναι αποτέλεσμα της υψηλότερης κινητικής ενέργειας του ρευστού που εισέρχεται στον ρότορα ⁽¹¹⁴⁾.

111 Lemma, Dream, Toncich & Collins (2008).

112 Hoya & Guha (2009).

113 Romanin, Vince, Vedavalli, Krishnan, Carey & Maharbiz (2013).

114 Διασκευή από Zuber, Ramesh & Bansal (2019).

5.2 Η επίδραση του αριθμού των δίσκων

Ο δίσκος είναι από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα της τουρμπίνας. Ο συνδυασμός αυτού και του ρευστού είναι ο λόγος της παραγωγής έργου. Συγκεκριμένα, όταν ένα μέσο ρέει μέσα από μια σειρά δίσκων μπορεί να δημιουργήσει μια περιστροφική κίνηση και να παραχθεί ροπή. Έτσι είναι λογικό ότι αυξάνοντας τον αριθμό αυτών των δίσκων, θα δημιουργηθεί περισσότερη ροπή και έργο. Ένα συμπέρασμα που επαληθεύσαμε και στο κεφάλαιο 4, κάνοντας θεωρητική διερεύνηση πάνω στην επίδραση του αριθμού των δίσκων στο παραγόμενο έργο. Εκεί μέσω του διαγράμματος $\dot{W}t-A$, για αριθμούς δίσκων 2, 4, 6 και 8, παρατηρήσαμε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των δίσκων A , τόσο αυξάνεται εκθετικά και το παραγόμενο έργο της τουρμπίνας. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι μετά τους 4 δίσκους, το παραγόμενο έργο εκτινάσσεται.

Από μελέτες, και κυρίως του Rice (¹¹⁵), γνωρίζουμε ότι η αύξηση των δίσκων οδηγεί και στην επίτευξη υψηλής απόδοσης στον ρότορα. Αυτό συμβαίνει διότι με την αύξηση του αριθμού των δίσκων μπορούν να ληφθούν χαμηλότεροι ρυθμοί ροής για μια δεδομένη τροφοδοσία εισόδου. Έτσι όταν ο ρυθμός ροής του ρευστού είναι χαμηλός, η στρωτή ροή μπορεί να επιτύχει υψηλή απόδοση στο ρότορα.

Σε γενικές γραμμές, οι μελέτες έχουν δείξει ότι με την αύξηση των δίσκων από τους 8 και μετά επιτυγχάνεται η καλύτερη απόδοση και με τους 13 να είναι η βέλτιστη. Παρόλα αυτά, μια περαιτέρω αύξηση των δίσκων από τους 13 και άνω θα οδηγούσε σε απώλειες ρευστού από το ρότορα και δυσκολία στη σωστή τροφοδοσία της τουρμπίνας (¹¹⁶).

5.3 Η επίδραση της ακτίνας/διαμέτρου του δίσκου

Η διάμετρος του δίσκου είναι ένα από τα πιο καίρια χαρακτηριστικά του δίσκου και της τουρμπίνας που πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας για να επιτευχθεί μια βέλτιστη λειτουργία στη μηχανή. Αυτή η τιμή μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της εισόδου του ρευστού, της πίεσης και της θερμοκρασίας της τουρμπίνας, καθώς και της επιθυμητής ροπής αδράνειας για το σύστημα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός ατμοστρόβιλου υψηλής πίεσης, θα προτιμώνται μεγαλύτεροι δίσκοι, καθώς η ταχύτητα εξάτμισης του ακροφυσίου θα είναι πολύ μεγαλύτερη και μια μεγαλύτερη ροπή θα αποθηκεύει ενέργεια σε περίπτωση ξαφνικού φορτίου, προκειμένου να αποτρέπεται η υπερβολική επιβράδυνση (¹¹⁷).

Στο κεφάλαιο 4 διεξήγαμε μια θεωρητική διερεύνηση πάνω στην επίδραση της ακτίνας των δίσκων στο παραγόμενο έργο. Εκεί μέσω του διαγράμματος $\dot{W}t-r$, για ακτίνα δίσκου 0,05 m, 0,1 m, 0,2 m και 0,3 m, παρατηρήσαμε ότι όσο αυξάνεται η ακτίνα του δίσκου r , τόσο αυξάνεται εκθετικά και το παραγόμενο έργο της τουρμπίνας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι όταν η ακτίνα των δίσκων μεταβαίνει στα 0,1 m, το παραγόμενο έργο εκτοξεύεται έχοντας μια απότομη αύξηση. Αυτό το αποτέλεσμα επαληθεύεται και από διάφορες μελέτες όπως των Tan et al. (¹¹⁸), όπου με το πείραμά τους διαπιστώνουν ότι οι μεγαλύτεροι δίσκοι παρήγαγαν περισσότερη ροπή, καθώς το υγρό ήταν σε θέση να ταξιδέψει σε μεγαλύτερες διαδρομές. Επομένως το ίδιο ισχύει και για το παραγόμενο έργο. Γενικά, λίγες μελέτες έχουν εξετάσει την επίδραση της ακτίνας του δίσκου στην απόδοση. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες με πειράματα που υποστηρίζουν ότι η αύξηση της ακτίνας βελτιώνει και την απόδοση. Ένας πολύ μικρός ρότορας δεν μπορεί να μετατρέψει αποτελεσματικά όλη την κινητική ενέργεια που υπάρχει στο εγχεόμενο ρευστό. Βέβαια, οι δίσκοι δεν μπορούν να είναι υπερβολικά μεγάλοι, καθώς θα είναι αρκετά δύσκολο να τεθούν σε κίνηση και να αποκτήσουν ροπή από τους αρχικούς χαμηλούς ρυθμούς τροφοδοσίας. Επίσης ένας πολύ μεγάλος ρότορας μπορεί να δημιουργήσει υπερβολική ροή για το ρευστό, με επακόλουθη απώλεια φορτίου. Τέλος,

115 Rice (1991).

116 Διασκευή από Zuber, Ramesh & Bansal (2019).

117 Holland (2016).

118 Tan, Rahman, Foo Shy & Aik (2011).

ένας πολύ μεγάλος δίσκος είναι δύσκολο να κατασκευαστεί και λόγω των υψηλών φυγόκεντρων δυνάμεων στις οποίες υπόκειται, με τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής να είναι περιορισμένη (¹¹⁶).

5.4 Τα πλεονεκτήματα της τουρμπίνας Τέσλα

Αν κοιτάξουμε από τη μηχανική πλευρά, η τουρμπίνα είναι εύκολη στην κατασκευή και το κόστος κατασκευής είναι χαμηλό και οικονομικό. Το κόστος παραγωγής για δίσκους είναι πολύ χαμηλότερο απ' ό,τι για λεπίδες και ο συνολικός σχεδιασμός είναι απλούστερος και πιο εύκολα κατασκευάσιμος. Λόγω της φύσης της κατασκευής, έχει καλύτερη ανθεκτικότητα και χαμηλή φθορά σε σχέση με τις σημερινές τουρμπίνες. Η εσωτερική στατική πίεση είναι χαμηλή και έτσι δεν απαιτούνται βαριά χυτά περιβλήματα για την κατασκευή της. Μπορεί να λειτουργήσει τόσο δεξιόστροφα όσο και αριστερόστροφα σε ένα μόνο μηχανήμα, όπως φαίνεται και στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Tesla.

Δεδομένου ότι το μηχανήμα αποτελείται από δίσκους σημαίνει ότι λειτουργεί με χαμηλούς κραδασμούς και χαμηλό θόρυβο. Λόγω των χαμηλών κραδασμών, η συνολική ασφάλεια αυξάνεται. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί σταθερό σε διακοπόμενες εφαρμογές, εφαρμογές με γρήγορες διακυμάνσεις φορτίου και τερματισμό λειτουργίας. Εάν οι λειτουργίες των συμβατικών στροβίλων γίνουν προβληματικές ή αποτύχουν, τότε μπορεί να υπάρξει έκρηξη που βλάπτει ολόκληρο το μηχανήμα, συμπεριλαμβανομένων των υδραυλικών σωληνώσεων, των επιφανειών ελέγχου, ακόμη και των χειριστών. Αλλά με τον στρόβιλο Tesla υπάρχουν πολύ μικρές πιθανότητες έκρηξης ή κινδύνου. Εάν κάποιο εξάρτημα γίνει προβληματικό ή αστοχήσει, αυτό το εξάρτημα θα εκραγεί σε μικρά κομμάτια και θα εκτινάσσεται μέσω της εξάτμισης. Τα άλλα μέρη εργασίας θα εξακολουθούσαν να λειτουργούν και να παρέχουν ώθηση. Ακόμη, ο εξοπλισμός της Tesla δεν έχει εγγενή σφάλματα βαλβίδας, τυπικά για τα παραδοσιακά μηχανήματα στροβίλου.

Διάφορα είδη υγρών με σωματίδια έχουν χρησιμοποιηθεί στον στρόβιλο Tesla χωρίς ζημιά. Αυτά περιλαμβάνουν μείγματα με στερεά, υγρά και αέρια, καθώς και παχύρρευστα ρευστά και μη παχύρρευστα ρευστά. Στην περίπτωση της αντλίας, παρέχεται από τον Possell μια ολοκληρωμένη λίστα ρευστών και σωματιδίων που έχουν διοχετευτεί χωρίς ζημιά. Αυτό δείχνει την ευελιξία και την ικανότητα της τουρμπίνας να χειρίζεται διάφορα υγρά. Μπορεί να χειριστεί διαβρωτικά υγρά καθώς και αέρια με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα ή υγρά με υψηλό ιξώδες.

Fluid Mixtures tested by Possell			
Abrasive solids	Marbles	Fish	Salt
Aggregates	Methane	Flour	Sawdust
Alfalfa	Molasses	Gases	Seawater
Apples	Mud	Geothermal affluent	Seaweed
Ash sump	Oil	Glass	Seeds
Avocados	Oil sludge	Grains	Shrimp
Berries	Ore	Grout	Slimes
Blood [59]	Ozone	Foam (fire fighting)	Sludge
Boiler feed water	Peas	Hot sodium phosphate	Slurries
Boiling liquids	Chip suspensions	Industrial sewage	Sulphuric acid
Cabbages	Clinker	Pellets	Toxic wastes
Carbon	Coal	Potato peeling slurry	Vegetable wastes
Cement	Corn	Raw sewage	Water
Chemicals	Ferrous Chloride	Rice	Wheat

Πίνακας 1: Λίστα υγρών που δοκιμάστηκαν από την Possell (¹¹⁹)

.119 Possell (1980).

Ο στρόβιλος λειτουργεί τόσο για νευτώνεια όσο και για μη νευτώνεια ρευστά και οι δίσκοι δεν υποφέρουν από σπηλαιώση, όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς στροβίλους με πτερύγια. Έτσι δυναμικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για γεωθερμικό ατμό ή βιομηχανικά αέρια με σωματίδια. Αυτό σημαίνει επίσης ότι η αντλία στροβίλου θα μπορούσε επίσης να αντέξει υψηλές θερμοκρασίες (¹²⁰).

5.5 Μειονεκτήματα και περιορισμοί της τουρμπίνας Τέσλα

Συχνά έχει ειπωθεί ότι η απόδοση του στροβίλου είναι χαμηλή λόγω μη αποδοτικών σχεδίων των ακροφυσίων. Ο σχεδιασμός αποδοτικών ακροφυσίων απαιτεί ξεχωριστές μελέτες και μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη συνολική απόδοση του στροβίλου. Στην πλειονότητα των εργασιών που καλύπτονται σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, οι συγγραφείς επέλεξαν να σχεδιάσουν ακροφύσια που μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν ή να αντικατασταθούν, για να βοηθήσουν στην πειραματική τους διαδικασία. Σε αριθμητικές προσομοιώσεις, τα ακροφύσια έχουν απλοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό ως είσοδος σταθερής ταχύτητας και δεν έχουν μοντελοποιηθεί για να λάβουν υπόψη τυχόν απώλειες διαστολής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, φαίνεται ότι η απόδοση του ρότορα είναι πολύ υψηλή, αλλά η απόδοση του ακροφυσίου είναι χαμηλή, κι έτσι επηρεάζεται η συνολική απόδοση του στροβίλου. Μερικοί ερευνητές, όπως ο Krishnan, πραγματοποίησαν πειράματα με διαφορετικές διαμορφώσεις ακροφυσίων και δημοσίευσαν τις σχέσεις μεταξύ των στροφών του στροβίλου με τη γωνία του ακροφυσίου και την περιοχή του ακροφυσίου, αλλά δεν κατάφεραν να δώσουν μια συνολική κατανόηση του πώς επηρεάζει την απόδοση.

Ένας σημαντικός περιορισμός σχετίζεται με τον εγγενή σχεδιασμό του στροβίλου. Έχει σημειωθεί από τους περισσότερους συγγραφείς ότι ο στρόβιλος Tesla επιτυγχάνει υψηλή απόδοση σε πολύ υψηλές στροφές ανά λεπτό. Οι λεπτότεροι δίσκοι μειώνουν επίσης την απώλεια κραδασμών όταν το υγρό εισέρχεται στον στρόβιλο και χτυπά τους δίσκους. Όμως όταν τέτοιοι λεπτοί δίσκοι υποβάλλονται σε υψηλές στροφές ανά λεπτό, έχουν την τάση σε μεγάλο βαθμό να παραμορφώνονται. Έτσι, υπάρχει πιθανή ανάγκη για την κατασκευή των δίσκων από προηγμένα υλικά. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει πρόσθετο κόστος πρώτης ύλης και μηχανικής, μειώνοντας έτσι το οικονομικό πλεονέκτημα του στροβίλου. Οι δίσκοι πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λεπτότεροι στις άκρες για να μην δημιουργούνται αναταράξεις καθώς το υγρό φεύγει από τους δίσκους. Αυτό μεταφράζεται στην ανάγκη να αυξηθεί ο αριθμός των δίσκων καθώς αυξάνεται ο ρυθμός ροής. Η μέγιστη απόδοση έρχεται σε αυτό το σύστημα όταν η απόσταση μεταξύ των δίσκων προσεγγίζει το πάχος του οριακού στρώματος και δεδομένου ότι το πάχος του οριακού στρώματος εξαρτάται από το ιξώδες και την πίεση, ο ισχυρισμός ότι ένα μόνο σχέδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για μια ποικιλία καυσίμων και ρευστών είναι ανακριβής. Ένας στρόβιλος Tesla διαφέρει από έναν συμβατικό στρόβιλο κυρίως στον μηχανισμό που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ενέργειας στον άξονα. Διάφορες αναλύσεις δείχνουν ότι ο ρυθμός ροής μεταξύ των δίσκων πρέπει να διατηρείται σχετικά χαμηλός για να διατηρηθεί η απόδοση.

Ο καθηγητής Rice συμπέρανε στο έγγραφο ανασκόπησης του 2003, ότι ο στρόβιλος θα ήταν καλύτερα κατάλληλος για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή γωνιακή ταχύτητα, χαμηλό ρυθμό ροής μάζας και χαμηλή ροπή. Οι δίσκοι του ρότορα θα πρέπει να επεκταθούν για να ικανοποιήσουν την πρόσθετη κίνηση του ρευστού λειτουργίας, εάν παρουσιαστεί ανάγκη για μεγαλύτερη ισχύ. Στην ουσία, αυτό θα οδηγήσει σε μεγαλύτερες εφαιπτομενικές ταχύτητες εισόδου λόγω της ακτινικής αύξησης των δίσκων. Ως εκ τούτου, λαμβάνει χώρα διασπορά ενέργειας στις όψεις του προφίλ και στο εξωτερικό άκρο του ρότορα. Τα συνδυασμένα αποτελέσματα αυτού θα είναι η επιβράδυνση της λειτουργίας λόγω της ορμής που παράγει η ταχύτητα.

120 Kausik (2017).

Η βέλτιστη διαμόρφωση και το σημείο λειτουργίας του στροβίλου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το ιξώδες και την πίεση εισόδου του υγρού κίνησης. Σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς στροβίλους με πτερύγια, δεν υπάρχει ενιαίο σύστημα σχεδιασμού που θα μπορούσε να ελέγχει τη διαδικασία ταξινόμησης μεγέθους.

Συμπερασματικά, ο λόγος που ο στρόβιλος Τέσλα δεν χρησιμοποιείται είναι διότι η απόδοση του δεν μπορεί να ξεπεράσει την απόδοση των συμβατικών ατμοστρόβιλων με πτερύγια που ανέρχεται στο 90%. Ξέρουμε ότι για να αποκτήσει μεγάλη απόδοση ο στρόβιλος Τέσλα, πρέπει ο ρότορας να αναπτύξει πολύ μεγάλη ταχύτητα, ίσως και 50000 RPM. Για να γίνει αυτό όμως πρέπει οι δίσκοι του στροβίλου να αποκτήσουν διάμετρο 2-3 m. Κάτι που είναι μηχανικά και πρακτικά αδύνατο, καθώς δεν μπορούν τόσο μεγάλοι δίσκοι να κινηθούν στις 50000 RPM. Για να γίνει αυτό πρέπει οι δίσκοι να έχουν αριθμό $Ma_{ch}=13$, κάτι που είναι μηχανικά αδύνατο. Είναι άξιο αναφοράς ότι τυπικοί ατμοστρόβιλοι που έχουν διάμετρο ρότορα 3 m, κυμαίνονται στις 1500 με 3000 RPM και έχουν αριθμό $Ma_{ch}=1,8$ (^{121, 122, 123}).

5.6 Η ανεμογεννήτρια περιμετρικής χοάνης και η πατέντα του Fuller με στρόβιλο Τέσλα

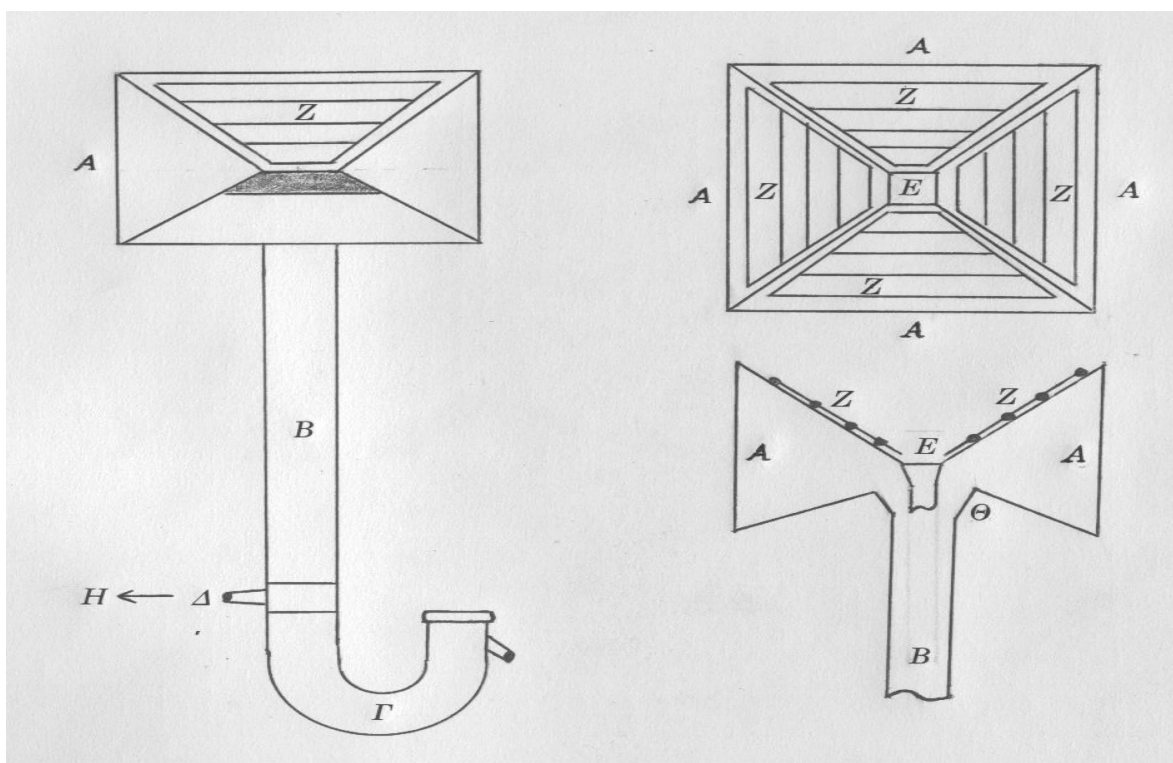
Μια ενδιαφέρουσα κατασκευή που εφαρμόζει την τεχνολογία της τουρμπίνας Τέσλα, έτσι ώστε να προκαλέσει κίνηση σε μία ηλεκτρογεννήτρια, είναι αυτή της ανεμογεννήτριας με περιμετρική χοάνη (ΠΕΧΟ). Ο τρόπος λειτουργίας της χαρακτηρίζεται από τρεις ή περισσότερες χοάνες στις οποίες εισέρχεται άνεμος και κατευθύνεται σε έναν στρόβιλο Τέσλα. Εκεί η επιφανειακή αεροδυναμική τριβή και το ιξώδες του αέρα αναγκάζει την κίνηση των δίσκων του στροβίλου. Η κίνηση αυτή μεταδίδεται μέσω άξονα σε μία κοινή ηλεκτρογεννήτρια.

Σημαντικό σχεδιαστικό χαρακτηριστικό της Α/Γ ΠΕΧΟ είναι ότι έχει τη δυνατότητα να εκμεταλλευτεί τον άνεμο σε μεγάλα ύψη και από κάθε κατεύθυνση, χωρίς να χρειάζεται η περιστροφή της, όπως γίνεται με άλλες συμβατικές ανεμογεννήτριες. Αυτό συμβαίνει διότι η εισχώρηση του ανέμου γίνεται σε τέσσερις ή περισσότερες χοάνες που κάθε μία κοιτάει σε άλλη κατεύθυνση. Όπως βλέπουμε και στην **Εικόνα 41**, οι χοάνες (Α), συγκολλημένες μεταξύ τους, κατευθύνουν τον αέρα σε κεντρικό κατακόρυφο σωλήνα (Β). Ύστερα μέσω του σωλήνα (Β), ο αέρας καταλήγει σε ένα σιφώνιο (Γ). Εκεί επιτυγχάνεται η συλλογή και η απομάκρυνση των όμβρων. Ακόμη εκεί βρίσκεται ένα ακροφύσιο (Δ) που συνδέεται με τον στρόβιλο Τέσλα (Η), παρέχοντας του την απαραίτητη ροή αέρα.

121 Zuber, Ramesh & Bansal (2019).

122 <https://www.green-mechanic.com/2021/06/advantages-and-disadvantages-of-tesla.html>

123 Shinde1 & Mishra (2017).

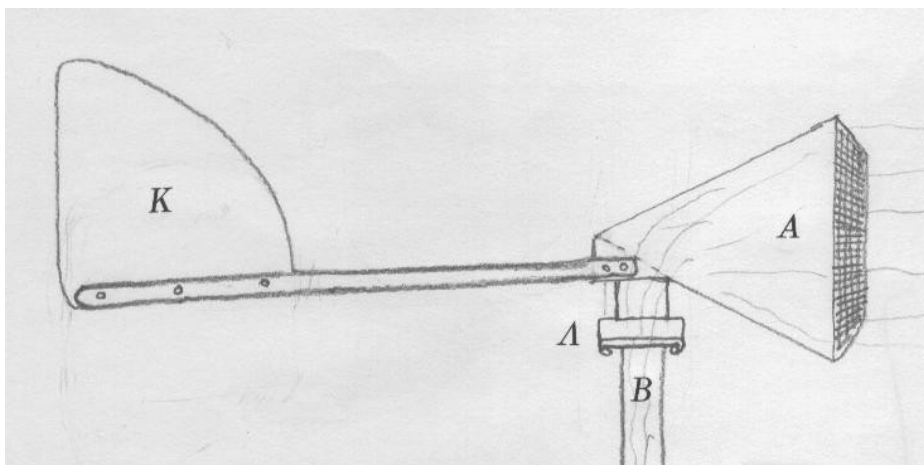


Εικόνα 41: Βασικά εξαρτήματα της Α/Γ ΠΕΧΟ ⁽¹²⁴⁾

Οι χοάνες συνηθίζουν να καλύπτονται μετωπικά από μεταλλικό δίχτυ, έτσι ώστε να προστατεύονται από φερτά υλικά (φύλλα φυτών) ή ζώα. Στην περίπτωση βροχής, το νερό τείνει να καταλήγει στο εσωτερικό της ΠΕΧΟ λόγω της κατασκευής της. Συγκεκριμένα συλλέγεται στο άνω μέρος της ΠΕΧΟ, όπου εκεί μέσω της οπής (Ε) με βοηθητικό σωλήνα καταλήγει στον κεντρικό σωλήνα (Β) και στη συνέχεια στο σιφώνιο (Γ), όπου εξέρχεται από την κατασκευή. Σε περίπτωση πολύ ισχυρών ανέμων, η κατασκευή της ΠΕΧΟ είναι προετοιμασμένη για να προστατευτεί κατάλληλα. Το άνω μέρος κάθε χοάνης διαθέτει κινητές γρίλιες (Ζ), οι οποίες είναι έτσι κατασκευασμένες με την κατάλληλη σύνδεση και βάρος, ώστε όταν ο άνεμος ξεπερνά σε ένταση το επίπεδο ασφαλείας της κατασκευής, αυτές να ανοίγουν λόγω της δημιουργούμενης πίεσης και να εκτονώνουν τον αέρα. Για να διευκολυνθεί η παροχέτευση του αέρα από τις επιμέρους χοάνες (Α), το άνω μέρος του κατακόρυφου σωλήνα (Β) έχει και αυτό σχήμα χοάνης (Θ).

Μια διαφορετική μορφή της κατασκευής βλέπουμε στην **Εικόνα 42**. Εκεί η χοάνη είναι στερεωμένη σε περιστρεφόμενη βάση (Λ). Με τη βοήθεια του πτερυγίου (Κ) μετατοπίζεται ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε να τον συλλέξει .

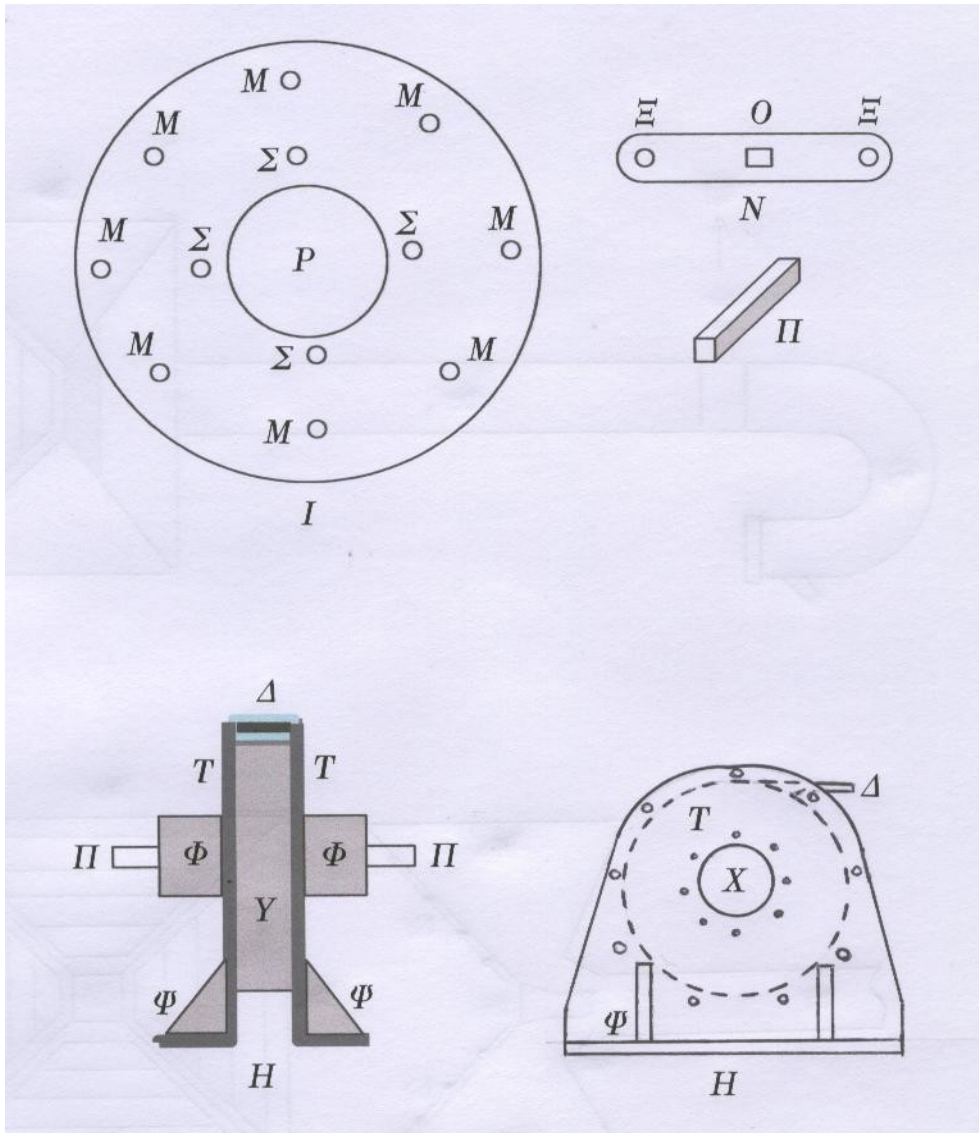
.124 Παπακίτσος (2013).



Εικόνα 42: Διαφορετική μορφή της κατασκευής της χοάνης⁽¹²⁵⁾

Ο στρόβιλος Τέσλα που βρίσκεται στο έδαφος και συνδέεται με το ακροφύσιο (Δ) σύμφωνα με την **Εικόνα 41**, είναι ένας τυπικός στρόβιλος Τέσλα με ένα απλό σχέδιο, αποτελούμενο από δίσκους, όπως εξετάσαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Όπως βλέπουμε και στην **Εικόνα 43**, ο κάθε δίσκος (I) αποτελείται από έναν δακτύλιο. Γύρω από τη μεγάλη κεντρική οπή (P) υπάρχουν τέσσερις μικρότερες εσωτερικές οπές (Σ), οι οποίες είναι ίσα κατανεμημένες γύρω από τον κύκλο (P). Στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλίου, υπάρχουν επίσης ίσα κατανεμημένες οκτώ οπές (M). Μια σειρά εξαρτημάτων που παρατηρούνται είναι τα ελάσματα (N). Τα άκρα τους είναι στρογγυλεμένα διαθέτοντας μία οπή (Ξ) ενώ στο κέντρο του ελάσματος υπάρχει μια οπή τετραγωνικού σχήματος (O). Το πάχος του ελάσματος είναι όσο το διάκενο μεταξύ των δίσκων. Η θέση αυτών των ελασμάτων στην κατασκευή είναι να ευθυγραμμίζονται οι ακραίες οπές τους (Ξ) με τις εσωτερικές οπές των δίσκων (Σ). Σε κάθε πλευρά του δίσκου τοποθετείται ένα έλασμα, με τα δύο αυτά ελάσματα να βρίσκονται κάθετα μεταξύ τους. Δηλαδή, σε κάθε διάκενο μεταξύ δίσκων υπάρχει ένα τέτοιο έλασμα. Όσον αφορά την κεντρική οπή τετραγωνικού σχήματος (O), εκεί εισέρχεται το εξάρτημα άξονα τετραγωνικής διατομής (Π) που συμβάλλει στη μετάδοση της κίνησης των δίσκων στην ηλεκτρογεννήτρια. Ανάμεσα από τα ελάσματα τοποθετούνται μικρότεροι δίσκοι ή τετραγωνικά ελάσματα έχοντας το πάχος του δίσκου, τα οποία έχουν κεντρική τετραγωνική οπή του μεγέθους των ελασμάτων (O). Επιπλέον από την οπή αυτή διέρχεται και το εξάρτημα (Π).

¹²⁵ Παπακίτσος (2013).



Εικόνα 43: Βασικά εξαρτήματα στο εσωτερικό της ΑΓ ΠΕΧΟ⁽¹²⁶⁾

Οι μικροί δίσκοι που αναφέραμε χρησιμεύουν στην αποφυγή ταλαντώσεων στο κέντρο των ελασμάτων (N). Εναλλακτικά, τα ελάσματα (N) θα μπορούσαν να έχουν αυξημένο πάχος όσο το πάχος του δίσκου (I) στο κέντρο τους, έτσι ώστε κατά την τοποθέτησή τους να μπορούν να εφάπτονται στο κέντρο τους, γύρω από τον άξονα (Π). Θα ήταν επιθυμητό η συγκόλλησή τους στο σημείο αυτό για να αποφευχθούν πιθανοί κραδασμοί που θα καταπονούν τα ελάσματα (N).

Ήλοι ή κοχλίες είναι υπεύθυνοι να συγκρατήσουν το όλο στροφέιο διερχόμενοι από τις οπές (Σ), (Μ) και (Ξ), έτσι ώστε να είναι στερεωμένοι με πρόσφορο τρόπο στους δύο εκατέρωθεν εξωτερικούς δίσκους του στροφείου. Μικρότεροι δακτύλιοι τοποθετούνται στα σημεία μεταξύ των δίσκων (I), στους ήλους που διέρχονται από τις εξωτερικές οπές (Μ) και στις οπές (Σ). Αυτό συμβαίνει προκειμένου να εμποδίσουν την περιμετρική επαφή των δίσκων (I) στην περίπτωση κραδασμών. Το πάχος αυτών των δακτυλίων είναι όσο του διακένου μεταξύ των δίσκων (I).

Το κέλυφος του στροφείου αποτελείται από δύο πλευρικές επιφάνειες (Τ), οι οποίες στερεώνονται στην περιμετρική στεφάνη (Υ) του στροφείου με έναν ενδεδειγμένο τρόπο. Ο κυλινδρικός μηχανισμός περιστροφής του άξονα με τις εξατμίσεις (Φ) τοποθετείται στο εξωτερικό των

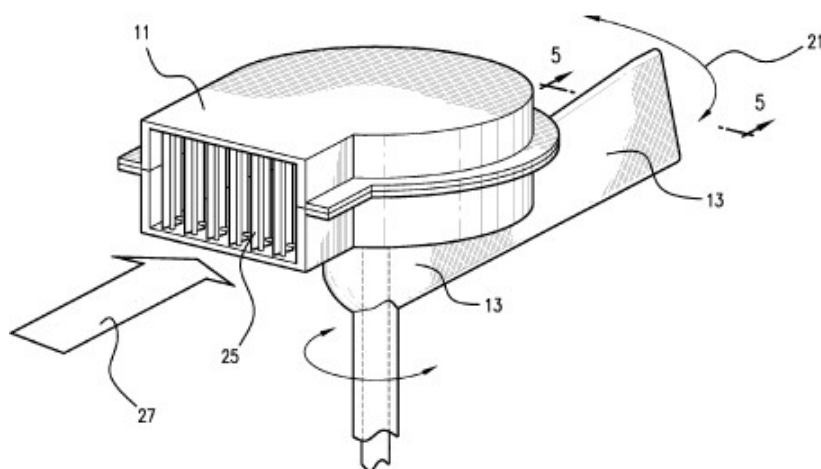
¹²⁶ Παπακίτσος (2013).

επιφανειών (T), γύρω από την κυκλική οπή (X) που διαθέτουν. Οι οπές (P) των δίσκων (I) του στροφείου ευθυγραμμίζονται με την οπή (X). Οι επιφάνειες (T) στηρίζονται με έναν κατάλληλο τρόπο σε μία σύνθετη βάση (Ψ) σε τρία τουλάχιστον σημεία από κάθε πλευρά.

Οι εξατμίσεις είναι εγχοπές που παρατηρούνται στο κάτω μέρος των κυλίνδρων (Φ). Για να μπορεί το κέλυφος (T-Y) του στροφείου να στηριχτεί σε βάση διαφορετικής γεωμετρικής κατασκευής, θα μπορούσε να είναι ένας κύλινδρος με εξωτερικούς ήλους σε αυτές τις θέσεις. Η ταχύτητα του αέρα που διοχετεύεται από το ακροφύσιο (Δ) στο στροφείο δύναται να είναι πολλαπλάσια αυτής του ανέμου. Ο στρόβιλος Tesla παρέχει πολύ καλή ισχύ για το μέγεθος του (¹²⁷).

Αρκετές ομοιότητες με την Α/Γ ΠΕΧΟ έχει και ο αεροστρόβιλος (Α/Σ) Fuller που κατασκευάζεται από την εταιρεία Solar Aero των ΗΠΑ. Ο Α/Σ Fuller έχει χαμηλό ύψος και είναι κατασκευασμένος σε ρυμουλκούμενη πλατφόρμα, ενώ πρέπει να προσανατολίζεται χειροκίνητα και διαρκώς προς την κατεύθυνση του ανέμου. Η συγκεκριμένη εφεύρεση σχετίζεται και αυτή με το πεδίο της αιολικής ενέργειας και διαθέτει έναν στρόβιλο που μετατρέπει αποτελεσματικά την αιολική ενέργεια σε μηχανική ισχύ. Ο στρόβιλος της εφεύρεσης του Fuller είναι ένας στρόβιλος Tesla, ο οποίος ορίζεται από μια στοίβα παράλληλων δίσκων. Η στοίβα είναι διατεταγμένη ώστε να δέχεται ρευστό από έναν αγωγό εισόδου και να εκκενώνει ρευστό μέσω ενός αγωγού εξόδου.

Όπως βλέπουμε και στην **Εικόνα 44**, ο στρόβιλος περιέχεται μέσα σε ένα περίβλημα που ορίζει το κανάλι εισόδου (inlet channel) (11). Το κανάλι εξόδου (outlet channel)(13) λειτουργεί έτσι ως ουρά που αεροδυναμικά και αυτόματα ευθυγραμμίζει την είσοδο στον σχετικό άνεμο. Αυτή η ευθυγράμμιση μεγιστοποιεί την απόδοση του στροβίλου. Ολόκληρος ο στρόβιλος περιστρέφεται έτσι υπό την επίδραση του ανέμου, όπως υποδεικνύεται από το βέλος (21). Σε αυτήν την εικόνα φαίνεται επίσης ένα πλήθος πτερυγίων (25), που χρησιμεύουν για τον έλεγχο της ροής αέρα μέσα στον στρόβιλο. Ο εισερχόμενος αέρας ρέει προς την κατεύθυνση που υποδεικνύεται από το βέλος (27). Η ρύθμιση των πτερυγίων (25), ελέγχει την ταχύτητα του στροβίλου, μεταβάλλοντας το πραγματικό μέγεθος του ανοίγματος εισόδου και έτσι γίνεται έλεγχος τη ροή μάζας του ρευστού μέσω του στροβίλου. Δεδομένου ότι η τάση που παράγεται από μια γεννήτρια θα σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα, η ρύθμιση των πτερυγίων ελέγχει αποτελεσματικά την τάση που παράγεται από τον στρόβιλο.



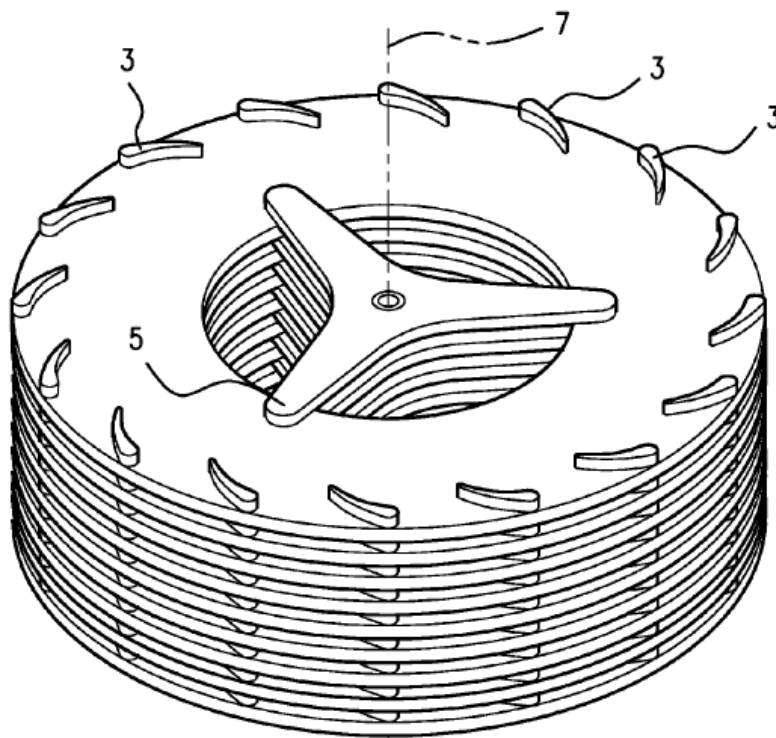
Εικόνα 44: Η προοπτική όψη της πατέντας του Fuller (¹²⁸)

127 Παπακίτσος (2013).

128 Fuller(2010).

Το βασικό συστατικό του στροβίλου της παρούσας εφεύρεσης περιλαμβάνει μια πλειάδα δίσκων σε απόσταση μεταξύ τους (Εικ.45). Οι δίσκοι συγκρατούνται σε μια διάταξη, μέσω των ακτίνων (5) αλλά και μικρών πτερυγίων (3), τοποθετημένους κατά μήκος της περιφέρειας των δίσκων. Οι ακτίνες περιλαμβάνουν κεντρικούς αποστάτες επειδή παρέχουν υποστήριξη για τη στοίβα κοντά στην πλήμνη της, κοντά στα κέντρα των δίσκων. Η κίνηση των ακτίνων, υπό την επίδραση της πίεσης από το εισερχόμενο ρευστό, προκαλεί την περιστροφή των δίσκων και την παροχή κίνησης στον άξονα. Ο άξονας (7) μπορεί να συνδεθεί με κατάλληλα μέσα όπως π.χ. ηλεκτρική γεννήτρια, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μια εκτέλεση μηχανικών εργασιών. Οι ακτίνες και τα μικρά πτερύγια εκτείνονται ολόκληρη την απόσταση από τον ένα δίσκο στον άλλο. Ο σκοπός των μικρών πτερυγίων (3) είναι να προσδώσουν ορμή προς τα μέσα στο ρευστό που εισέρχεται στον στρόβιλο έτσι ώστε να διευκολύνουν την κατεύθυνση του ρευστού προς το κέντρο των δίσκων. Μέσω της ανάπτυξης ανύψωσης, από τη ροή ρευστού κατά μήκος των μικρών πτερυγίων και μέσω της ανάπτυξης της συνακόλουθης επαγόμενης οπισθέλκουσας, το εισερχόμενο ρευστό μεταδίδει πιο αποτελεσματικά την κίνηση στους δίσκους.

Η χρήση των μικρών πτερυγίων σε σχήμα αεροτομής ελαχιστοποιεί τον στροβιλισμό ενώ διατηρεί το φαινόμενο του οριακού στρώματος στους στενά απέχοντες διπλανούς δίσκους. Το αποτέλεσμα της δομής που περιγράφεται παραπάνω είναι να μεταδίδει ενέργεια πιο αποδοτικά, από ό,τι είναι δυνατό με τους στροβίλους της προηγούμενης τεχνολογίας. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όπου οι δίσκοι περιστρέφονται υπό την επίδραση της αιολικής ενέργειας και δεν περιστρέφονται από ένα τεχνητά παραγόμενο ρεύμα αερίου όπως το ρεύμα σε έναν κινητήρα στροβίλου.⁽¹²⁹⁾



Εικόνα 45: Προοπτική όψη της στοίβας των δίσκων ⁽¹²⁹⁾

129 Fuller (2010).

5.7 Το μέλλον και οι εφαρμογές της τουρμπίνας Τέσλα

Οι πρωτογενείς πηγές ενέργειας εξαντλούνται και η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται ραγδαία με την ανάπτυξη της κοινωνίας. Κρίσιμα ζητήματα όπως η έλλειψη ενέργειας και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες έρχονται στο προσκήνιο. Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας, της ηλιακής ενέργειας, της ενέργειας από βιομάζα και της ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας κερδίζει ευρεία προσοχή. Οι παραδοσιακοί διαστολείς όπως ο στρόβιλος αξονικής ροής και ο στρόβιλος ακτινικής ροής δεν θα ήταν κατάλληλοι για εφαρμογές μικρής κλίμακας, καθώς η απώλεια ροής θα ήταν σημαντικά μεγάλη. Οι παραδοσιακοί στρόβιλοι υψηλής ταχύτητας με μικρή ροή μάζας δεν είναι πρακτικοί. Σε αυτήν την περίπτωση, ο στρόβιλος Tesla θα μπορούσε να προσφέρει μια χαμηλού κόστους και αξιόπιστη εναλλακτική λύση.

Οι ερευνητές αναζητούν πάντα νέους και βιώσιμους τρόπους διαχείρισης της ενέργειας του κόσμου. Αυτό οδηγεί στην ανάλυση νέων μηχανών που θα μπορούσαν να αντιμετωπίσουν νέες μορφές παραγωγής καθώς και ενεργειακούς μετασχηματισμούς. Ο στρόβιλος Tesla είναι ένα τέτοιο μηχάνημα που κερδίζει σιγά σιγά τα φώτα της δημοσιότητας.

Στο πλαίσιο της αυξανόμενης προσοχής προς τις ανανεώσιμες και καθαρές πηγές ενέργειας, ο στρόβιλος Tesla είναι ο δρόμος προς τα εμπρός. Αυτός ο στρόβιλος είναι πιο αποτελεσματικός για παραγωγή ενέργειας σε επίπεδο μικρής κλίμακας, σε σύγκριση με τους συμβατικούς στρόβιλους μικρής κλίμακας, οι οποίοι έχουν μεγάλες απώλειες. Οι πρόσφατες μελέτες για τον στρόβιλο έχουν επικεντρωθεί στην εφαρμογή του σε επίπεδο μικροκλίμακας, με σχέδια που έχουν διάμετρο ρότορα τόσο μικρή όσο 1 cm. Δουλεύοντας σε ανανεώσιμες πηγές, μπορεί σύντομα να λειτουργήσει ως εναλλακτική λύση για τις μπαταρίες σε τοποθεσίες όπου δεν είναι εφικτή η επαναφόρτιση ή η αντικατάστασή τους σε ελαφρώς μεγαλύτερες κλίμακες. Ο στρόβιλος Tesla έχει αναφερθεί ως τρόπος για την παραγωγή καθαρής ανανεώσιμης ενέργειας για την τροφοδοσία μικρών οικισμών με αποθέματα νερού.

Ο στρόβιλος Tesla είναι κατάλληλος για παραγωγή ενέργειας σε πολλούς τομείς. Καθώς ο σχεδιασμός του στρόβιλου είναι εύκολα κλιμακούμενος, μπορούν να κατασκευαστούν φορητές εκδόσεις του για χρήση σε ρέματα και ποτάμια. Μπορεί να ενσωματωθεί σε αυτοκίνητα, που λειτουργούν με ελεύθερη ροή αέρα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός του στρόβιλου είναι πολύ απλούστερος από τους συμβατικούς στρόβιλους, επομένως είναι πολύ πιο οικονομικοί στην κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση. Καθώς ο στρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει με μια ποικιλία ρευστών εργασίας, χωρίς να απαιτείται προηγούμενη επεξεργασία του ρευστού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια και σε ναυτικές εφαρμογές.

Η μηχανή Tesla σε μορφή αντλίας είναι αρκετά διαδεδομένη και είναι διαθέσιμη στο εμπόριο από το 1982. Χρησιμοποιείται για την άντληση υγρών που είναι λειαντικά, παχύρρευστα, ευαίσθητα στη διάτμηση, περιέχουν στερεά ή είναι δύσκολο να τα χειριστούν με άλλες αντλίες. Μια εφαρμογή για τη συσκευή θα μπορούσε να είναι μια αντλία απορριμμάτων, σε εργοστάσια όπου οι κανονικές αντλίες στρόβιλου τύπου πτερυγίου συνήθως μπλοκάρουνται (^{130, 131, 132}).

Είναι ένα πολύ ευέλικτο σχέδιο και μπορεί να χρησιμοποιήσει πλήθος υγρών ως μέσο εργασίας, αυξάνοντας σημαντικά το εύρος των εφαρμογών του. Με περισσότερη έμφαση στον σχεδιασμό του ακροφυσίου, η απόδοση του στρόβιλου μπορεί σίγουρα να ενισχυθεί. Αυτό θα απαιτήσει μια συγκεκριμένη προσέγγιση εφαρμογής, καθώς οι παράμετροι διαφέρουν ανάλογα με την επιλογή υγρού και το μέγεθος του στρόβιλου.

130 Zuber, Ramesh & Bansal (2019).

131 Kausik (2017).

132 Holland (2016).

Βιβλιογραφία - Ιστογραφία

- Lemma E., Deam R. T., Toncich D. & Collins R. (2008), “Characterisation of a small viscous flow turbine”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 33, no. 1 : 96–105.
- Hoya G. P. & Guha A. (2009), “The design of a test rig and study of the performance and efficiency of a tesla disc turbine.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 223, no. 4: 451– 465.
- Romanin V., Krishnan V, Van P. Carey & Maharbiz M. (2013), “Experimental and Analytical study of sub-watt scale Tesla turbine performance”, In ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 1005-1014. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Zuber M., Ramesh A. & Bansal D. (2019), “The Tesla turbine- A comprehensive review”, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 62.
- Rice W. (1991), “Tesla Turbomachinery”. In *Conference Proceedings of the IV International Tesla Symposium*.
- Choon Tan Wee, A. A. Rahman, Foo Shy Jer & Lim Eng Aik (2011), “Optimization of Tesla turbine using computational fluid dynamics approach”. In *2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, pp. 477-480. IEEE, 2011.
- Holland K. (2016), “Design, construction and testing of a Tesla turbine”. PhD diss., Laurentian University of Sudbury.
- Clarence R. Possell. “Geothermal turbine and method of using the same”. US 05/953,650. Nov 11, 1980.

- Kausik G.H. (2017), “DESIGN ANALYSIS OF TESLA TURBINE‘’. A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering.
- Green Mechanic, “Advantages and Disadvantages of Tesla Turbine”. Διαθέσιμο στο: <https://www.green-mechanic.com/2021/06/advantages-and-disadvantages-of-tesla.html> , Ανακτήθηκε 10/12/2021.
- Shinde S. & Mishra H. (2017), “INTRODUCTION OF LOW PRESSURE ENERGY RECOVERY TESLA TURBINE AND ITS PUMP”, IJARIIIE, Vol-3 Issue-4 2017.
- Παπακίτσος Ε.Χ. (2013), “Ανεμογεννήτρια περιμετρικής χοάνης με στρόβιλο Tesla”. Αποδοτικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Αθήνα: Μ.-Χ.Χ. Χριστοδουλάτου.
- Fuller H. J., “Wind Turbine for Generation of Electric Power," U.S. Patent 7695242, 13 Apr 10.

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

- Armstrong J. H. (1952). “An investigation of the performance of a modified Tesla turbine”. PhD diss., Georgia Institute of Technology.
- Bloudíček P. & Paloušek D. (2007), “Design of Tesla Turbine”. In *Konference Diplomových Prací* p. 1-6.
- Borate H. & Misal N. (2013) "An effect of spacing and surface finish on the performance of bladeless turbine". In *ASME 2012 Gas Turbine India Conference*, pp. 165-171. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Cairns WM.J. (2001), “The Tesla Disc Turbine” Camden Miniature Steam Services
- Choon Tan Wee, A. A. Rahman, Foo Shy Jer & Lim Eng Aik (2011). “Optimization of Tesla turbine using computational fluid dynamics approach”. In *2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, pp. 477-480. IEEE, 2011.
- Clarence R. Possell. “Geothermal turbine and method of using the same”. US 05/953,650. Nov 11, 1980.
- Couto H. S., Duarte J. B. F & Bastos-Netto D. (2006). “The tesla turbine revisited”. In *Proceedings of the Eighth Asia- Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*.
- Deam R. T., Lemma E., Mace B.& Collins R. (2008). “On scaling down turbines to millimeter size”. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 130, no. 5: 052301.
- el.sodiummedia, “Turbine - μια απλή και όμορφη λύση σε ένα τεχνικό πρόβλημα” Διαθέσιμο στο: <https://el.sodiummedia.com/4210434-tesla-turbine-a-simple-and-beautiful-solution-to-a-technical-problem> , Ανακτήθηκε 5/4/2021
- Foo S. J., Tan W. C. & Shahril M (2010) "Development of tesla turbine for green energy application". In *Proceeding of National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Studies (2nd NCMER 2010)*, pp. 671- 680.
- Fuller H. J., “Wind Turbine for Generation of Electric Power,” U.S. Patent 7695242, 13 Apr 10.
- Green Mechanic, “Advantages and Disadvantages of Tesla Turbine”. Διαθέσιμο στο:<https://www.green-mechanic.com/2021/06/advantages-and-disadvantages-of-tesla.html> , Ανακτήθηκε 10/12/2021.

- Guha A., και Smiley B. (2010). “Experiment and analysis for an improved design of the inlet and nozzle in Tesla disc turbines.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 224, no. 2: 261-277.
- Holland K. (2016), “Design, construction and testing of a Tesla turbine”. PhD diss., Laurentian University of Sudbury.
- Hoya G. P., & Guha A. (2009). “The design of a test rig and study of the performance and efficiency of a tesla disc turbine.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 223, no. 4: 451– 465.
- Kausik G.H. (2017), “DESIGN ANALYSIS OF TESLA TURBINE‘’. A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering.
- Krishnan V. G. (2015), “Design and Fabrication of cm-scale Tesla Turbines”. PhD diss., UC Berkeley.
- Krishnan V. G., Iqbal Z.& Maharbiz M. (2011) "A micro tesla turbine for power generation from low pressure heads and evaporation driven flows". In *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, pp. 1851-1854. IEEE, 2011.
- Krishnan V., Romanin V., Van P. Carey & Maharbiz M. (2013), “Design and scaling of microscale Tesla turbines”. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 23, no. 12.
- Lampart P. & Jędrzejewski L. (2011), “Investigations of aerodynamics of Tesla bladeless microturbines.” *Journal of Theoretical And Applied Mechanics* 49, no. 2: 477–499.
- Lampart P., Kosowski K., Piwowarski M., and Jędrzejewski L. (2009). “Design analysis of Tesla micro-turbine operating on a low-boiling medium." *Polish Maritime Research* 16, no. Special: 28-33.
- Lawn M. J., και Rice W. (1974), “Calculated design data for the multiple-disk turbine using incompressible fluid”, *Journal of Fluids Engineering* 96, no. 3: 252-258.
- Lemma E., Deam R. T., Toncich D. & Collins R. (2008), “Characterisation of a small viscous flow turbine”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 33, no. 1: 96–105.
- Li R., Wang H., Yao E., Li M.& Nan W. (2017). “Experimental study on bladeless turbine using incompressible working medium”. *Advances in Mechanical Engineering* 9, no. 1: 1–12.
- Mark C. Breiter, & Karl Pohlhausen (1962) "Laminar flow between two parallel rotating disks". Wright-Patterson Air Force Base.
- Peirs J., Reynaerts D. & Verplaetsen F. (2004), "A microturbine for electric power generation". *Sensors and Actuators A: Physical* 113, no. 1: 86-93.

- Peshlakai A. (2012), “Challenging the Versatility of the Tesla Turbine: Working Fluid Variations and Turbine Performance”. Arizona State University
- Rice W. (1991), “Tesla Turbomachinery.” In Conference Proceedings of the IV International Tesla Symposium.
- Romanin V., Krishnan V, Van P. Carey & Maharbiz M. (2013). “Experimental and Analytical study of sub-watt scale Tesla turbine performance”. In *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 1005-1014. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Schosser C. (2016), “Experimental and numerical investigations and optimisation of Tesla-radial turbines”. Universität der Bundeswehr München Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik Institut für Thermodynamik.
- Schosser C., Lecheler S. & Pfitzner M. (2017). “Analytical and Numerical Solutions of the Rotor Flow in Tesla Turbines”. Άρθρο στο *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*.
- Shinde S. & Mishra H. (2017), “INTRODUCTION OF LOW PRESSURE ENERGY RECOVERY TESLA TURBINE AND ITS PUMP”, *IJARIE*, Vol-3 Issue-4 2017.
- Tani I. (1977), “HISTORY OF BOUNDARY LAYER THEORY”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 9, pp. 87-111.
- Wikipedia, “Computational fluid dynamics”. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics , Ανακτήθηκε 10/5/2021
- Zuber M., Ramesh A. & Bansal D. (2019) , “The Tesla turbine- A comprehensive review”, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 62.
- Αργυρίου Α. (2005), «Μηχανική των Ρευστών: Πανεπιστημιακές Παραδόσεις». Πανεπιστήμιο Πατρών:Τμήμα Φυσικής.
- Γελεγένης Ι.Ι. & Αξάοπουλος Π.Ι. (2005). *Πηγές Ενέργειας: Συμβατικές και Ανανεώσιμες*. Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική.
- Δ.Μ(2018), “Νικόλα Τέσλα: το αρχέτυπο όλων των επιστημόνων του 20ου αιώνα”. Διαθέσιμο στο: <http://physics4u.gr/blog/2018/07/10/%CE%BD%CE%AF%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%B1-%CF%84%CE%AD%CF%83%CE%BB%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%B1%CF%81%CF%87%CE%AD%CF%84%CF%85%CF%80%CE%BF-%CF%8C%CE%BB%CF%89%CE%BD-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83/> Ανακτήθηκε 10/4/2021
- Ιέκ Τρίπολης, «Σημειώσεις:Αριθμός Reynolds». Διαθέσιμο στο: <http://iek-tripol.ark.sch.gr/autosch/joomla15/images/simeioseis/Reynolds.pdf> , Ανακτήθηκε 1/5/2021

- KISHO (2019), ‘‘Αρχή του στροβίλου Tesla’’ Διαθέσιμο στο: <http://gr.kisho-nano-coating.com/info/tesla-turbine-principle-37478647.html> , Ανακτήθηκε 5/4/2021
- Καλδέλλης Ι.Κ. (2005). Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας (2^η Έκδοση). Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη.
- Κορμανιώτης Ε. (2006), «Έλεγχος του Οριακού Στρώματος Η Μέθοδος Απορρόφησης - Έγχυσης ». Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μαθηματικών, Τομέας Εφαρμοσμένης Ανάλυσης
- «Νικόλα Τέσλα», Βικιπαίδεια. Διαθέσιμο στο: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%AF%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%B1_%CE%A4%CE%AD%CF%83%CE%BB%CE%B1, Ανακτήθηκε 5/4/2021
- Ξένος Μ. & Τζιρτζιλάκης Ε.(2018), «Μηχανική Ρευστών με εφαρμογές». Εκδόσεις Gotsis, Πάτρα
- Παναγούλα Β.(2014), «Λύσεις Ομοιότητας σε Προβλήματα Μηχανικής των Ρευστών» . Τμήμα Μαθηματικών Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Παπαϊωάννου Α. (2013), «ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ, Σημειώσεις». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Παπακίτσος Ε.Χ. (1990). Θέματα Διδασκαλίας Μαθηματικών – Χημείας – Φυσικής με Εφαρμογές. Αθήνα: Μ.-Χ.Χ. Χριστοδουλάτου.
- Παπακίτσος Ε.Χ. (2013), “Ανεμογεννήτρια περιμετρικής χοάνης με στρόβιλο Tesla”. Αποδοτικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Αθήνα: Μ.-Χ.Χ. Χριστοδουλάτου.
- Σιδερίδης Γ.Α. (2015), «Εργαστηριακές Ασκήσεις Ρευστομηχανικής». Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/4183>, Ανακτήθηκε 6/5/2021
- Σταυρόπουλος Δ.(2012), «ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΟΠΟΥ ΕΚΜΕΤΑΛΕΥΣΗΣ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΡΜΠΙΝΑΣ TESLA» , Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά.
- Φλυτζάνης Ν. (2015), «Εισαγωγή στη Μηχανική των Ρευστών». Διαθέσιμο στο: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5345/2/00_master_document-KOY.pdf , Ανακτήθηκε 5/5/2021