



**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Διερεύνηση χαρακτηριστικών λειτουργίας και παραμετρική
μελέτη διάταξης δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Νικόλαου – Άρη Αναγνώστου**

**Επίβλεψη:
Λέκτορας Ν. Αρετάκης**

**ΑΘΗΝΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους που συνέβαλλαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον λέκτορα Ν. Αρετάκη που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το θέμα αυτό καθώς και για την επίβλεψη, καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια που παρείχε σε όλη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Κατόπιν τον καθηγητή Δρα. Κ. Μαθιουδάκη που με ενέπνευσε και έστρεψε το ενδιαφέρον μου στο συγκεκριμένο αντικείμενο μέσω της διδασκαλικής του δραστηριότητας. Επίσης τον φίλο και συνάδελφο Χ. Αμπάτη τόσο για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εργασίας αυτής όσο και για την δυνατότητα που μου παρείχε μαζί με τον φίλο και συνάδελφο Γ. Κατσίκη για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής η οποία αποτελεί συνέχεια των δικών τους διπλωματικών εργασιών. Τον φίλο και συνάδελφο Χ. Καλαθάκη για την βοήθεια που παρείχε επί καθημερινής βάσεως. Τον φίλο και τεχνίτη του εργαστηρίου Σ. Μαυράκη για τη πολλαπλή συμβολή του σε όλα τα τεχνικά ζητήματα που προέκυψαν και την προσωπική εργασία που παρείχε στη διάταξη. Το Εργαστήριο Θερμικών Στοβιλομηχανών για τις δυνατότητες και τις γνώσεις που μου παρείχε τόσο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας όσο και κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του εργαστηρίου για το ενδιαφέρον τους και το ευχάριστο και εποικοδομητικό περιβάλλον.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη και τις διευκολύνσεις που μου παρείχε τόσο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας όσο και των προπτυχιακών σπουδών. Επίσης να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συναδέλφους για τη στήριξη την κατανόηση που επέδειξαν.

Άρης Αναγνώστου

Οκτώβριος 2011

«Διερεύνηση χαρακτηριστικών λειτουργίας και παραμετρική μελέτη διάταξης δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών» Άρης Αναγνώστου

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί συνέχεια και συμπλήρωση άλλων διπλωματικών εργασιών. Προηγήθηκαν οι διπλωματικές εργασίες των φίλων και συναδέλφων Χ. Αμπάτη και Γ. Κατσίκη οι οποίες περιλαμβάνουν την σχεδίαση και κατασκευή της εγκατάστασης δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών, την εγκατάσταση της μετρητικής αλυσίδας, την σχεδίαση και κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών, τη θέση της διάταξης σε λειτουργία και τη διενέργεια παραμετρικής μελέτης της βαθμίδας συναρτήσεως των γωνιών κλίσεως των πτερυγίων και του λόγου στροφών των δύο πτερωτών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον υπολογισμό του σφάλματος των μετρήσεων, τη διερεύνηση κάποιων χαρακτηριστικών λειτουργίας της βαθμίδας, την ολοκλήρωση της παραμετρικής μελέτης με τη διερεύνηση της επίδρασης της αξονικής απόστασης των δυο πτερωτών στις επιδόσεις της βαθμίδας και την σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα δεδομένα που παράγει για το φαινόμενο ο υπολογιστικός κώδικας BLADE του εργαστηρίου.

Ο υπολογισμός του σφάλματος των μετρήσεων επετεύχθη μέσω της κατάρτισης κώδικα Fortran και κατέδειξε τη μεγάλη ακρίβεια της μετρητικής αλυσίδας. Οι προκαταρκτικές μετρήσεις διερεύνησης και βελτίωσης χαρακτηριστικών λειτουργίας αφορούν:

1. την επαναληψιμότητα των μετρήσεων, την ικανότητα δηλαδή της εγκατάστασης να αναπαράγει συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών ήταν άκρως ικανοποιητικά και κατέδειξαν την υγιή λειτουργία τόσο της διάταξης όσο και της μετρητικής αλυσίδας.
2. την επίδραση του αριθμού των ακτινικών θέσεων μέτρησης ανά σάρωση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Απεδείχθη ότι η μετάβαση σε σύστημα μετρήσεων 12 σημείων έναντι 26 δεν επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και εξοικονομήθηκε σημαντικός χρόνος από τη διαδικασία των μετρήσεων της παραμετρικής μελέτης.
3. την διερεύνηση της ανωμαλίας της ροής στο hub του πτερυγίου του πρώτου ρότορα και την προσπάθεια εξάλειψής της. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι

το πρόβλημα δεν έγκειται στις οπές του δίσκου φορέα αλλά στη γεωμετρία του πτερυγίου.

4. την διερεύνηση της περιφερειακής ανομοιομορφίας του καναλιού ροής. Μεταφέρθηκε ο σωλήνας πίεσης που βρίσκεται ανάμεσα στις δυο πτερωτές (θέση 2) σε συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα σημείο του καναλιού ροής. Οι μετρήσεις έδειξαν ύπαρξη ελαφράς ανομοιομορφίας της ροής κυρίως στις περιφερειακές θέσεις και βελτιωμένα αποτελέσματα στη νέα θέση. Για τις υπόλοιπες μετρήσεις ο σωλήνας πίεσης της παρέμεινε στο νέο σημείο.
5. την μέτρηση της καταναλισκόμενης ισχύος για τον προσδιορισμό του βαθμού απόδοσης των πτερωτών. Μη σταθερή κατανάλωση ισχύος του κινητήρα σε λειτουργία απόντων των πτερωτών επιφέρει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό των απωλειών και κατ' επέκταση στον βαθμό απόδοσης. Ωστόσο η χρήση της μεθόδου αυτής υπέδειξε τα επίπεδα στα οποία κυμαίνεται ο βαθμός απόδοσης κάποιων προβληματικών μετρήσεων. Τα δεδομένα του πρώτου ρότορα από την παραμετρική μελέτη έχουν αρχειοθετηθεί για περαιτέρω χρήση.

Η παραμετρική μελέτη που ακολούθησε αποτελείται από μετρήσεις 8 διαφορετικών set στροφών, 5 για λόγο στροφών $R_u=1$ και 3 για λόγο στροφών $R_u=1.5$. Διερευνήθηκαν 3 αξονικές αποστάσεις των πτερωτών, μίας μιάμισης και δύο χορδών. Όλες οι μετρήσεις έγιναν για σταθερές γωνίες κλίσεις των πτερυγίων, 30 μοίρες στα πτερύγια του πρώτου ρότορα και 43 στα πτερύγια του δεύτερου. Αρχικώς επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα προηγούμενων εργασιών καθώς παρατηρήθηκε μετατόπιση των χαρακτηριστικών σε μεγαλύτερες παροχές και ελαφρώς αυξημένους λόγους πίεσης με την αύξηση του λόγου στροφών (ταχύτερη περιστροφή της δεύτερης πτερωτής) και η τάση εξάρτησης της χαρακτηριστικής του δεύτερου ρότορα από το λόγο στροφών σε αντίθεση με αυτή του πρώτου. Στις μετρήσεις χαμηλών στροφών δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφορά στις χαρακτηριστικές με αλλαγή του αξονικού διακένου σε κανέναν από του δύο ρότορες. Σε κάποιες μετρήσεις υψηλών στροφών παρουσιάστηκαν βελτιώσεις άλλοτε στον πρώτο και άλλοτε στον δεύτερο ρότορα με μετακίνηση της χαρακτηριστικής σε μεγαλύτερους λόγους πίεσης. Σε ένα μεγαλύτερο εύρος μετρήσεων υψηλών στροφών, μειούμενου του αξονικού διάκενου, διαπιστώσαμε την τάση αύξησης του εύρους λειτουργίας της δεύτερης πτερωτής με μετατόπιση του σημείου αποκόλλησης Φ_{stall} σε μικρότερους συντελεστές παροχής.

Ως αναφορά στην σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα του κώδικα BLADE, καταρτίστηκαν σχέσεις προσαρμογής των αποτελεσμάτων του δεύτερου ρότορα όπου παρουσιάζονταν απόκλιση καθώς επίσης και σχέσεις παραγωγής χαρτών λειτουργίας της δεύτερης πτερωτής για διάφορους λόγους στροφών χρησιμοποιώντας μόνο τα δεδομένα για λόγο στροφών ίσο με μονάδα.

“Investigation of operation characteristics and parametric study of contra rotating blade row test rig”

Aris Anagnostou

Abstract

This diploma thesis continues and completes the previous diploma theses. The two previously concluded theses from G. Katsikis and C. Abatis included the design and construction of the contra rotating compressor test rig, the installation of the measuring equipment, the design and construction of additional components, the initiation of operation of the test rig and a preliminary parametric study, whose parameters were the stagger angles and the speed ratio of the rotors.

This diploma thesis contains the calculation of error included in the measurements, the investigation of specific operational characteristics of the test rig and the final stage of the parametric study whose objective is to determine the effect of the axial distance of the two rotors to the operational qualities of the contra rotating stage.

The calculation of error included in the measurements was achieved through the development of a FORTRAN code. The results proved that the test rig and the measuring equipment operate with exquisite precision. The preliminary measurements included the following operational characteristics investigations:

1. the repeatability of the measurements which translates as capability of the test rig to reproduce desired operation conditions. The results were well within the healthy operation margin deeming the operation of the rig, as well as of the measuring equipment, trustworthy.
2. the effect of the number of the radial measuring points per scan of the flow channel. The results proved that transition from the previously used 26-measurments-per-scan practice to a 12-measurments-per-scan system does not affect the accuracy of the results and does not add error to the integrated values. This transition allowed for great time saving during the parametric study.
3. the investigation of the reasons for the disturbed flow near the hub of the first rotor's blades and the attempt to diminish it. Results concluded that the cause of the disturbance of the flow is not the exposed cavities on the surface of the disk on which the blades are mounted, and the problem is rather caused by the geometry of the blade.
4. the investigation of peripherally uneven flow. The probe carriage between the two rotors was moved to a symmetrical to the vertical axis location. The

measurements at the new location suggest the presence of a mild differentiation of the flow at the peripheral points near the shroud with the new position delivering slightly better results. The probe remained at the new position for the rest of the measurements.

5. The measurement of the power consumption in order to calculate the efficiency of the rotors. Unstable power consumption in operation without the two rotors mounted on the axes, resulted in significant error at the calculation of the power losses. This error would be further transferred with the calculation of the efficiency. Nonetheless, this method of calculating the efficiency proved useful in problematic measurements, by calculating the margin within which the efficiency would be. The data of the power consumption measurements have been filed for further use.

The parametric study consists of measurements at 8 speed sets, 5 at a speed ratio of $R_u=1$ and 3 at speed ratio of $R_u=1.5$. For each speed set, the measurement was done at three different axial distance values: one, one and a half & two blade chord lengths. During the parametric study the stagger angles of the blades were constantly set to 30 degrees for the first rotor and 43 for the second rotor. The first observations made confirmed the results of previous parametric studies which claimed a shift of the characteristic curves towards bigger mass flow and pressure ratio values when the rotors speed increased. Also for the vast majority of the measurements, the characteristic curve of 1st rotor remains inalterable; independent of 2nd rotors' RPM. In contrast, the characteristic curve of 2nd rotor depends mainly on rotors RPM ratio. When operating in low rotation speeds the characteristic curves of the two rotors did not present any alteration to the changes in the axial distance of the rotors. In some high speed measurements though, we observed increased performance either of the first or of the second rotor and shift of the characteristic curve to higher pressure ratios. In a number of high speed measurements we observed a trend for wider operation margin of the second rotor when the rotors axial distance was decreased.

As far as the comparison of experimental data with the code-generated data is concerned, a set of adjusting equations was compiled to eliminate the deviation of the data of the second rotor. Another set of equations was compiled in order to create maps of the second rotor at various speed ratios using the only the map at speed ratio equal to one.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1.1
1.1	Εισαγωγή στις C-R διατάξεις.....	1.1
1.2	Ανασκόπηση της προηγούμενης εργασίας πάνω στην παρούσα διάταξη....	1.2
1.2.1	Ανασκόπηση προηγούμενων διπλωματικών εργασιών στη διάταξη.	1.2
1.2.2	Ανασκόπηση προηγούμενης παραμετρικής μελέτης της βαθμίδας.....	1.5
1.3	Σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση προηγούμενης έρευνας	1.5
1.4	Η Παρούσα εργασία- Σκοπός-Δομή.....	1.7
2	Υπολογισμός σφαλμάτων μετρήσεων	2.1
2.1	Περιγραφή σφαλμάτων.....	2.1
2.2	Μεθοδολογία υπολογισμού των σφαλμάτων	2.3
2.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	2.6
3	Προκαταρκτικές μετρήσεις.....	3.1
3.1	Διερεύνηση επαναληψιμότητας & σύγκριση με περιθώριο σφάλματος.....	3.1
3.2	Επίδραση του πλήθους των ακτινικών μετρήσεων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων	3.6
3.3	Διερεύνηση της λειτουργίας του πτερυγίου 1ου ρότορα	3.7
3.3.1	Ανάλυση δεδομένων ροής.....	3.8
3.3.2	Διαμόρφωση οπών στον δίσκο-φορέα των πτερυγίων του πρώτου ρότορα.....	3.11
3.4	Διερεύνηση περιφερειακής ανομοιομορφίας στο κανάλι ροής.....	3.13
3.5	Μέτρηση καταναλισκόμενης ισχύος.....	3.18
4	Διερεύνηση επίδρασης της αξονικής απόστασης πτερωτών στη λειτουργία της βαθμίδας C-R συμπιεστή	4.1
4.1	Διαδικασία διεξαγωγής μετρήσεων	4.2
4.1.1	Μετρήσεις.....	4.2
4.1.2	Περιγραφή χρήσης αποστατών	4.2

4.1.3	Αρχειοθέτηση-οδηγίες.....	4.5
4.2	Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων Πc-q.....	4.5
4.2.1	Χαρακτηριστικές καμπύλες πρώτου ρότορα	4.6
4.2.2	Χαρακτηριστικές καμπύλες δεύτερου ρότορα.....	4.11
4.3	Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων Φ-Ψ	4.14
4.4	Σύγκριση γωνιών ροής.....	4.19
4.4.1	Γωνία παρέκκλισης πρώτης πτερωτής	4.20
4.4.2	Γωνία παρέκκλισης δεύτερης πτερωτής.....	4.23
4.4.3	Γωνία πρόσπτωσης πρώτης πτερωτής	4.26
4.4.4	Γωνία πρόσπτωσης δεύτερης πτερωτής.....	4.27
4.5	Σύγκριση βαθμού απόδοσης.....	4.29
4.5.1	Βαθμός απόδοσης πρώτου ρότορα.....	4.29
4.5.2	Βαθμός απόδοσης δεύτερου ρότορα	4.32
4.6	Συμπεράσματα από την παραμετρική μελέτη	4.33
5	Σύγκριση αποτελεσμάτων με κώδικα BLADE	5.1
5.1	Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και αποτελεσμάτων κώδικα	5.1
5.2	Διόρθωση αποτελεσμάτων κώδικα.....	5.5
5.3	Παραγωγή χάρτη δεύτερης πτερωτής με χρήση του κώδικα BLADE.....	5.9
6	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις	6.1
6.1	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα.	6.1
6.2	Προτάσεις	6.3
7	Βιβλιογραφία.....	7.1

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής θα γίνει μια συνοπτική αναφορά στις διατάξεις αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών και τη λειτουργία τους και μια συνοπτική ανασκόπηση των προηγούμενων διπλωματικών εργασιών που εκπονήθηκαν στην πειραματική διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών. Τέλος θα παρουσιαστεί ο σκοπός και η δομή της παρούσας εργασίας.

1.1 Εισαγωγή στις C-R διατάξεις.

Στις αξονικές στροβιλομηχανές οι έως τώρα εφαρμογές που αφορούν σε επίγειους ή αεροπορικούς αεριοστρόβιλους, αποτελούνται από διαδοχικές πτερυγώσεις κινητών (ρότορας) και σταθερών (στάτορας) πτερυγίων (Rotor-Stator), για τον συμπίεστή αλλά και για τον στρόβιλο. Με τον όρο αντίρροπα στρεφόμενες πτερωτές (Contra Rotating ή C-R), αναφερόμαστε σε κλειστές (ducted) διατάξεις αξονικών στροβιλομηχανών με διαδοχικές πτερυγώσεις ρότορα-ρότορα που έχουν αντίθετες φορές περιστροφής.

Τα οφέλη χρήσης μιας βαθμίδας ρότορα-ρότορα (R-R) έναντι της τυπικής ρότορα-στάτορα (R-S) σε έναν αξονικό συμπίεστή εντοπίζονται στα εξής σημεία: Η αλληλουχία R-R αυξάνει την παραγόμενη αύξηση πίεσης ανά μονάδα μήκους του συμπίεστή για σταθερή μετωπική επιφάνεια. Ο λόγος είναι ότι ο στάτορας αποτελεί ένα άεργο τμήμα της μηχανής το οποίο αφαιρεί τη συστροφή της ροής που δημιουργεί ο ρότορας, επιβραδύνοντας έτσι τη ροή και άρα ανακτώντας τη στατική πίεση στην έξοδο της βαθμίδας. Εάν αντί για στάτορα έχουμε ένα 2ο ρότορα με αντίθετη φορά περιστροφής από τον 1ο, τότε ο 2ος αφαιρεί τη συστροφή του πρώτου προσδίδοντας παράλληλα επιπλέον ενέργεια στο ρευστό.

Εφ' όσον η αύξηση της συμπίεσης σε μια βαθμίδα R-R είναι μεγαλύτερη από ότι σε μια βαθμίδα R-S, τότε για δεδομένη μετωπική επιφάνεια, η βαθμίδα R-R μπορεί να παράγει την ίδια συμπίεση σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής. Αυτό οδηγεί σε μειωμένη περιφερειακή ταχύτητα των ακροπτερυγίων και άρα σε μειωμένες ηχητικές εκπομπές, ενώ παράλληλα μειώνεται και ο σχετικός αριθμός Mach στο ακροπτερύγιο με αποτέλεσμα να αυξάνεται το περιθώριο έναντι εμφάνισης κρουστικών κυμάτων τα οποία προκαλούν έντονες απώλειες στη ροή.

Μια μηχανή C-R λόγω των αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών, προκαλεί εξισορρόπηση των ροπών σε όλη τη μηχανή προκαλώντας έτσι μειωμένη ροπή αντίδρασης του κελύφους της μηχανής. Έτσι, μειώνεται η φόρτιση της στήριξης

της μηχανής που είναι σημαντικός παράγοντας ειδικά στους αεροπορικούς αεριοστρόβιλους, ενώ παράλληλα μειώνονται και τα γυροσκοπικά φαινόμενα στις αλλαγές κατεύθυνσης κατά την πτήση του αεροσκάφους.

Τα μειονεκτήματα μιας διάταξης C-R εντοπίζονται στα εξής 2 σημεία :

- Αυξημένη κατασκευαστική πολυπλοκότητα, καθώς 1ον) απαιτεί περιστρεφόμενο εξωτερικό κέλυφος σε περίπτωση πολλαπλών βαθμίδων C-R, και 2ον) Η εφαρμογή C-R ανεμιστήρων (Fan) σε αεροπορικό αεριοστρόβιλο διπλού ρεύματος (turbofan), απαιτεί τη χρήση πολλαπλών τυμπάνων (multi spool) και πιθανόν τη χρήση επιπλέον μειωτήρα, δυσκολεύοντας έτσι το σχεδιασμό του κινητήρα λόγω του περιορισμένου χώρου και της απαίτησης μειωμένου βάρους σε τέτοιες μηχανές.
- Αυξημένη αεροδυναμική ευαισθησία, καθώς στη βαθμίδα R-R ο 2ος ρότορας "βλέπει" της γωνίες εξόδου ροής του 1ου ρότορα, οι οποίες μεταβάλλονται συναρτήσει των στροφών των πτερωτών και της παροχής. Το πρόβλημα εντείνεται με τη χρήση πολλαπλών βαθμίδων R-R. Αναλογιζόμενοι λοιπόν τα οφέλη και τα μειονεκτήματα μιας διάταξης C-R, το περισσότερο ενδιαφέρον σήμερα εστιάζεται στην έρευνα για μελλοντική εφαρμογή C-R ανεμιστήρων (Fans) σε αεροπορικούς αεριοστρόβιλους διπλού ρεύματος (turbofan) που είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι στην πολιτική αεροπορία. Το όφελος της εφαρμογής αυτή είναι η μείωση των εκπομπών θορύβου που παράγει ο ανεμιστήρας, λόγω των χαμηλότερων ταχυτήτων περιστροφής για δεδομένη παροχή. Επιπρόσθετα, με αύξηση της διαμέτρου του ανεμιστήρα και μείωση στροφών, μπορούν να επιτευχθούν αποδεκτές σχετικές ταχύτητες στο ακροπερύγιο, ενώ παράλληλα μπορεί να αυξηθεί ο λόγος παράκαμψης με αποτέλεσμα την μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

1.2 Ανασκόπηση της προηγούμενης εργασίας πάνω στην παρούσα διάταξη.

1.2.1 Ανασκόπηση προηγούμενων διπλωματικών εργασιών στη διάταξη.

Από την εισαγωγή που προηγήθηκε, διακρίνεται το ενδιαφέρον στη έρευνα που αφορά σε κλειστές (Ducted) διατάξεις αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών. Παράλληλα, η περιορισμένη ερευνητική δραστηριότητα έως σήμερα όσον αφορά στις πειραματικές και υπολογιστικές μετρήσεις σε τέτοιες διατάξεις – τουλάχιστον στην ανοιχτή βιβλιογραφία – έκρινε σκόπιμο το σχεδιασμό και τη κατασκευή μιας διάταξης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών από το εργαστήριο θερμικών στροβιλομηχανών (Ε.Θ.Σ.) του Ε.Μ.Π.. Το έργο αυτό επετεύχθη μέσω

της διπλωματικής εργασίας του Γ.Κατσίκη^[2]. Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας έγινε μια εκτενής ιστορική αναδρομή και βιβλιογραφική επισκόπηση επάνω σε πειραματικές διατάξεις αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών, οι περισσότερες των οποίων αφορούσαν τη μελέτη του πεδίου ροής και των επιδόσεων συμπίεστη μιας βαθμίδας C-R. Η βιβλιογραφική αυτή επισκόπηση είχε σαν αποτέλεσμα να καθοριστούν τα σημεία εκείνα στα οποία έπρεπε να δοθεί προσοχή και παραπάνω διερεύνηση, ώστε η διάταξη που θα σχεδιαζόταν να συμπληρώσει και να επεκτείνει τα αποτελέσματα των βιβλιογραφικών αναφορών.

Στη συνέχεια, μια ποιοτική ανάλυση με τρίγωνα ταχυτήτων και τους αδιάστατους συντελεστές φόρτισης Ψ και παροχής Φ , έδειξε την επίδραση του λόγου στροφών των πτερωτών στη γωνία εισόδου του 2ου ρότορα, με αποτέλεσμα μια πρώτη εκτίμηση για τις γωνίες κλίσης (stagger) που πρέπει να έχουν τα πτερύγια των δύο πτερωτών.

Έπειτα, έγινε η ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα με το όνομα BLADE, για τον μονοδιάστατο υπολογισμό της ροής μιας βαθμίδας συμπίεστη C-R. Ο υπολογισμός έγινε βάση εμπειρικών σχέσεων της Naca που υπολογίζουν τις απώλειες διαμέσου των πτερυγώσεων, καθώς και οι γωνίες παρέκκλισης για αεροτομές Naca65. Τρεξίματα του κώδικα για διαστάσεις και ταχύτητες που ταίριαζαν με τον αρχικό σχεδιασμό της διάταξης, έδωσαν μια εκτίμηση της ισχύος που καταναλώνουν οι πτερωτές, με αποτέλεσμα να καθοριστεί η ισχύς των ηλεκτροκινητήρων της διάταξης που είναι της τάξης των 40kW. Τέλος, με τροποποίηση πτερυγίων από στάτορα της 3ης βαθμίδας του κινητήρα GE J-79, και με βάση υπάρχουσες συνιστώσες στο Ε.Θ.Σ., έγινε ο σχεδιασμός των δίσκων των πτερυγίων και την υπόλοιπης διάταξης, καθώς και η εκλογή τυποποιημένων εξαρτημάτων που τη συγκροτούν, βάση μελέτης δυναμικής και στατικής αντοχής των περιστρεφόμενων συνιστωσών.

Αποτέλεσμα του σχεδιασμού ήταν η κατάθεση των κατασκευαστικών σχεδίων της διάταξης, βάση των οποίων έγινε η κατασκευή και η συναρμολόγηση της. Η διάταξη είναι χαμηλών ταχυτήτων με τις μέγιστες στροφές να ανέρχονται στις 3000rpm, τη διάμετρο ακροπτερυγίου στα 550mm και το ύψος του καναλιού ροής στα 125mm. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης του αξονικού διακένου των πτερωτών και των γωνιών κλίσης (stagger) των πτερυγίων τους.

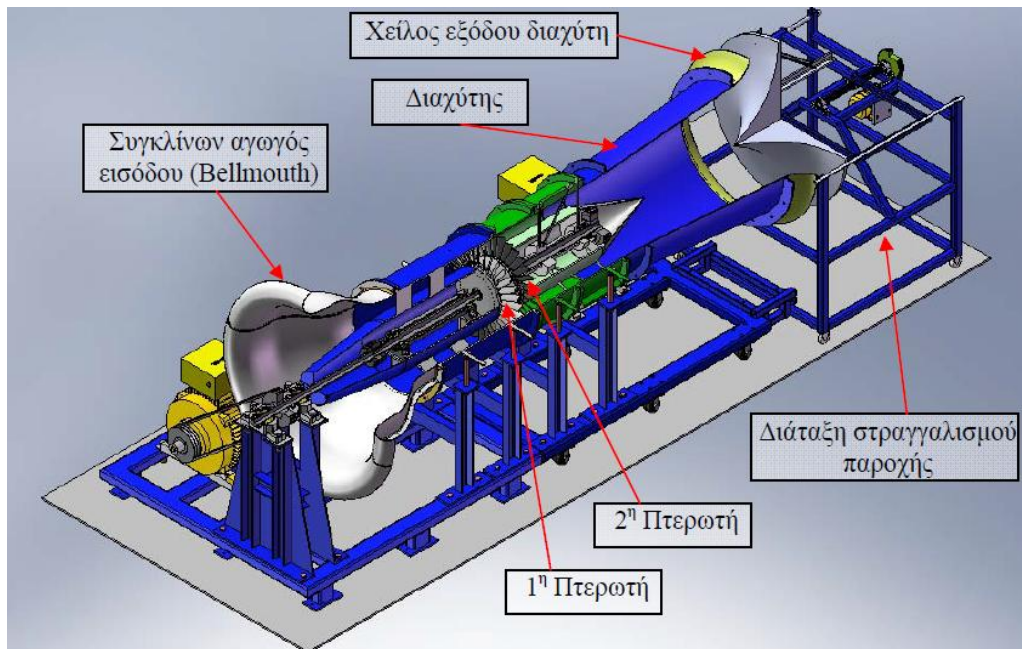
Κατόπιν ακολούθησε η διπλωματική εργασία του Χ.Αμπάτη. Η διπλωματική αυτή εργασία είχε πολλαπλό σκοπό: 1ον) το σχεδιασμό και κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών της διάταξης, 2ον) την τροποποίηση και ρύθμιση ορισμένων περιστρεφόμενων συνιστωσών που καθορίζουν την ομαλή λειτουργία, 3ον) την επιλογή των απαραίτητων αισθητηρίων και οργάνων μέτρησης και η εγκατάστασή τους επάνω στη διάταξη, 4ον) τη διενέργεια

μετρήσεων επάνω στη διάταξη για την πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας της πειραματικής διάταξης, καθώς και για μια πρώτη παραμετρική μελέτη.

Αρχικά τοποθετήθηκαν τα πτερύγια και ζυγοσταθμίσθηκαν οι άξονες, κατόπιν σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν επιμέρους συνιστώσες της διάταξης όπως το χείλος εκφυγής και ο αγωγός εισόδου bellmouth για την εξομάλυνση της ροής στην είσοδο και την έξοδο της. Ακολούθησε ανάλυση του επιπέδου διαταραχής της εισερχόμενης ροής και τοποθετήθηκε πλέγμα honeycomb στην είσοδο για την απαλοιφή της αναρροφώμενης τύρβης. Κατόπιν σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε η μετρητική αλυσίδα και βαθμονομήθηκαν τα όργανα που την απαρτίζουν. Καταρτίστηκαν επίσης όλοι οι απαραίτητοι υπολογιστικοί κώδικες για την μετάφραση των δεδομένων που παρέχει η μετρητική αλυσίδα και τον υπολογισμό των ρευστομηχανικών μεγεθών.

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αυτών πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη της βαθμίδας και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με το υπολογιστικό μοντέλο ροής (Κώδικας BLADE). Οι παράμετροι της μελέτης αυτής ήταν οι γωνίες κλίσης των πτερυγίων των και ο λόγος στροφών των πτερωτών.

Έγινε επίσης ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των πτερυγίων της διάταξης, εργασία που παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός 3D μοντέλου του πτερυγίου για χρήση σε προγράμματα CFD για περαιτέρω υπολογιστική διερεύνηση των επιδόσεων της διάταξης.



Σχήμα 1.1: Η μορφή της εγκατάστασης κατά την ολοκλήρωση των προηγηθέντων διπλωματικών εργασιών του Γ. Κατσίκη και Χ.Αμπάτη.

1.2.2 Ανασκόπηση προηγούμενης παραμετρικής μελέτης της βαθμίδας

Η προηγούμενη πειραματική εργασία επί της διάταξης είχε ως άξονα τη διερεύνηση της επίδρασης δύο παραμέτρων λειτουργίας στις επιδόσεις της βαθμίδας αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών. Οι δύο παράμετροι είναι οι γωνίες stagger και ο λόγος στροφών των πτερωτών.

Ως αναφορά στις γωνίες stagger εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- Βέλτιστο ζεύγος γωνιών 30° - 43°
- Για τον πρώτο ρότορα η χαρακτηριστική μένει η αναλλοίωτη για σταθερές γωνίες stagger
- Για τον δεύτερο ρότορα, για σταθερό λόγο στροφών R_u , η μείωση της γωνίας κλίσης του 1ου ρότορα οδηγεί σε μετατόπιση της Φ - Ψ του 2ου ρότορα προς μεγαλύτερα Φ , και σε πλάτυνση της χαρακτηριστικής αυξάνοντας έτσι και το περιθώριο λειτουργίας του.

Ως αναφορά στο λόγο στροφών:

- η χαρακτηριστική Φ - Ψ του 2ου ρότορα εξαρτάται μόνο από το λόγο στροφών $R_u=N2/N1$ και τις γωνίες κλίσης των πτερυγίων των πτερωτών. Αύξηση του λόγου στροφών οδηγεί στη μετατόπιση της Φ - Ψ του 2ου ρότορα προς μικρότερα Φ αν βέβαια διατηρείται σταθερή η γωνία κλίσης των πτερυγίων του. Για τον ίδιο λόγο στροφών, ανεξάρτητα με τον αριθμό στροφών των πτερωτών η Φ - Ψ του 2ου ρότορα παραμένει αναλλοίωτη.

Ως αναφορά στο βαθμό απόδοσης:

- Ο βαθμός απόδοσης του 1ου ρότορα ξεκινά από χαμηλές τιμές και όσο ελαττώνεται η παροχή ο β.α. αυξάνεται μέχρι την μερική αποκόλληση, και για ακόμα μικρότερες παροχές ελαττώνεται ξανά.
- Οι χαρακτηριστικές βαθμού απόδοσης του 2ου ρότορα ξεκινούν συνήθως από τη μέγιστη τιμή β.α. για τη μεγαλύτερη παροχή και ο β.α. μειώνεται ελαττώνοντας την παροχή.

1.3 Σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση προηγούμενης έρευνας

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Γ.Κατσίκη^[2] έγινε μια εκτενής αναφορά στις προηγούμενες πειραματικές εργασίες σε βαθμίδες

αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών που ήταν διαθέσιμες σε ανοιχτή βιβλιογραφία.

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες πειραματικής μελέτης του φαινομένου οι οποίες άλλοτε αντικρούονται και άλλοτε δεν προσφέρουν χρήσιμα δεδομένα. χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των Miller και Chappel, η εγγενής πολυπλοκότητα της διάταξης των οποίων, οδήγησε σε φτωχές επιδόσεις όσον αφορά στο περιθώριο περιστροφικής αποκόλλησης και πάλμωσης

Στην ανοιχτή βιβλιογραφία πολλές φορές τα αποτελέσματα είναι αντικρουόμενα, συγκεχυμένα και απουσιάζει φυσική επεξήγηση των αποτελεσμάτων. Συχνά δε οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας παρουσιάζουν ιδιαίτερη μορφή που δε συνάδει με τη θεωρία.

Συγκεκριμένα στην την επίδραση του αξονικού διάκενου στην λειτουργία της βαθμίδας έκαναν σημαντική μελέτη οι Sharma et al. Η εγκατάσταση των Sharma et al ^{[7][8][9][10][11]} επιτύχανε μέγιστες στροφές περί τις 3000RPM. Στη μελέτη που πραγματοποίησαν παρατηρήθηκε καλύτερη λειτουργία για R-S βαθμίδα σε μεγαλύτερες τιμές αξονικού διακένου παρά σε μικρές, με βελτίωση στην ικανότητα αύξησης της στατικής πίεσης. Ανεπιρέαστο από το αξονικό διάκενο φάνηκε να είναι το εύρος λειτουργίας. Για τη λειτουργία **C-R βαθμίδας** σε λόγο στροφών $R_u=1$ το **μικρό διάκενο φάνηκε ευνοϊκότερο** καθώς η βαθμίδα λειτούργησε σε μεγαλύτερο εύρος και υψηλότερους συντελεστές φόρτισης. Για λόγο στροφών $R_u=1.5$ και πάλι το μικρό διάκενο παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα. Και στις 2 περιπτώσεις φαίνεται να ευνοείται περισσότερο η πρώτη πτερωτή, της οποίας η χαρακτηριστική μετατοπίζεται προς υψηλότερους συντελεστές φόρτισης και αποκτά μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας. Και στις δύο περιπτώσεις η παρουσία της δεύτερης πτερωτής φαίνεται να επιδρά θετικά στην ευστάθεια της πρώτης απαλείφοντας τις τάσεις για αποκόλληση μειώνοντας τις γωνίες παρέκκλισης. Χαρακτηριστικό της συγκεχυμένης βιβλιογραφίας είναι ότι άλλη ομάδα ερευνητών από την Βομβάη, οι Roy et al., κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ταχύτερη περιστροφή του πίσω ρότορα φαίνεται να ευνοεί την ευστάθεια ολόκληρης της βαθμίδας, ενώ στην περίπτωση των Sharma μονάχα του πρώτου ρότορα.

Επιπλέον, οι Sharma et al διεξήγαγαν έρευνα με διάφορους τύπους πτερυγίων, όπου διαπίστωσαν ότι πτερύγια με συστροφή παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά.

Εν τέλει, για τα αποτελέσματα που παρουσίασαν οι Sharma et al, αναφέρουμε το γεγονός ότι απουσιάζει η αναφορά σε ολική πίεση, το οποίο μας εμποδίζει να έχουμε μία πληρέστερη εικόνα της ενεργειακής συνεισφοράς της κάθε πτερωτής και της αλληλεπίδρασή τους, ενώ η απουσία απόλυτων μεγεθών (λόγος πίεσης, παροχή) μας στερεί την άμεση εποπτεία των επιδόσεων της βαθμίδας. Ακόμη, πολύ λίγα είναι τα στοιχεία που παρουσιάζονται για το βαθμό απόδοσης. Τέλος, οι καμπύλες που δίνονται (φόρτισης βαθμίδας αλλά και

βαθμών απόδοσης) έχουν αρκετά σημεία που επιδέχονται αμφισβήτηση ως προς την αξιοπιστία των μετρήσεων, αφού η μορφή δεν είναι λογική.

Παρόμοια μελέτη διεξήγαγαν οι Roy et al ^{[12][13][14]} όπου όπως και στην εργασία των Sharma κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μείωση του αξονικού διακένου βελτιώνει τα μεγέθη που σχετίζονται με τις αεροδυναμικές επιδόσεις (ολική πίεση, βαθμός απόδοσης, αναρροφητική ικανότητα) αλλά «ζημιώνει» σημαντικά την αερακουστική συμπεριφορά της βαθμίδας (ηχητική εκπομπή).

Αναλυτική περιγραφή και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εργασίας των Sharma et al. και άλλων ερευνητικών εργασιών επί των C-R βαθμίδων υπάρχει στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας του Γ. Κατσίκη^[2].

1.4 Η Παρούσα εργασία- Σκοπός-Δομή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται να προσθέσει το τελευταίο κεφάλαιο στην παραμετρική μελέτη που έχει διεξαχθεί στη διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών και βασίζεται εν μέρει στις προτάσεις για περαιτέρω εργασίες στην εγκατάσταση που καταρτίστηκαν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας του Χ. Αμπάτη.

Το παρόν **1^ο κεφάλαιο** αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας. Περιέχει μια σύντομη ανασκόπηση της εργασίας που είχε γίνει στη διάταξη πριν την έναρξη της παρούσας διπλωματικής, καθώς και μια αναφορά στην υπάρχουσα ανοιχτή βιβλιογραφία πάνω στην επίδραση του αξονικού διακένου στη λειτουργία βαθμίδων αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

Στο **2^ο κεφάλαιο** περιγράφεται η ανάπτυξη κώδικα για τον υπολογισμό του σφάλματος των μετρήσεων, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα και το εύρος του περιθωρίου σφάλματος.

Το **3^ο κεφάλαιο** αφορά στις προκαταρκτικές μετρήσεις και εργασίες που διεξήχθησαν στην εγκατάσταση πριν προβούμε στην παραμετρική μελέτη. Αναφέρεται η αναγκαιότητα της διεξαγωγής των μετρήσεων αυτών και ο τρόπος με τον οποίο συμβάλουν στην κατάρτιση μιας πιο εμπειριστατωμένης εικόνας της λειτουργίας της διάταξης.

Στο **4^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της παραμετρικής μελέτης. Τα διαγράμματα που παραθέτονται είναι διαγράμματα λόγου πίεσης - παροχής, χαρακτηριστικών καμπύλων αδιάστατων συντελεστών παροχής-φόρτισης (Φ - Ψ_{tt}), ακτινικές απεικονίσεις των

γωνιών πρόσπτωσης και παρέκκλισης καθ' ύψος του πτερυγίου (δ -R) και διαγράμματα βαθμού απόδοσης - παροχής. Παράλληλα με την παράθεση των διαγραμμάτων γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και αναφορά στα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν.

Στο **5^ο κεφάλαιο** συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με τον κώδικα BLADE του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών ο οποίος πραγματοποιεί μια μονοδιάστατη ανάλυση του πεδίου ροής C-R διατάξεων. Επίσης διερευνάται η δυνατότητα παραγωγής χαρτών του δεύτερου ρότορα για διάφορους λόγους στροφών βάσει του χάρτη για λόγο στροφών $R_u=1$.

Το **6^ο κεφάλαιο** αποτελεί ανακεφαλαίωση της παρούσας εργασίας και περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που εξάγονται με την ολοκλήρωσή της, καθώς και τις προτάσεις για μελλοντικές εργασίες στη διάταξη.

Ακολουθεί ένα **παράρτημα** το πρώτο σκέλος του οποίου περιλαμβάνει την παράθεση των αρχείων εισόδου & εξόδου του κώδικα που συντάχθηκε για τον υπολογισμό του σφάλματος των μετρήσεων ενώ το δεύτερο σκέλος περιλαμβάνει το έντυπο αρχειοθέτησης των εργασιών καθώς και τις οδηγίες χρήσης της εγκατάστασης.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να ολοκληρώσει την παραμετρική μελέτη της βαθμίδας διερευνώντας την τελευταία παράμετρο λειτουργίας, το αξονικό διάκενο των πτερωτών και εμβαθύνοντας στην επίδραση του λόγου στροφών. Υπενθυμίζεται ότι παραμετρική μελέτη για τις γωνίες stagger και τον λόγο στροφών έχει εκπονηθεί στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Χ.Αμπάτη^[1]. Πρωταρχικό σκοπό του εργαστηρίου αποτελεί ο εμπλουτισμός της ανοιχτής βιβλιογραφίας πάνω στις διατάξεις C-R κυρίως με επιδόσεις της κάθε πτερωτής ξεχωριστά.

2

Υπολογισμός σφαλμάτων μετρήσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράγοντες που δημιουργούν σφάλμα στις μετρήσεις, επεξηγείται το είδος του σφάλματος και αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του σφάλματος αυτού. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και κρίνεται ο βαθμός αξιοπιστίας των μετρήσεων. Ένας τρόπος υπολογισμού του σφάλματος ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί πριν την πραγματοποίηση περαιτέρω μετρήσεων ώστε να διερευνηθεί η αξιοπιστία της μετρητικής αλυσίδας.

2.1 Περιγραφή σφαλμάτων

Στην διάταξη πραγματοποιείται μια ένας σημαντικός αριθμός μετρήσεων για των υπολογισμό των μεγεθών της ροής. Η πρόσκτηση πληροφοριών χωρίς καθορισμό της βεβαιότητας με την οποία έχουν προκύψει μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα κατά την επεξεργασία τους. Σε κάθε μέτρηση υπεισέρχονται 2 ειδών σφάλματα:

1. το τυχαίο (σποραδικό) σφάλμα που μπορεί να εμφανιστεί από τυχαίους παράγοντες και ποικίλει από μέτρηση σε μέτρηση. Το σφάλμα αυτό συνήθως ακολουθεί συγκεκριμένες στατιστικές κατανομές.
2. το συστηματικό (σταθερό) σφάλμα που περιέχεται σε κάθε διαδικασία πειραματικών μετρήσεων και έχει ως αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενες μετρήσεις των ίδιων μεγεθών υπό τις ίδιες συνθήκες να απέχουν ένα σταθερό ποσοστό από την πραγματική τους τιμή. Κύριες αιτίες του συστηματικού σφάλματος είναι τόσο η διακριτική ικανότητα των οργάνων όσο και η βαθμονόμησή τους. Μέσω της επεξεργασίας των μετρήσεων το σφάλμα αυτό περνάει στα υπολογιζόμενα μεγέθη. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός αυτού του συστηματικού σφάλματος και η μεταφορά του σε όλα τα μεγέθη της ροής μέσω της διαδικασίας των υπολογισμών.

Στον παρακάτω πίνακα από τη διπλωματική του Χ. Αμπάτη^[1], παρουσιάζονται τα μετρητικά όργανα της εγκατάστασης, τα μετρούμενα μεγέθη και το εύρος των μεγεθών που είναι ικανά να μετρήσουν (Πίνακας 2.1).

ADC Channel Number	Κωδικός Οργάνου	Εύρος Μέτρησης	Θέση Μέτρησης	Μετρούμενο Μέγεθος	Σύνδεση με Αισθητήρα
00	TRA114-1	±20 mbar	1	P ₀ -P ₁ (mbar)	3-hole Probe
01	TRA114-2	±20 mbar	1	P ₁ -P ₂ (mbar)	3-hole Probe
02	TRA114-3	±20 mbar	2	P ₂ -P ₄ (mbar)	5-hole Probe 1
03	TRA114-4	±20 mbar	2	P ₃ -P ₁ (mbar)	5-hole Probe 1
04	TRA114-5	±20 mbar	3	P ₂ -P ₄ (mbar)	5-hole Probe 3
05	TRA115-1	±30 mbar	2	P ₀ -P ₂ (mbar)	5-hole Probe 1
06	TRA115-2	±30 mbar	2	P ₀ -P ₃ (mbar)	5-hole Probe 1
07	TRA115-3	±30 mbar	3	P ₀ -P ₂ (mbar)	5-hole Probe 3
08	TRA115-4	±30 mbar	3	P ₀ -P ₃ (mbar)	5-hole Probe 3
09	TRA115-5	±30 mbar	3	P ₃ -P ₁ (mbar)	5-hole Probe 3
10	TRA112	0-25 mbar	1	P _{at} -P ₀ (mbar)	3-hole Probe
11	TRA113	0-40 mbar	2	P ₀ -P _{at} (mbar)	5-hole Probe 1
12	TRA081	0-100 mbar	3	P ₀ -P _{at} (mbar)	5-hole Probe 3
13	ELTEM044-2	0-2kHz	Πάνω από 1 ^η Πτερωτή	RPM 1 ^{ης} Πτερωτής	Proximity Sensor (Proxy003a)
14	ELTEM044	0-2kHz	Πάνω από 2 ^η Πτερωτή	RPM 2 ^{ης} Πτερωτής	Proximity Sensor (Proxy003b)
15	TRA040	±20 mbar	01-02	P ₀₁ -P ₀₂ (mbar)	Κέλυφος Bellmouth
16	TRA043	±20 mbar	atm-1	P _{at} -P _{st1} (mbar)	Κέλυφος Συμπίεστη
17	TRA041	±20 mbar	2-1	P _{st2} -P _{st1} (mbar)	Κέλυφος Συμπίεστη
18	TRA044	±20 mbar	3-2	P _{st3} -P _{st2} (mbar)	Κέλυφος Συμπίεστη
19	TRA116	600-1100mbar	atm	Pat (mbar)	-
20	TRA116	-20 – 80°C	atm	Tat (°C)	-
21	TRA116	5 – 98 %	atm	RH %	-
22	-	-	3-hole Probe Carriage	Pot Supply (V)	-
23	-	-	3-hole Probe Carriage	R1(mm)	-
24	LG Inverter	-	Κινητήρας 1 ^{ης} Πτερωτής	Motor 1 Current(A)	-
25	LG Inverter	-	Κινητήρας 1 ^{ης} Πτερωτής	Motor 1 Voltage (V)	-
26	VIB029	±5g	Ανάπτυ 2 ^{ης} Πτερωτής	Κατακόρυφος Κραδασμός (m/s ²)	Accelerometer VIB026
27	VIB029	±5g	Ανάπτυ 2 ^{ης} Πτερωτής	Οριζόντιος Κραδασμός (m/s ²)	Accelerometer VIB027

Πίνακας 2.1: Όργανα μέτρησης της μετρητικής αλυσίδας, μετρούμενα μεγέθη και εύρος μετρήσεων.

2.2 Μεθοδολογία υπολογισμού των σφαλμάτων

Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων των υπολογιζόμενων μεγεθών της ροής χρειαζόμαστε τόσο τα σφάλματα των μετρήσεων όσο και τις παραγώγους ευαισθησίας των υπολογιζόμενων μεγεθών ως προς τα μετρούμενα μεγέθη. Το σφάλμα ενός υπολογιζόμενου μεγέθους δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 + \sigma_{x_2}^2 \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 + \sigma_{x_3}^2 \left(\frac{\partial y}{\partial x_3}\right)^2} \quad (\text{Σχέση 2.1})$$

όπου

y: το εκάστοτε υπολογιζόμενο μέγεθος

x_i : τα μετρούμενα μεγέθη που προέρχονται από τη μετρητική αλυσίδα

σ : το σφάλμα της εκάστοτε μέτρησης

Τα μεγέθη που δέχεται ως είσοδο ο κώδικας CRCALC και το σφάλμα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 2.2. Τα σφάλματα των μετρήσεων των ατμοσφαιρικών συνθηκών αντλήθηκαν από τις προδιαγραφές των αντίστοιχων οργάνων. Στους σωλήνες πίεσης, το πιο ζωτικό τμήμα της μετρητικής αλυσίδας, έχουμε αφενός το σφάλμα διακριτικής ικανότητας, αφετέρου το σφάλμα θέσης του σωλήνα ο οποίος σαρώνει το πεδίο ροής. Ορίσαμε μια τιμή της τάξης των 0.5mm ως σφάλμα τοποθέτησης στις μετρήσεις ακτινικής θέσης (R1,R2,R3), ενώ για τη γωνιακή θέση των σωλήνων πίεσης ($\alpha 01$, $\alpha 02$, $\alpha 03$) θεωρούμε ένα σφάλμα τοποθέτησης της τάξης των 0.5°. Για το σφάλμα διακριτικής ικανότητας τόσο των σωλήνων πίεσης όσο και των αισθητήρων στατικής πίεσης (wall-taps) ανατρέξαμε στις καμπύλες βαθμονόμησης και σφαλμάτων στη διπλωματική εργασία του X. Αμπάτη ^[1] και θεωρήσαμε την μέγιστη τιμή στην εκάστοτε περίπτωση, καθώς οι μεταβολές είναι της τάξης των 10⁻⁶ bar. Με εύρος μέτρησης ±20-30 mbar και σφάλμα 10⁻³ mbar έχουμε ένα σχετικό σφάλμα της τάξης 0.01-0.02%. Για την ταχύτητα περιστροφής το σφάλμα της μέτρησης είναι πολύ μικρό καθώς πρόκειται για μέτρηση που προκύπτει από αισθητήρες προσέγγισης τοποθετημένους στο κέλυφος της διάταξης οι οποίοι ενεργοποιούνται κάθε φορά που περνάει από μπροστά τους ένα ακροπτερύγιο. Προκύπτει έτσι μία συχνότητα περιστροφής ως πολλαπλάσιο του αριθμού των πτερυγίων (34) κάτι που επιτρέπει μεγάλη ακρίβεια σε τιμές μικρότερες του 1RPM. Ωστόσο στην προκειμένη περίπτωση το σφάλμα δεν έγκειται στην διακριτική ικανότητα του οργάνου μέτρησης αλλά στην αδυναμία των ηλεκτροκινητήρων να διατηρήσουν σταθερές στροφές με μικρή απόκλιση. Το πρόβλημα είναι πιο έντονο στον κινητήρα της δεύτερης πτερωτής ο οποίος οδηγείται από θυρίστορ. Ο κινητήρας

της πρώτης περωτής που οδηγείται από inverter παρουσιάζει πιο σταθερή λειτουργία. Δεν πρέπει να παραβλέψουμε το πώς επιδρά στη διατήρηση σταθερών στροφών η προένταση των ιμάντων μετάδοσης κίνησης. Η έδραση του άξονα της πρώτης περωτής σε στιβαρά μεταλλικά νεύρα επιτρέπει μεγαλύτερη προένταση του ιμάντα μετάδοσης κίνησης σε σχέση με τον δεύτερο. Ο δεύτερος άξονας είναι ολοκληρωτικά φωλεμένος εντός της διάταξης και η έδρασή του δεν είναι το ίδιο στιβαρή και ο ιμάντας παρουσιάζει έντονες ταλαντώσεις κατά τη λειτουργία. Το σφάλμα που θεωρήσαμε για τις ταχύτητες περιστροφής προέρχεται από το μέγιστο εύρος μεταβολής τους όπως αυτό προέκυψε τόσο από τις μετρήσεις των αισθητήρων προσέγγισης όσο και από φορητά ηλεκτρονικά ταχύμετρα. Για τον μεν πρώτο ρότορα θεωρούμε σφάλμα 1 RPM για τον δε δεύτερο 6RPM.

Μετρούμενο μέγεθος	Σφάλμα μέτρησης	Μονάδα
Θέση σωλήνων πίεσης (R1,R2,R3)	0.5	mm
Γωνία σωλήνων πίεσης (α01,α02,α03)	0.5	μοίρες
Ταχύτητα περιστροφής 1ου ρότορα	1	RPM
Ταχύτητα περιστροφής 2ου ρότορα	6	RPM
Θερμοκρασία περιβάλλοντος Tamb	0.3	°C
Σχετική υγρασία Rh	0.025	%
Πίεση περιβάλλοντος Pamb	0.5	mbar
Διαφορές Πίεσης 3hole probe (Θέση 1)		
1_P0-P1	0.038	mbar
1_P1-P2	0.036	mbar
1_P0-Pat	0.022	mbar
Διαφορές Πίεσης 5hole probe (Θέση 2)		
2_P2-P4	0.042	mbar
2_P3-P1	0.035	mbar
2_P0-P2	0.064	mbar
2_P0-P3	0.064	mbar
2_P0-Pat	0.034	mbar
Διαφορές Πίεσης 5hole probe (Θέση 3)		
3_P0-P2	0.062	mbar
3_P2-P4	0.041	mbar
3_P0-P3	0.056	mbar
3_P3-P1	0.06	mbar
3_P0-Pat	0.066	mbar
Διαφορές Πίεσης των walltaps		
Pat-Pst1	0.016	mbar
Pst2-Pst1	0.016	mbar
Pst3-Pst2	0.014	mbar

Πίνακας 2.2: Μετρούμενα μεγέθη και σφάλματα μέτρησης

Αφού καθορίστηκαν οι τιμές σφάλματος (σ_{xi}) για όλα τα μετρούμενα μεγέθη έπρεπε να υπολογιστούν οι παράγωγοι ευαισθησίας. Για να υπολογιστούν οι παράγωγοι ευαισθησίας και το σφάλμα των μετρήσεων συντάχθηκε ένας κώδικας ο οποίος δέχεται τις εκάστοτε μετρήσεις, μεταβάλλει κατά 1% (∂x_i) μια εκ των μετρήσεων κάθε φορά, και υπολογίζει τις νέες τιμές των μεγεθών της ροής. Κατόπιν υπολογίζεται η μεταβολή των μεγεθών της ροής (∂y_i) και καταρτίζεται ένας πίνακας 3^{ov} διαστάσεων ο οποίος περιέχει για κάθε set μετρήσεων τις παραγώγους ευαισθησίας όλων των υπολογιζόμενων μεγεθών ως προς όλα τα μετρούμενα μεγέθη. Η μέθοδος αυτή είναι ένας προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού της μερικής παραγώγου στην περιοχή του σημείου της μέτρησης. Ύστερα, συνδυάζοντας τις παραγώγους ευαισθησίας και τα σφάλματα των μετρήσεων υπολογίζονται τα σφάλματα των μεγεθών της ροής για κάθε set μετρήσεων. Αυτή η διαδικασία γίνεται για κάθε μέγεθος το οποίο δέχεται ο κώδικας ως είσοδο. Για μεγέθη τα οποία δεν υπηρετούνται στη διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών της ροής αλλά αποτελούν δεδομένα εισόδου για τον κώδικα, όπως τάση και ένταση ρεύματος inverter και σημείο λειτουργίας ορίστηκε μηδενικό σφάλμα. Ο υπολογισμός των ολοκληρούμενων μεγεθών έγινε εξωτερικά με τη χρήση της μεθόδου τραπεζίου.

Όπως αναφέρεται, ο κώδικας υπολογισμού του σφάλματος καλεί τον κώδικα που υπολογίζει τα μεγέθη της ροής τόσες φορές όσες και τα μεγέθη που δέχεται ως είσοδο. Έτσι, για να λάβουμε το σφάλμα ο κώδικας απαιτεί πολλαπλά περισσότερο υπολογιστικό χρόνο απ' ό τι για να υπολογίσει τα δεδομένα.

Ο κώδικας είναι γραμμένος σε FORTRAN και χρησιμοποιεί μια ελαφρώς τροποποιημένη έκδοση του κώδικα CRCALC που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του X. Αμπάτη ^[1] ως υποπρόγραμμα. Το πρόγραμμα αποτελείται από έναν manager ο οποίος καλεί 4 υποπρογράμματα:

1. Αρχικά καλείται το υποπρόγραμμα RmeasDif το οποίο τροποποιεί τις τιμές του αρχείου εισόδου του CRCALCmod. Χρησιμοποιεί ως αρχείο εισόδου το CRCALC.inp παράγει ως αρχείο εξόδου το RMEASD.dat
2. Καλείται το υποπρόγραμμα CRCALCmod το οποίο υπολογίζει τα μεγέθη της ροής από το τροποποιημένο αρχείο εισόδου.
3. Καλείται το υποπρόγραμμα ParDeriv το οποίο υπολογίζει τις μερικές παραγώγους των μεγεθών (παραγώγους ευαισθησίας) των μεγεθών της ροής. Αρχεία εισόδου είναι τα RCALCUNSORTED.dat & RCALCMOD.dat τα οποία παράγονται από το υποπρόγραμμα CRCALCmod. Ως αρχείο εξόδου παράγεται το PARDERIV.DAT το οποίο περιέχει τις παραγώγους ευαισθησίας των μεγεθών.
4. Τέλος καλείται το υποπρόγραμμα ErrorCalc το οποίο υπολογίζει το σφάλμα των μετρήσεων συνδυάζοντας τα δεδομένα των προηγούμενων

υποπρογραμμάτων. Το υποπρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί, πλην των προαναφερθέντων, και το αρχείο εισόδου SIGMA.inp το οποίο περιέχει τα εκάστοτε σφάλματα των μετρούμενων μεγεθών.

2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Κατόπιν της ανάπτυξης του εν λόγω κώδικα συγκρίναμε τα περιθώρια σφάλματος με τις μετρούμενες τιμές για να κατανοήσουμε την αξιοπιστία της μετρητικής αλυσίδας. Καταρτίστηκε ένας πίνακας με το απόλυτο και το σχετικό σφάλμα των κυριότερων μεγεθών (Πίνακας 2.3). Το σφάλμα αυτών των μεγεθών επηρεάζεται από το σφάλμα των μετρητικών οργάνων από τα οποία προκύπτουν τα δεδομένα στα οποία βασίζεται ο υπολογισμός τους. Έτσι μεγέθη, παραδείγματος χάριν, μεγέθη που προκύπτουν αποκλειστικά από δεδομένα πίεσης αναμένεται να έχουν μικρότερο σφάλμα από μεγέθη που προκύπτουν από δεδομένα γωνιών. Η παροχή μάζας προκύπτει από τη διαφορά στατικής πίεσης στον αγωγό εισόδου, δεδομένα που προκύπτουν από τους αισθητήρες πίεσης του κελύφους (wall taps) και το σφάλμα εξαρτάται αποκλειστικά από τη διακριτική ικανότητα του οργάνου. Αντιθέτως οι ταχύτητες εξαρτώνται και από τις γωνίες στροφής των σωλήνων πίεσης όπου σαφώς περιλαμβάνεται και σφάλμα τοποθέτησης. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{1, is, t-t} = \frac{P_{t2} - P_{t1}}{\rho_1 U_1 (V_{u2} - V_{u1})} \quad (\text{Σχέση 2.2})$$

όπου

P_t : ολική πίεση (Pa)

ρ : πυκνότητα (kg/m^3)

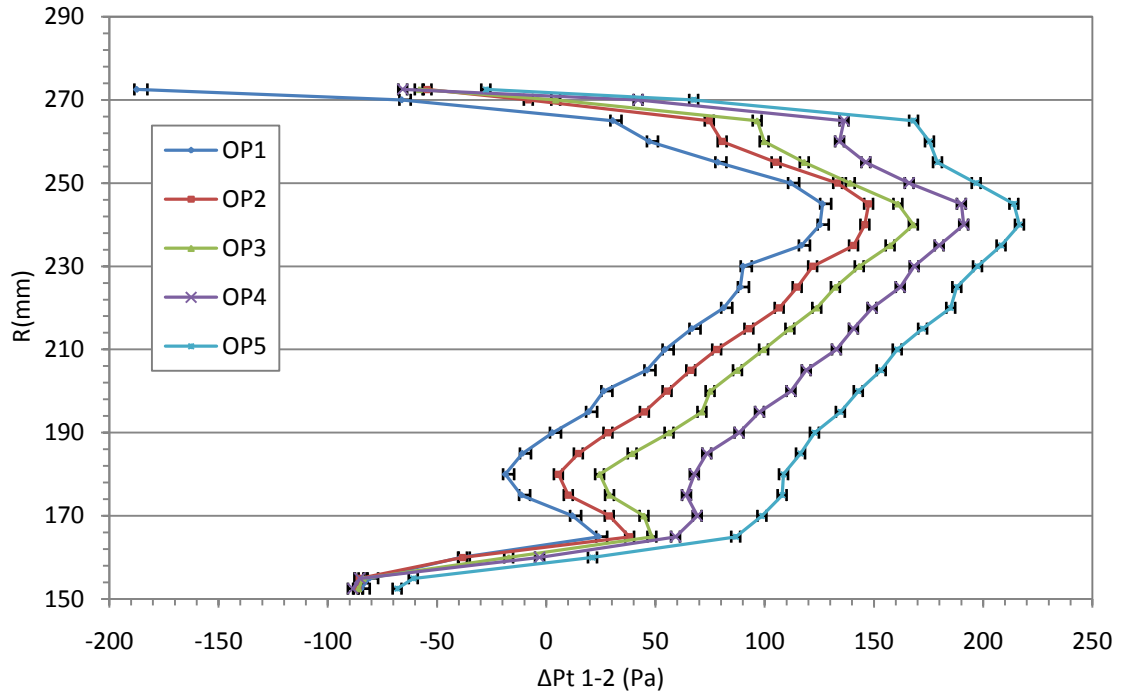
U : περιφερειακή ταχύτητα

V_u : προβολή της ταχύτητας του ρευστού στην περιφερειακή

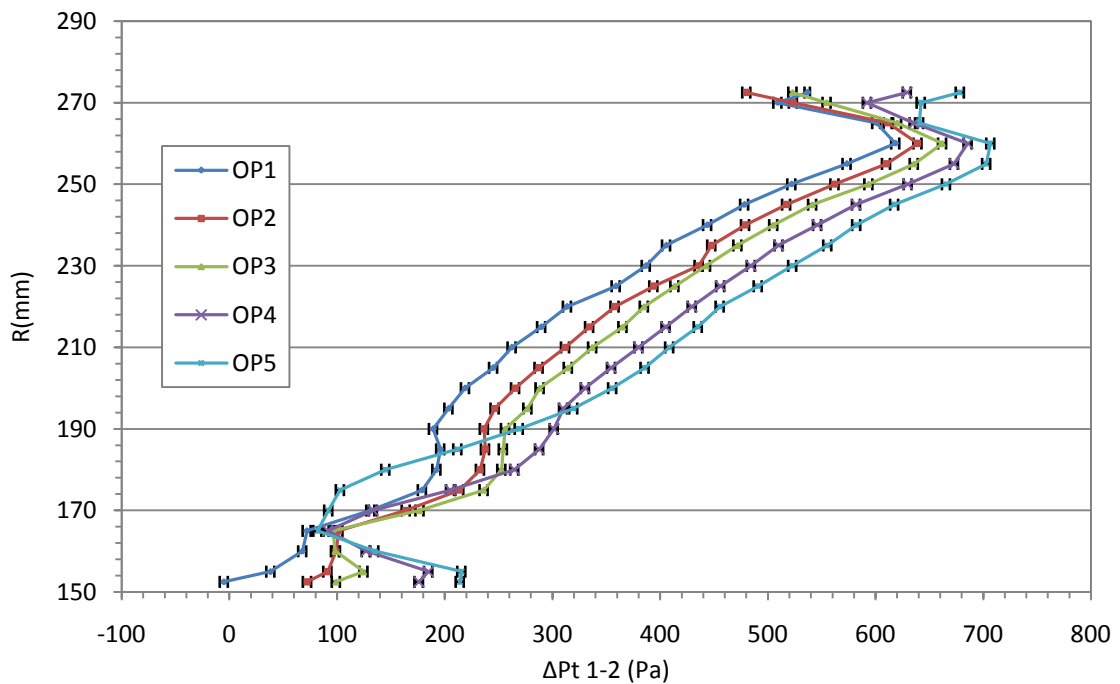
η οποία περιλαμβάνει πολλαπλές πράξεις μεταξύ μεγεθών ταχυτήτων. Τα μεγέθη των ταχυτήτων περιέχουν μεγαλύτερο σφάλμα από αυτά της πίεσης, το οποίο μέσω της διαδικασίας υπολογισμών μεταβιβάζεται στον βαθμό απόδοσης.

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης	Απόλυτο σφάλμα	Σχετικό σφάλμα
Ταχύτητα	m/s	± 0.2-0.4	2-4 %
Πίεση	Pa	± 4	0.10%
Λόγος πίεσης	-	± 4-8 10^{-5}	2-3%
Αριθμός Mach	-	± 0.000746	0.10%
Παροχή μάζας	kg/s	± 0.0017	0.04%
Βαθμός απόδοσης	-	± 0.074	0.082%

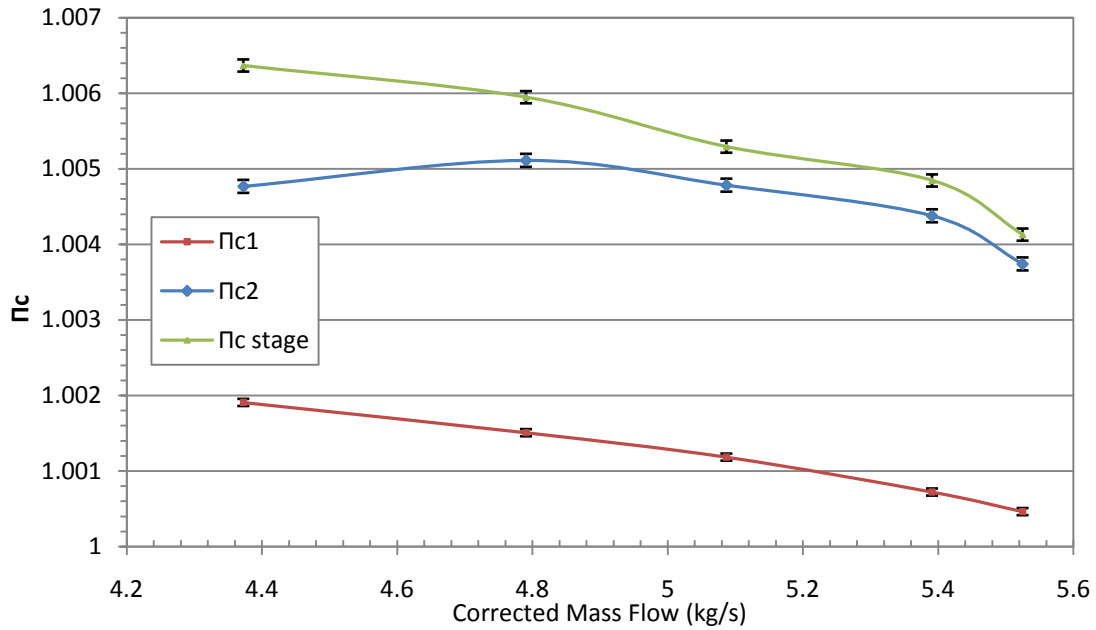
Πίνακας 2.3: Απόλυτο και σχετικό σφάλμα των κυριότερων υπολογιζόμενων μεγεθών



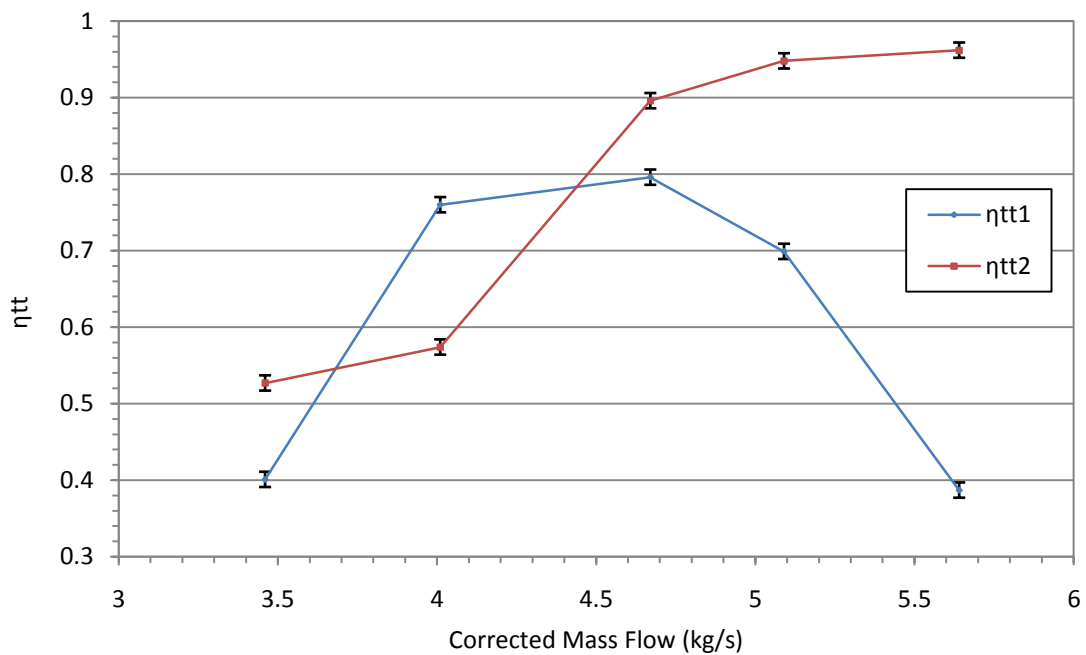
Σχήμα 2.3.1: Σφάλμα αύξησης ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα $\Delta Pt(\text{mbar})$ - $R(\text{mm})$ μέτρησης σε 800-1200 RPM με 5 σημεία λειτουργίας.



Σχήμα 2.3.2: Σφάλμα αύξησης ολικής πίεσης στον δεύτερο ρότορα $\Delta Pt(\text{mbar})$ - $R(\text{mm})$ μέτρησης σε 800-1200 RPM με 5 σημεία λειτουργίας.



Σχήμα 2.3.3: Σφάλμα λόγου πίεσης πρώτου, δεύτερου ρότορα & βαθμίδας. Μεταφορά σφάλματος ακτινικών μεγεθών στα ολοκληρωμένα.



Σχήμα 2.3.4: Σφάλμα βαθμού απόδοσης πρώτου & δεύτερου ρότορα. Μεταφορά σφάλματος ακτινικών μεγεθών

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 2.3 στην πλειονότητα των υπολογιζόμενων μεγεθών υπεισέρχεται πολύ μικρό σφάλμα. Το μεγαλύτερο σφάλμα παρουσιάζουν τα μεγέθη ταχύτητας με σχετικό σφάλμα 2-4%. Αν και σε αυτή την περίπτωση το σφάλμα είναι αρκετά μικρό, η μεταβίβασή του σε το σχήμα 2.3.1 το σφάλμα των μετρήσεων κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα και

τα αποτελέσματα κρίνονται αξιόπιστα. Το περιθώριο σφάλματος δεν αλλάζει ούτε κατά μήκος του περυγίου ούτε με την αλλαγή του σημείου λειτουργίας. Αυτό υποδεικνύει ότι όλοι οι αισθητήρες δουλεύουν σε εύρος κανονικής λειτουργίας. Δεδομένης της αξιοπιστίας της διάταξης δεν κρίθηκε αναγκαίο να υπολογιστεί και να παρουσιαστεί το σφάλμα των μετρήσεων που ακολούθησαν.

3 Προκαταρκτικές μετρήσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέτουμε όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη διερεύνηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών λειτουργίας της εγκατάστασης, οι οποίες ήταν απαραίτητο να πραγματοποιηθούν πριν τον μεγάλο όγκο μετρήσεων για τη μελέτη της επίδρασης της αξονικής απόστασης των πτερωτών στη λειτουργία της βαθμίδας. Τα χαρακτηριστικά τα οποία διερευνώνται είναι:

- η επαναληψιμότητα των μετρήσεων,
- η επίδραση του αριθμού των ακτινικών σημείων ανά σάρωση στα ολοκληρούμενα μεγέθη,
- η περιφερειακή ανομοιομορφία της ροής,
- η κατανάλωση ισχύος της εγκατάστασης,
- η επίδραση των οπών στο hub των πτερυγίων του πρώτου ρότορα στη ροή και στη λειτουργία του δεύτερου ρότορα.

Η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών λειτουργίας είναι απαραίτητη για τη σωστή ερμηνεία των δεδομένων τόσο μελλοντικών όσο και προγενέστερων μετρήσεων στη διάταξη. Όλες οι προκαταρκτικές μετρήσεις έγιναν στα 800-1200 RPM, με αξονική απόσταση πτερωτών ίση με 2 χορδές και γωνίες stagger 30° - 43° .

3.1 Διερεύνηση επαναληψιμότητας & σύγκριση με περιθώριο σφάλματος

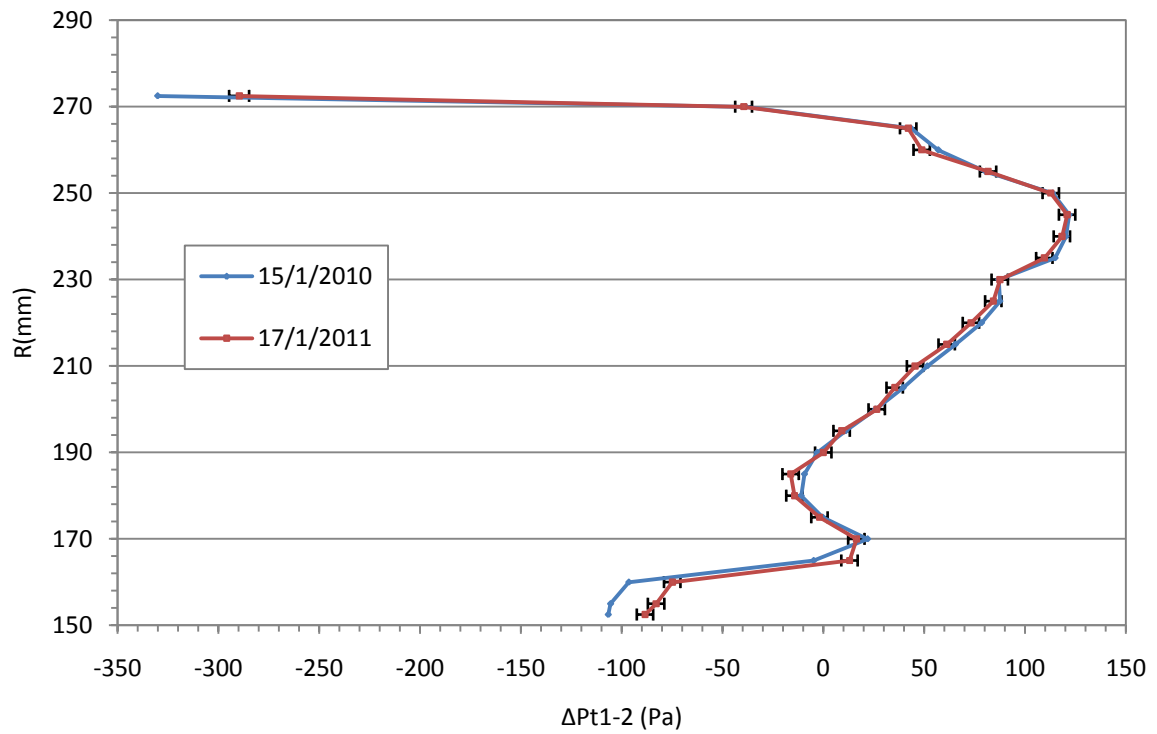
Η επαναληψιμότητα των μετρήσεων είναι πιθανώς το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό λειτουργίας της εγκατάστασης. Κατά την διεξαγωγή πειραμάτων πρέπει να είμαστε σίγουροι ότι η εγκατάσταση μπορεί να αναπαράγει τις επιθυμητές συνθήκες επακριβώς και ότι η μετρητική αλυσίδα έχει την απαραίτητη σταθερή συμπεριφορά στη μετάφραση των δεδομένων. Για τη διερεύνηση της επαναληψιμότητας χρησιμοποιείται ως βάση αναφοράς η αντίστοιχη μέτρηση ιδίων χαρακτηριστικών (800-1200 RPM – 2c 30° - 43°) που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας στην εγκατάσταση.

Για να έχουμε σωστή εικόνα της επαναληψιμότητας, η πρώτη μέτρηση αφορά μόνο ένα σημείο λειτουργίας, στη μέγιστη παροχή με τη βάνα στραγγαλισμού πλήρως ανοιχτή, καθώς είναι το μόνο σημείο λειτουργίας που μπορεί να αναπαραχθεί επακριβώς. Σημαντική παράμετρος λόγω της οποίας υπεισέρχεται τυχαίο σφάλμα στις μετρήσεις, είναι οι επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε να αντιπαραβάλουμε μετρήσεις οι οποίες έχουν διεξαχθεί σε παραπλήσιες συνθήκες. Προσπάθεια κατεβλήθη ώστε να ρυθμιστούν οι στροφές των δύο πτερωτών με τη μικρότερη δυνατή απόκλιση από τις στροφές αναφοράς, αν και το χειριστήριο ελέγχου στροφών τόσο της πρώτης όσο και της δεύτερης παροχής δεν παρέχουν την απαραίτητη γι' αυτό το σκοπό ακρίβεια. Στον πίνακα 3.1 παραθέτονται οι επικρατούσες συνθήκες κατά τη διεξαγωγή των αντιπαραβαλλόμενων μετρήσεων.

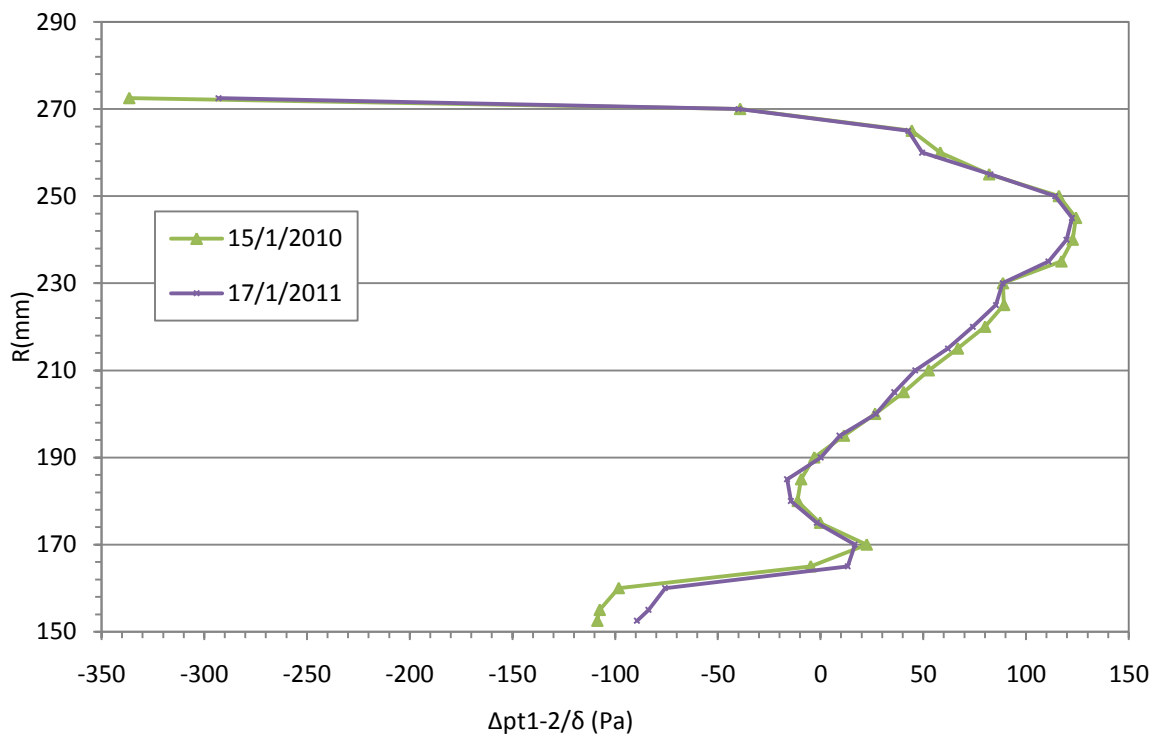
Ημερομηνία	Pamb(Pa)	Tamb(°C)	Rh%	RPM1	RPM2	MassFlow(kg/s)
15/1/2010	99385	21.9	36.2	802	1201	5.43
17/1/2011	100152	18.03	37.2	801	1201	5.55
18/1/2011	99820	17.98	40.1	797	1216	5.33

Πίνακας 3.1: Ημερομηνία διεξαγωγής των μετρήσεων, ατμοσφαιρικές συνθήκες και παράμετροι λειτουργίας της εγκατάστασης

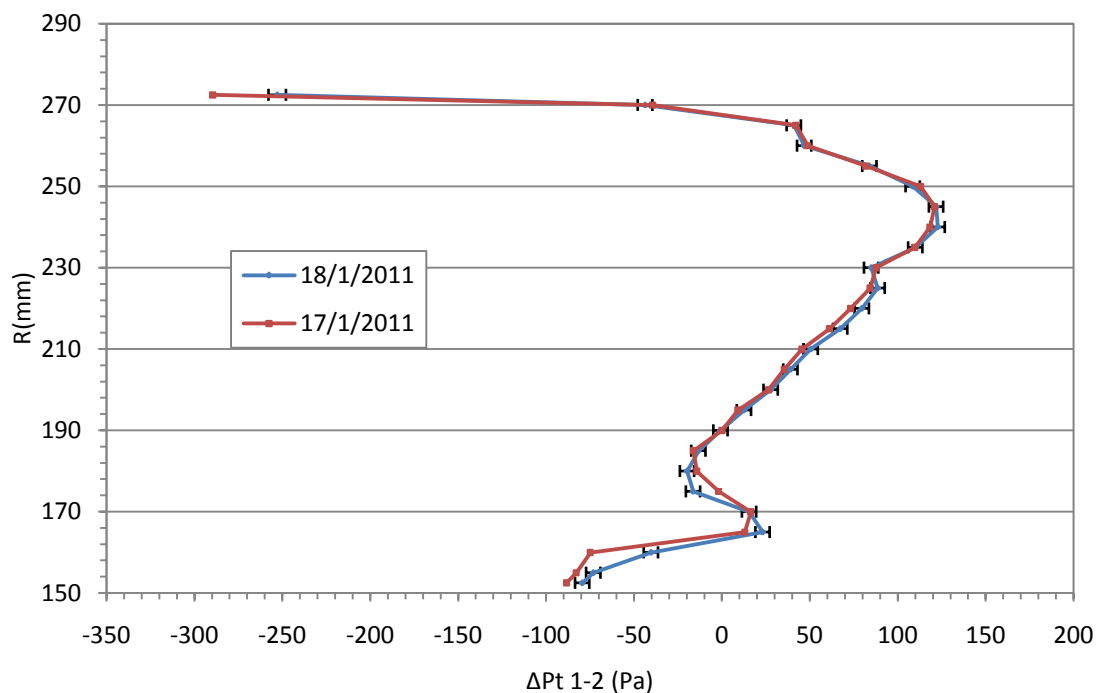
Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν την ακτινική κατανομή της αύξησης της πίεσης στον πρώτο ρότορα τόσο σε απόλυτες τιμές (Σχήμα 3.1) όσο και σε ανηγμένες τιμές (Σχήμα 3.2). Και στα δύο διαγράμματα οι μετρήσεις έχουν χρονική απόσταση ενός έτους (15/1/2010 -17/1/2011). Η μέτρηση που διεξήχθη το 2010 προέρχονται από τη διπλωματική εργασία του Χ. Αμπάτη^[1]. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται και σύγκριση μετρήσεων δύο διαδοχικών ημερών (17&18/1/2011). Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο διάγραμμα αφενός επειδή η ακτινική απεικόνιση επιτρέπει άμεση σύγκριση σε κάθε μέτρηση, αφετέρου επειδή η αύξηση της ολικής πίεσης μας απαλλάσσει εν μέρει από τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες.



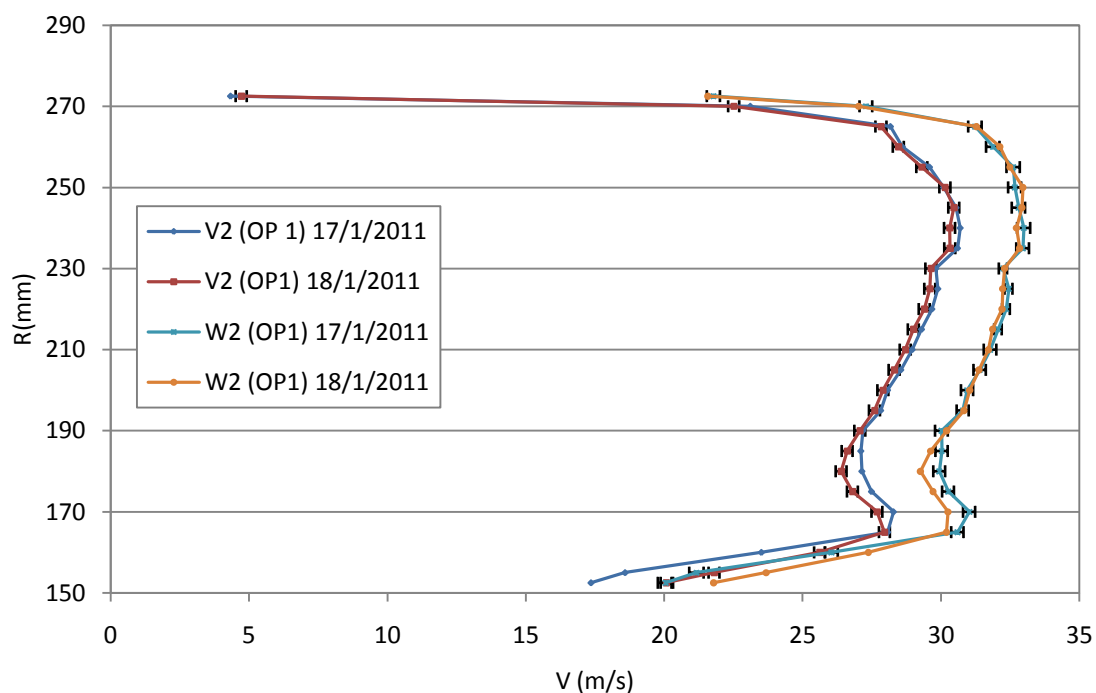
Σχήμα 3.1: Σύγκριση μετρήσεων 2010-2011. Απόλυτες τιμές ακτινικής κατανομής αύξησης ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα & περιθώριο σφάλματος



Σχήμα 3.2: Σύγκριση μετρήσεων 2010-2011. Ανηγγόμενες τιμές ακτινικής κατανομής αύξησης ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα μεταξύ μετρήσεων χρονικής διαφοράς ενός έτους.



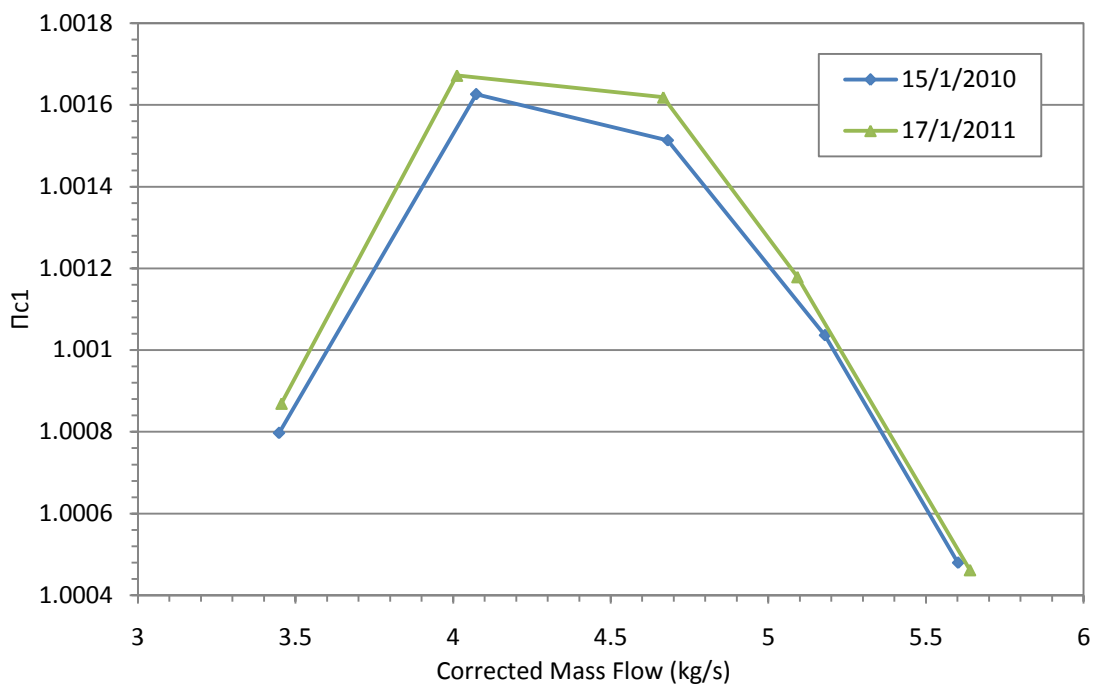
Σχήμα 3.3: Σύγκριση απόλυτων τιμών ακτινικής κατανομής αύξησης ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα μεταξύ μετρήσεων δυο διαδοχικών ημερών & περιθώριο σφάλματος



Σχήμα 3.4: Σύγκριση απόλυτης (V) και σχετικής (W) ταχύτητας στη θέση 2 μεταξύ μετρήσεων δυο διαδοχικών ημερών & περιθώριο σφάλματος.

Πέραν του σημείου λειτουργίας μέγιστης παροχής κρίθηκε αναγκαίο να διερευνήσουμε την συμπεριφορά της εγκατάστασης σε όλο το εύρος της παροχής. Ο τρόπος με τον οποίο ρυθμίζεται η παροχή και συνεπώς το σημείο

λειτουργίας της βαθμίδας, καθιστά πολύ δύσκολη την επίτευξη συγκεκριμένης τιμής. Επιπλέον, το σημείο λειτουργίας ορίζεται από την τιμή της διορθωμένης παροχής, μέγεθος το οποίο δεν είναι διαθέσιμο σε πραγματικό χρόνο. Είναι αναμενόμενο λοιπόν, παρά την προσπάθεια για αναπαραγωγή των ιδίων συνθηκών, τα σημεία λειτουργίας να μην ταυτίζονται και να παρουσιάζουν απόκλιση. Το διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 3.4) απεικονίζει την χαρακτηριστική καμπύλη λόγου πίεσης – παροχής όπως μετρήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και συγκρίνεται με την αντίστοιχη μέτρηση από τη διπλωματική εργασία του Χ. Αμπάτη ^[1].



Σχήμα 3.5: Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων λόγου πίεσης-διορθωμένης παροχής (P_{c1} - m_{cor}) πρώτου ρότορα, μετρήσεων χρονικής διαφοράς ενός έτους

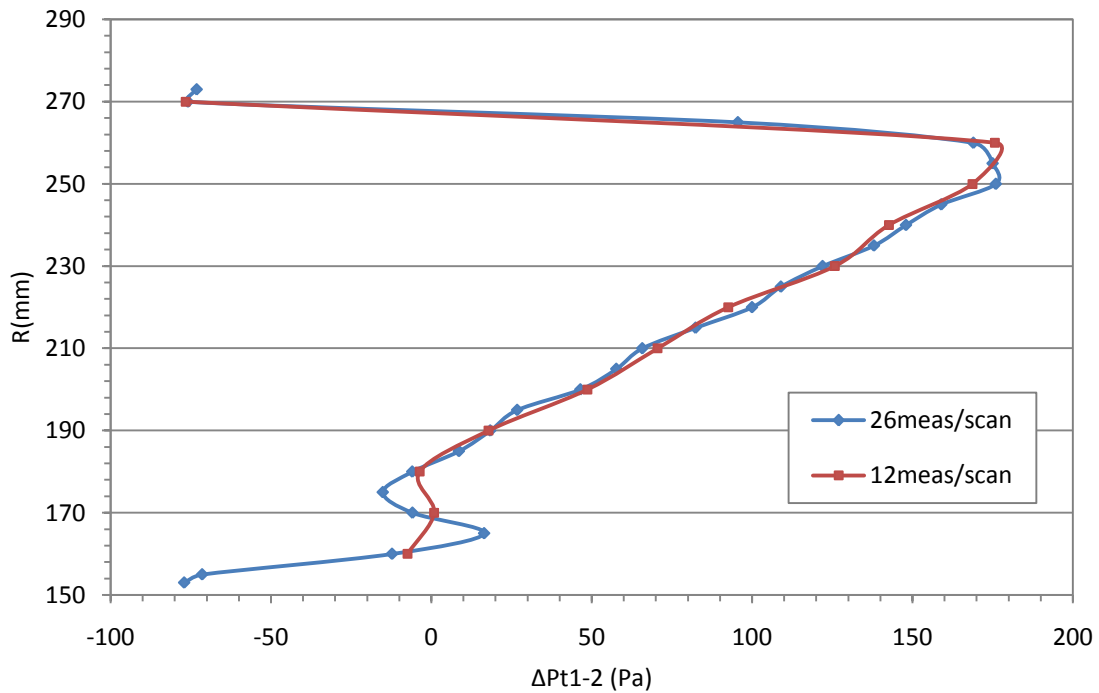
Όσον αφορά στην ακτινική σύγκριση, παρατηρούμε ότι η εγκατάσταση παρουσιάζει εξαιρετική επαναληψιμότητα. Ακόμα και οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζονται στα 260&230 χιλιοστά καθώς και στην προβληματική περιοχή του hub του πτερυγίου είναι ταυτόσημες με αυτές των προηγούμενων μετρήσεων.

Η σύγκριση πλήρους εύρους παροχής φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση από την αντίστοιχη ακτινική, όπως ήταν αναμενόμενο. Ωστόσο, αν λάβουμε υπ' όψιν τις προαναφερθείσες δυσκολίες, και ιδιαίτερα το γεγονός ότι τα σημεία λειτουργίας δεν αναφέρονται σε ίδιες τιμές παροχής, τότε τα αποτελέσματα είναι άκρως ικανοποιητικά καθώς οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν μεγάλη ταύτιση τόσο σε σχήμα όσο και σε τιμές.

Η επιβεβαίωση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων είναι άκρως σημαντική για την αξιοπιστία της εγκατάστασης και κατ'επέκταση του πειραματικού έργου που γίνεται σε αυτή. Μεγάλη βαρύτητα έχει η σύγκριση μετρήσεων σημαντικής χρονικής διαφοράς μεταξύ τους (Σχήμα 3.2) καθώς καταδεικνύει την σταθερή απόδοση της μετρητικής αλυσίδας. Η μετρητική αλυσίδα αποτελεί το πιο επιρρεπές σε αποκλίσεις στοιχείο της εγκατάστασης λόγω του πλήθους των εξαρτημάτων τα οποία λειτουργούν βάσει καμπύλων βαθμονόμησης (σωλήνες πίεσης, μεταλλάκτες πίεσης κ.ά.). Οι μετρήσεις έδειξαν ότι δεν υπάρχει ανάγκη επαναβαθμονόμησης.

3.2 Επίδραση του πλήθους των ακτινικών μετρήσεων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων

Η διαδικασία της λήψης μετρήσεων των μεγεθών της ροής αποτελείται κατά κύριο λόγο από την ακτινική σάρωση του καναλιού ροής και λήψη μετρήσεων σε προκαθορισμένα ακτινικά σημεία. Παράγοντες όπως η ταχύτητα μετατόπισης και περιστροφής των σωλήνων πίεσης και οι λοιπές εργασίες που απαιτούνται για την καταγραφή των δεδομένων σε κάθε ακτινικό σημείο, καθιστούν την όλη διαδικασία της λήψης μετρήσεων χρονοβόρα και αντιπαραγωγική. Γι' αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμο να προσδιορίσουμε το ελάχιστο απαραίτητο πλήθος μετρήσεων ανά σάρωση του οποίου τα αποτελέσματα δεν αποτελούν συμβιβασμό ως προς την ακρίβεια των υπολογιζόμενων μεγεθών. Η μείωση του πλήθους των μετρήσεων ανά σάρωση μας επέτρεψε να αυξήσουμε τα σημεία λειτουργίας ανά χαρακτηριστική και συνεπώς να κατανοήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά του συμπιεστή. Το κανάλι ροής έχει ύψος 122.5 mm και το διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων μέτρησης είχε οριστεί στα 5mm το οποίο απαιτούσε, συνυπολογίζοντας 2 μετρήσεις στις ακραίες θέσεις μετατόπισης του σωλήνα πίεσης (2.5 & 122.5 mm), 26 μετρήσεις ανά σάρωση. Αυξάνοντας το μεσοδιάστημα των σημείων της σάρωσης στα 10mm και καταργώντας τις μετρήσεις στα ακραία σημεία οι οποίες δεν προσέφεραν σημαντική πληροφορία για τη συμπεριφορά του πτερυγίου, μειώσαμε τον αριθμό των μετρήσεων στις 12. Ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα (Διάγραμμα 3.5) της αύξησης της ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα. Και εδώ οι δύο αντιπαραβαλλόμενες μετρήσεις είναι μετρήσεις βάσεις, δηλαδή 800-1200 RPM και ακτινικό διάκενο 2 χορδές.



Σχήμα 3.5: Σύγκριση της αύξησης της ολικής πίεσης καθ' ύψος του πτερυγίου μεταξύ σαρώσεων με 12 & 26 σημεία

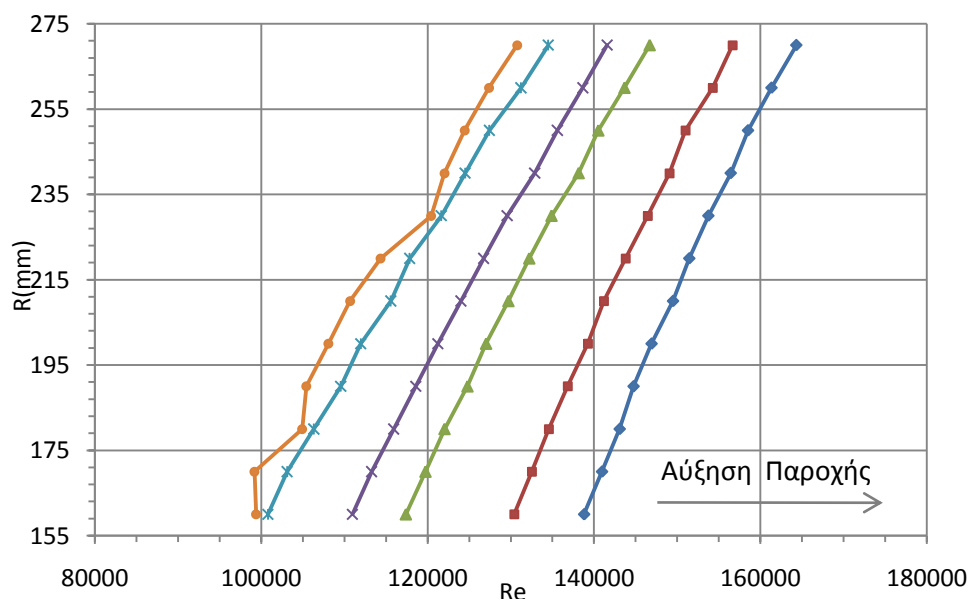
Παρατηρούμε ότι η αναπαράσταση της ακτινικής κατανομής της αύξησης της ολικής πίεσης είναι αρκετά πιστή ακόμα και με 12 μετρήσεις ανά σάρωση. Απόκλιση παρουσιάζεται μόνο στην περιοχή του hub του πτερυγίου, η οποία όμως δεν φαίνεται ικανή να επηρεάσει τα ολοκληρούμενα μεγέθη και να προσθέσει σφάλμα στα αποτελέσματα. Αποφασίστηκε ότι η μετάβαση σε σύστημα 12 ακτινικών μετρήσεων δεν αποτελούσε συμβιβασμό ως προς την ακρίβεια και όλες οι μετρήσεις της παραμετρικής μελέτης αποτελούνται από 12 μετρήσεις ανά σημείο λειτουργίας.

3.3 Διερεύνηση της λειτουργίας του πτερυγίου 1ου ρότορα

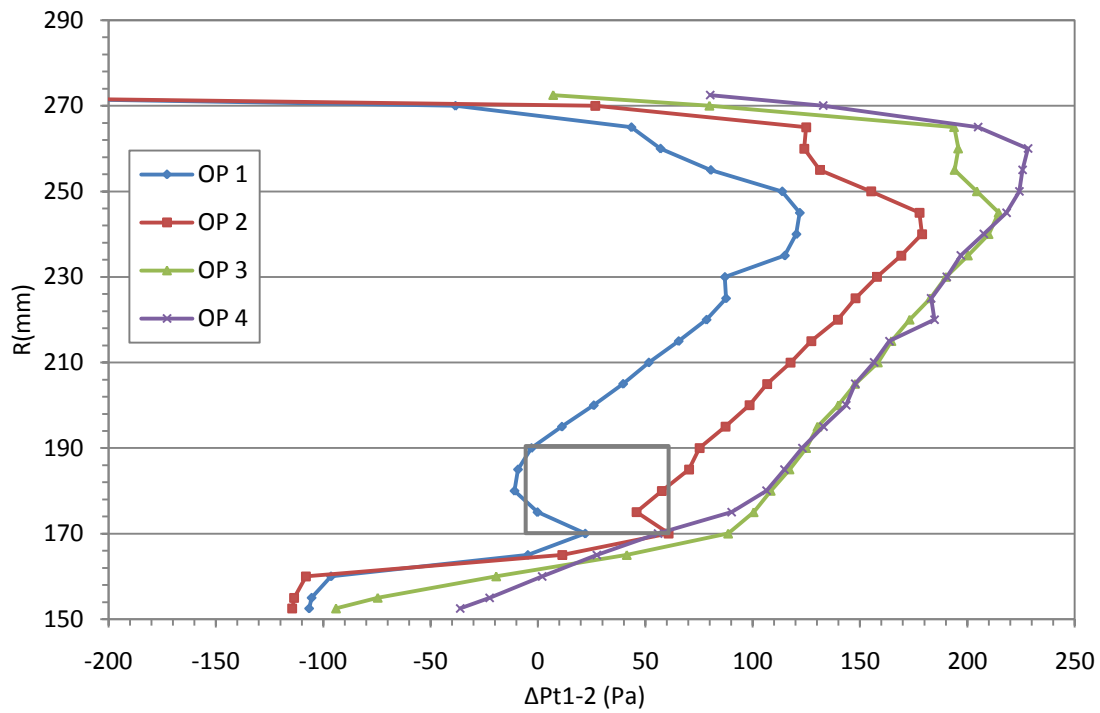
Τόσο οι μετρήσεις προηγούμενων διπλωματικών εργασιών όσο και οι προκαταρκτικές μετρήσεις της παρούσας εργασίας κατέδειξαν προβληματική λειτουργία του πτερυγίου του πρώτου ρότορα στην περιοχή της βάσης και σε ύψος περίπου ίσο με το ένα τρίτο του συνολικού ύψους του πτερυγίου. Η αντίστοιχη συμπεριφορά του δεύτερου ρότορα πιθανότατα εξηγείται από την διαταραγμένη ροή στην έξοδο του πρώτου ρότορα και η διερεύνηση της λειτουργίας του χωρίς επίλυση των προβλημάτων του πρώτου ρότορα είναι άσκοπη. Κρίθηκε απαραίτητο να διερευνήσουμε την ανωμαλία αυτή και κατανοώντας την να προσπαθήσουμε να την εξαλείψουμε.

3.3.1 Ανάλυση δεδομένων ροής

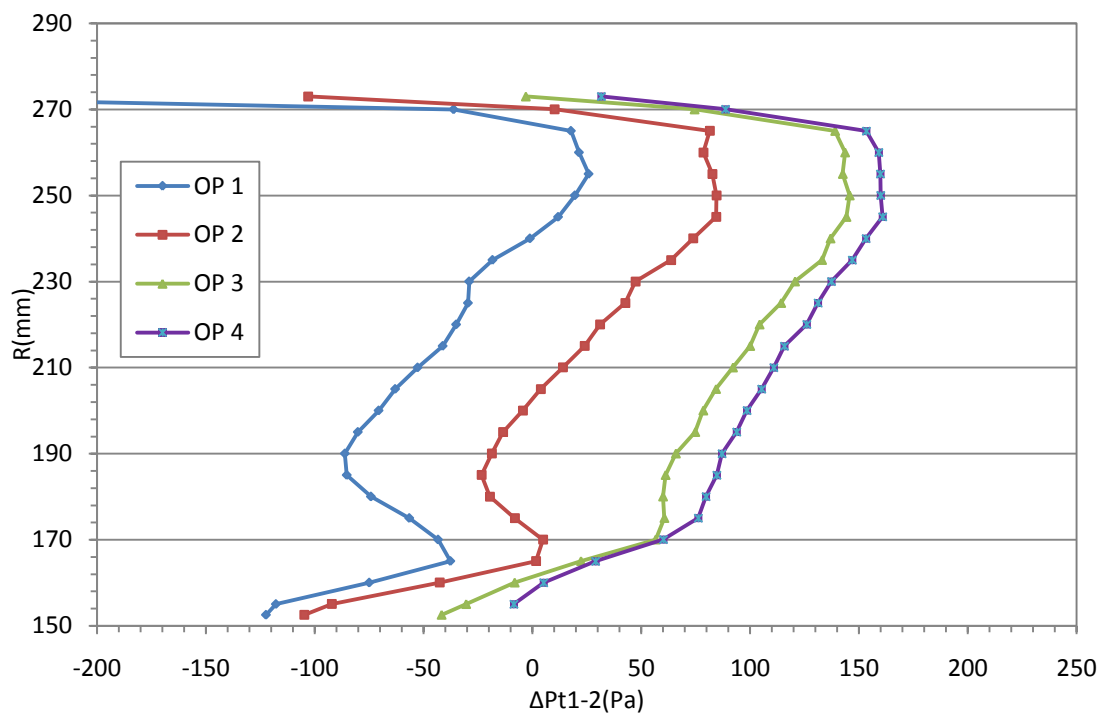
Καταρχήν κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η ανωμαλία αυτή και να εξαχθούν όλα τα δυνατά συμπεράσματα από την ανάλυση των δεδομένων της ροής, προτού καταφύγουμε σε πρακτική αντιμετώπιση του προβλήματος και επέμβαση στη διάταξη. Επιπλέον η ανάλυση των δεδομένων αυτών μας βοηθά στην επιλογή των σωστών ρυθμίσεων ώστε η διάταξη να λειτουργεί όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά. Η ανάλυση των δεδομένων συνίσταται σε παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου συναρτήσει τόσο της παροχής όσο και των γωνιών stagger των πτερυγίων. Εφόσον οι αριθμοί Reynolds που επιτυγχάνονται από τη συγκεκριμένη διάταξη σε όλο το εύρος λειτουργίας, δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη τυρβώδους οριακού στρώματος, η ταχύτητα του ρευστού στο πτερύγιο δεν αναμένεται να αλλάξει δραματικά τη μορφή της εξέλιξης του φαινομένου. Γι αυτούς τους λόγους επιλέξαμε για τη σύγκριση τις τυπικές συνθήκες 800-1200 RPM. Ακολουθεί διάγραμμα με τις μέγιστες τιμές Reynolds που έχουν επιτευχθεί από τον πρώτο ρότορα (Σχήμα 3.6). Κατόπιν ακολουθεί αντιπαραβολή διαγραμμάτων που απεικονίζουν την αύξηση της ολικής πίεσης καθ' ύψος του πτερυγίου στα διάφορα σημεία λειτουργίας. Κάθε ένα από τα διαγράμματα αντιστοιχεί σε διαφορετικό ζεύγος γωνιών stagger.



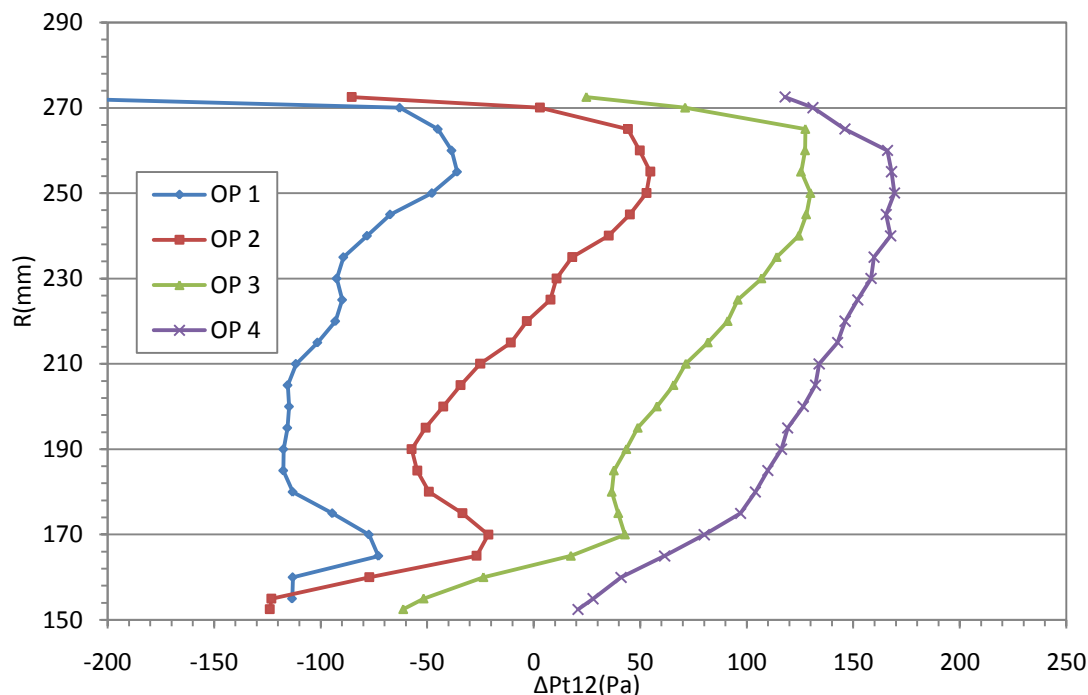
Σχήμα 3.6: Αριθμός Reynolds καθ' ύψος του πτερυγίου για τα 6 σημεία λειτουργίας. Η μέτρηση αφορά τις μέγιστες στροφές 1500-1500RPM και αξονικό διάκενο 2 χορδές.



Σχήμα 3.7: Εξέλιξη της ανωμαλίας της ροής για ζεύγος γωνιών stagger 30° - 43° . Το ορθογώνιο υποδεικνύει την περιοχή διερεύνησης του Σχήματος 3.10.

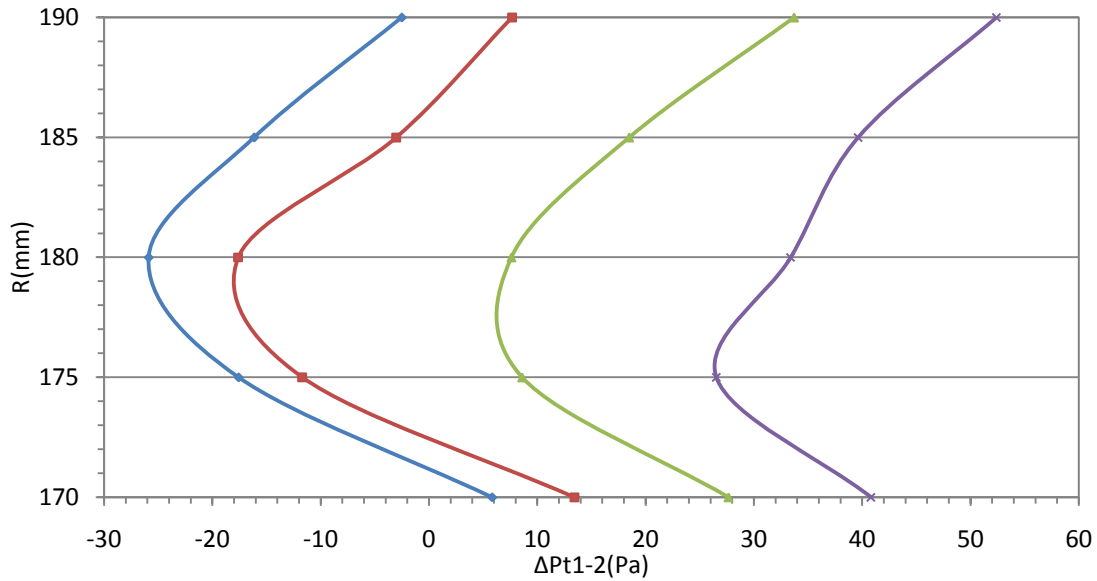


Σχήμα 3.8: Εξέλιξη της ανωμαλίας της ροής για ζεύγος γωνιών stagger 43° - 53° .



Σχήμα 3.9: Εξέλιξη της ανωμαλίας της ροής για ζεύγος γωνιών stagger 43° - 43°

Απο την παραπάνω σύγκριση (Σχήματα 3.7 3.8 & 3.9) είναι εμφανές οτι τα πλέον ενθαρυντικά αποτελέσματα προκύπτουν για ζεύγος γωνιών 30° - 43° . Τα άλλα δύο ζεύγη λειτουργούν παρουσιάζουν απογοητευτική συμπεριφορά στα σημεία λειτουργίας μεγάλης παροχής και αργούν να μεταβούν στην ωφέλιμη περιοχή λειτουργίας. Επιπλέον η μέγιστη αύξηση ολικής πίεσης είναι εμφανώς μικρότερη απο την αντίστοιχη του ζεύγους 30° - 43° . Παρατηρούμε ωστόσο σε όλα τα ζεύγη γωνιών οτι πέραν της γνωστής ανωμαλίας της ροής στη βάση του πτερυγίου, στα σημεία λειτουργίας μεγάλης παροχής, το πτερύγιο δεν λειτουργεί σωστά ούτε στην περιοχή 170-190mm. Είναι εμφανής η παρουσία στροβίλων οι οποίοι αποτυπώνονται ως δύο περιοχές εναλλαγής της μεταβολής της ολικής πίεσης απο τα θετικά στα αρνητικά. Είναι λοιπόν απαραίτητο να διερευνήσουμε την εξέλιξη του δεύτερου αυτού φαινομένου απο το σημείο μέγιστης παροχής, όπου το κομμάτι αυτό λειτουργεί δεν λειτουργεί σωστά και έχουμε πτώση πίεσης, μέχρι το σημείο όπου με την πτώση της παροχής το πτερύγιο λειτουργεί σωστά. Για το λόγο αυτό κάνουμε 4 επιπλέον σαρώσεις για το βέλτιστο ζεύγος γωνιών, μεταξύ των 2 πρώτων σημείων λειτουργίας για να οπτικοποιήσουμε την εξέλιξη της δεύτερης αυτής ανωμαλίας (Σχήμα 3.10). Απο το διάγραμμα που ακολουθεί είναι εμφανές οτι το φαινόμενο εξελίσσεται ομαλά και όσο μειώνεται η παροχή και αυξάνεται ο λόγος πίεσης η ροή «κολλάει» στο πτερύγιο και μειώνεται η επίδραση των στροβίλων.



Σχήμα 3.10: Εξέλιξη της ανωμαλίας της ροής στο πτερύγιο του πρώτου ρότορα, σε ύψος 170-190 mm μεταξύ των 2 πρώτων σημείων λειτουργίας, μειούμενης παροχής κατά μήκος της χαρακτηριστικής 800-1200_2c_30-43

3.3.2 Διαμόρφωση οπών στον δίσκο-φορέα των πτερυγίων του πρώτου ρότορα.

Κατά την κατασκευή του δίσκου-φορέα των πτερυγίων του πρώτου ρότορα διανοίχθηκαν οπές για την συγκράτηση των πτερυγίων με περικόχλια. Σε αντίθεση με αυτή των πτερυγίων του δεύτερου ρότορα, η διαμόρφωση του hub των πτερυγίων του πρώτου ρότορα είναι τέτοια που ενώ το πτερύγιο καθαυτό εφάπτεται στην περιφέρεια του δίσκου, η βάση που φέρει το σπείρωμα εισέρχεται στην οπή και αφήνει ημικυκλικό κενό εκατέρωθεν του πτερυγίου. Η παρουσία 2 στροβίλων στη βάση του πτερυγίου μας οδήγησε στην υπόθεση ότι η ύπαρξη των οπών στο συγκεκριμένο σημείο δημιουργεί την αποκόλληση αυτή, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του δεύτερου ρότορα.

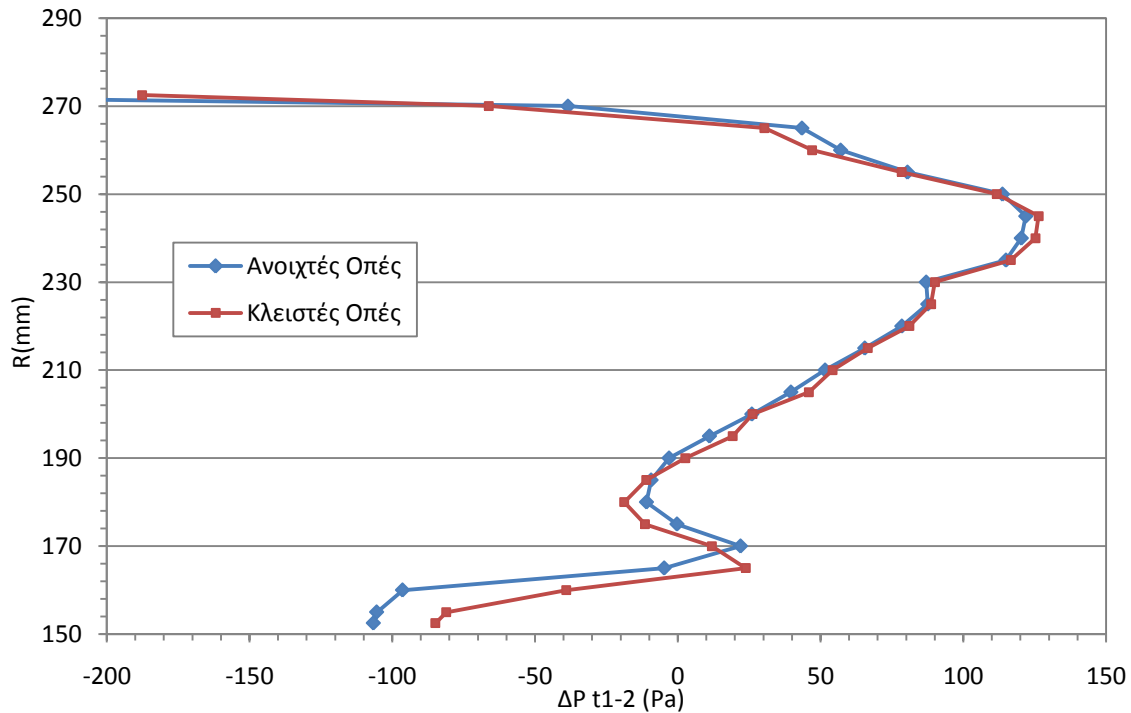
Για την αντιμετώπιση του προβλήματος προτάθηκε η κάλυψη των οπών. Η πλήρωση θα έπρεπε να γίνει με υλικό το οποίο θα είναι αρκετά εύπλαστο ώστε να πάρει πλήρως τη μορφή της οπής, να μπορεί να αντέξει τα φυγοκεντρικά φορτία ακόμα και στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής καθώς επίσης να μπορεί να διαμορφωθεί έτσι ώστε η εκτεθειμένη στο ρεύμα αέρα επιφάνειά του να είναι ικανοποιητικά λεία. Επιπλέον θα έπρεπε να επιτρέπει τη ρύθμιση της γωνίας stagger των πτερυγίων, μια διαδικασία που πέραν της περιστροφής συνήθως απαιτεί και αφαίρεση του πτερυγίου. Καθώς οι περιορισμοί ήταν απαγορευτικοί για τις περισσότερες μόνιμες λύσεις, επιλέξαμε να κάνουμε κάποιες δοκιμές με

προσωρινή τοποθέτηση αλουμινοταινίας και αν τα αποτελέσματα καταδείξουν τη χρησιμότητα της κάλυψης των οπών να προχωρήσουμε σε μια μόνιμη λύση. Η αλουμινοταινία επιλέχθηκε ως υλικό χάρη στην πλαστικότητα της ακόμα και κατόπιν της τοποθέτησης. Με προσεκτικές κινήσεις, η αλουμινοταινία μπορεί να ακολουθήσει τη γεωμετρία του πτερυγίου επακριβώς χωρίς ανωμαλίες, ακόμα και στις ακμές εκφυγής και πρόσπτωσης, χαρακτηριστικό άκρως επιθυμητό κατά την διερεύνηση αποκόλλησης της ροής.



Φωτογραφία 3.1: Τοποθετημένη αλουμινοταινία για την κάλυψη των οπών στο hub του πτερυγίου του πρώτου ρότορα.

Κατόπιν της τοποθέτησης της αλουμινοταινίας πραγματοποιήσαμε την μέτρηση αναφοράς ($800-1200 \text{ RPM} - 2c \ 30^{\circ}-43^{\circ}$) και συγκρίναμε τις νέες επιδόσεις (αύξηση ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα) με τις παλαιότερες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 3.11. Παρατηρούμε ότι παρά την κάλυψη των οπών δεν σημειώθηκε βελτίωση στη λειτουργία του πτερυγίου. Η αύξηση της ολικής πίεσης παρέμεινε στα ίδια επίπεδα και ακολουθεί την μορφή των προηγούμενων μετρήσεων επακριβώς. Η παρουσία των στροβίλων δεν επηρεάστηκε ούτε σε μέγεθος ούτε σε ένταση. Προφανώς οι οπές στο hub δεν επηρεάζουν τη ροή στο βαθμό που υποθέταμε και το πρόβλημα έγκειται αλλού, πιθανότατα στη γεωμετρία του ίδιου του πτερυγίου. Επακριβής διάγνωση του προβλήματος απαιτεί προσεκτική μελέτη των δεδομένων της ροής για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του πτερυγίου. Αναφέρουμε ότι το πτερύγιο δεν έχει σχεδιαστεί για την συγκεκριμένη εγκατάσταση και πιθανότατα δεν λειτουργεί σωστά.



Σχήμα 3.11: Σύγκριση αύξησης ολικής πίεσης καθ' ύψος του περυγίου προ και κατόπιν κάλυψης των οπών στο hub.

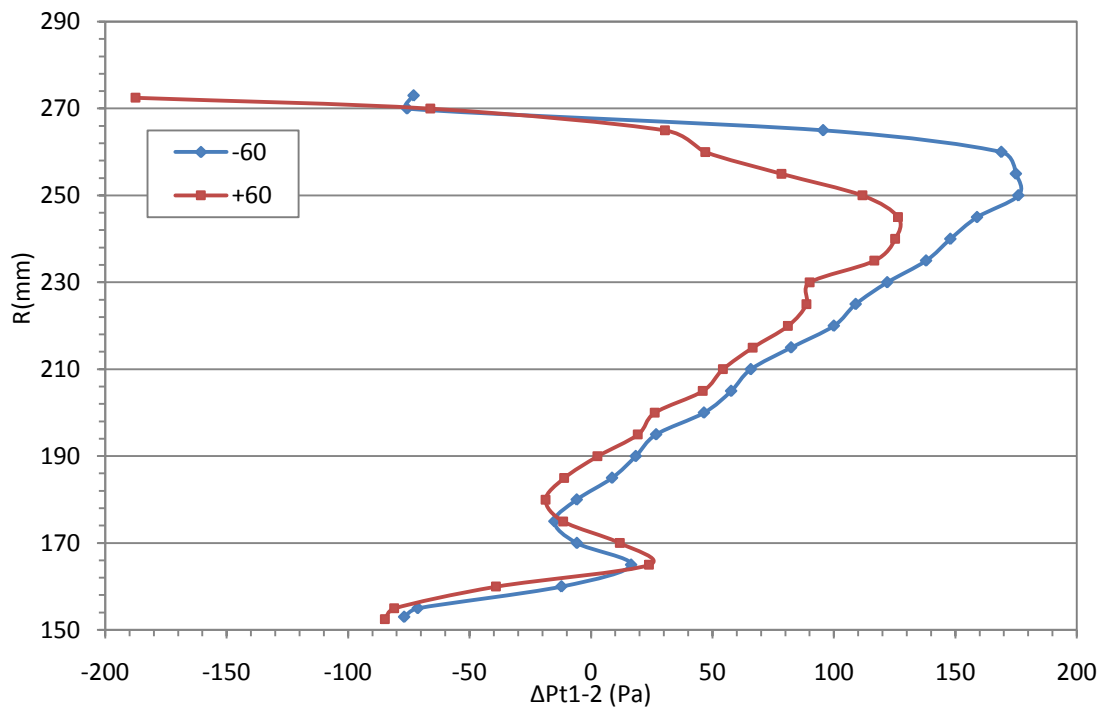
3.4 Διερεύνηση περιφερειακής ανομοιομορφίας στο κανάλι ροής

Στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας λήφθηκαν μέτρα ώστε η ροή στην είσοδο του αγωγού να είναι όσο το δυνατόν πιο στρωτή και ομοιόμορφη. Τοποθετήθηκε αγωγός εισόδου Bell mouth για την εξομάλυνση της ροής κατά την είσοδο στον αγωγό καθώς επίσης πλέγμα honeycomb για την απαλοιφή στροβίλων. Ωστόσο υπάρχουν παράγοντες οι οποίοι διαταράσσουν τη ροή και δεν είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν. Πέραν της γεωμετρίας του χώρου, η κυριότερη αιτία διατάραξης της ροής είναι η έδραση του άξονα της πρώτης περωτής, η οποία βρίσκεται στο κέντρο του αγωγού εισόδου, με αποτέλεσμα τα νεύρα στήριξης των εδράνων να είναι εκτεθειμένα στο ρεύμα του εισερχόμενου αέρα. Η παρουσία τους στο συγκεκριμένο σημείο δημιουργεί στρόβιλους στο κάτω ημικύκλιο του αγωγού, οποίοι είναι αδύνατον να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά από ένα πλέγμα honeycomb, παρά γεγονός ότι έχει αφεθεί σημαντικό μήκος αγωγού από την είσοδο μέχρι την πρώτη περωτή για την απόσβεση τέτοιων φαινομένων. Για τους λόγους αυτούς, οι σωλήνες πίεσης είναι τοποθετημένοι στο άνω ημικύκλιο και σε θέση 60° μοιρών από την κορυφή του αγωγού.

Στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας (Διπλωματική Εργασία Χ.Αμπάτη ^[1]), η σύγκριση δεδομένων στατικής πίεσης οδήγησε στην υπόθεση ύπαρξης περιφερειακής ανομοιομορφίας στο κανάλι ροής. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι σε κάποια σημεία λειτουργίας η στατική πίεση από τον σωλήνα πίεσης Ps1 κοντά στο τοίχωμα και η στατική πίεση που μετράται από τις οπές στο κέλυφος Ps1wt, παρουσιάζουν απόκλιση. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι στα δύο τελευταία σημεία λειτουργίας (P.4 & P.5) οι μετρούμενες στατικές πιέσεις είναι αρκετά διαφορετικές (διαφορά 50Pa).

Λόγω της ιδιόζουσας περίπτωσης της συγκεκριμένης διάταξης όσον αφορά στην διατάραξη του ρεύματος εισόδου, είναι δεδομένο ότι θα υπάρχει μια κάποια περιφερειακή ανομοιομορφία στα χαρακτηριστικά της ροής. Αυτό που προσπαθούμε να διαπιστώσουμε είναι το μέγεθος της ανομοιομορφίας αυτής στο άνω ημικύκλιο του αγωγού. Μια από τις βασικότερες παραδοχές όλων των μετρήσεων που διεξάγονται στην συγκεκριμένη διάταξη είναι ότι τα χαρακτηριστικά της ροής που μετρούμε στο σημείο που βρίσκονται οι σωλήνες πίεσης, επικρατούν και στο σύνολο της διατομής του αγωγού. Δεδομένου ότι οι σωλήνες πίεσης βρίσκονται στο πιο ανεπηρέαστο κομμάτι της ροής, αυτή η παραδοχή προσομοιάζει μια ιδανική κατάσταση της ροής μέσα στον αγωγό. Ωστόσο είναι σκόπιμο να εξετάσουμε τον ρεαλισμό της παραδοχής αυτής. Για το λόγο αυτό αποφασίσαμε να διεξάγουμε την τυπική μέτρηση (800-1200 RPM, 2c ακτινική απόσταση πτερωτών, 30⁰-43⁰ γωνίες stagger) στο άλλο τεταρτοκύκλιο του καθαρού κομματιού της ροής, στις -60⁰ μοίρες, συμμετρικά του αρχικού σημείου μέτρησης ως προς την κορυφή του αγωγού.

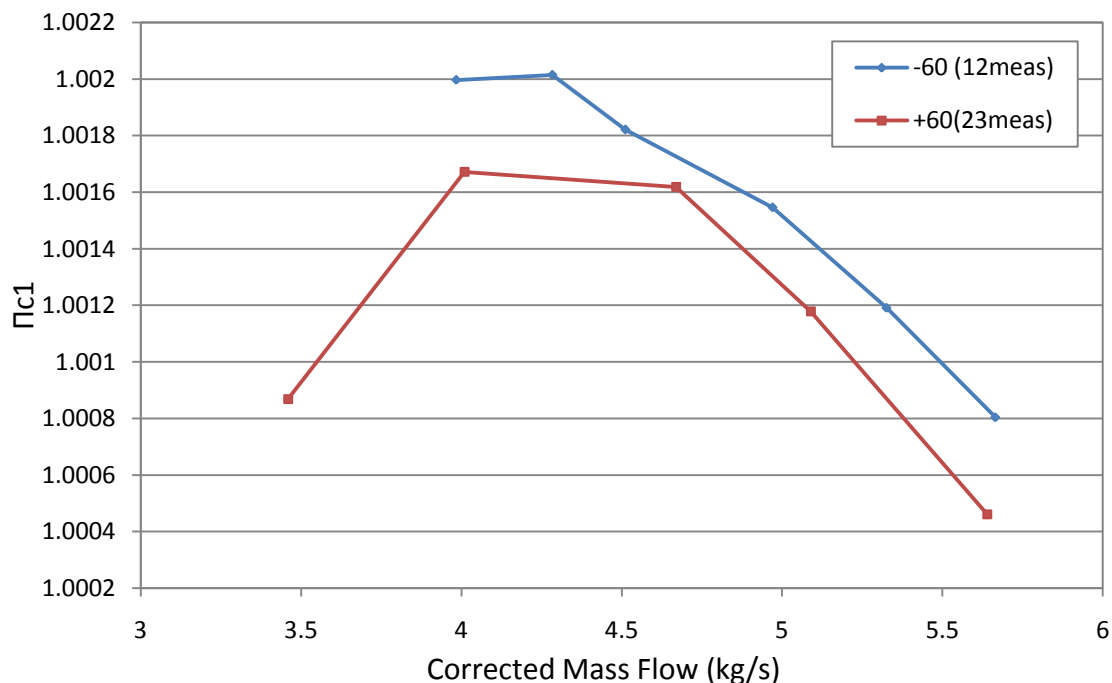
Στο διάγραμμα 3.12 απεικονίζεται η αύξηση της ολικής πίεσης που επιτυγχάνεται στον πρώτο ρότορα με τους σωλήνες πίεσης στις -60 μοίρες έναντι της μέτρησης στις +60 μοίρες.



Σχήμα 3.12: Σύγκριση αύξησης ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα σε συμμετρικά σημεία του καναλιού ροής

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.12 παρατηρούμε βελτιωμένη συμπεριφορά του πτερυγίου σε όλο του το μήκος. Ιδιαίτερα δε στην περιοχή 230-270mm η οποία δουλεύει πάντα πιο αποδοτικά από το υπόλοιπο πτερύγιο. Στην περιοχή αυτή η αύξηση της ολικής πίεσης είναι σαφώς μεγαλύτερη και το διάγραμμα βοηθάει στην οπτικοποίηση της διαφοράς που θα προκύψει στον λόγο πίεσης του συγκεκριμένου σημείου λειτουργίας κατόπιν της ολοκλήρωσης των μεγεθών της πίεσης. Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η ανωμαλία που παρουσιάζει η ροή σε ύψος 260mm απουσιάζει εντελώς στο νέο σημείο μετρήσεων. Στο σημείο αυτό η μορφή του διαγράμματος υποδεικνύει την ύπαρξη μη-στρωτής ροής

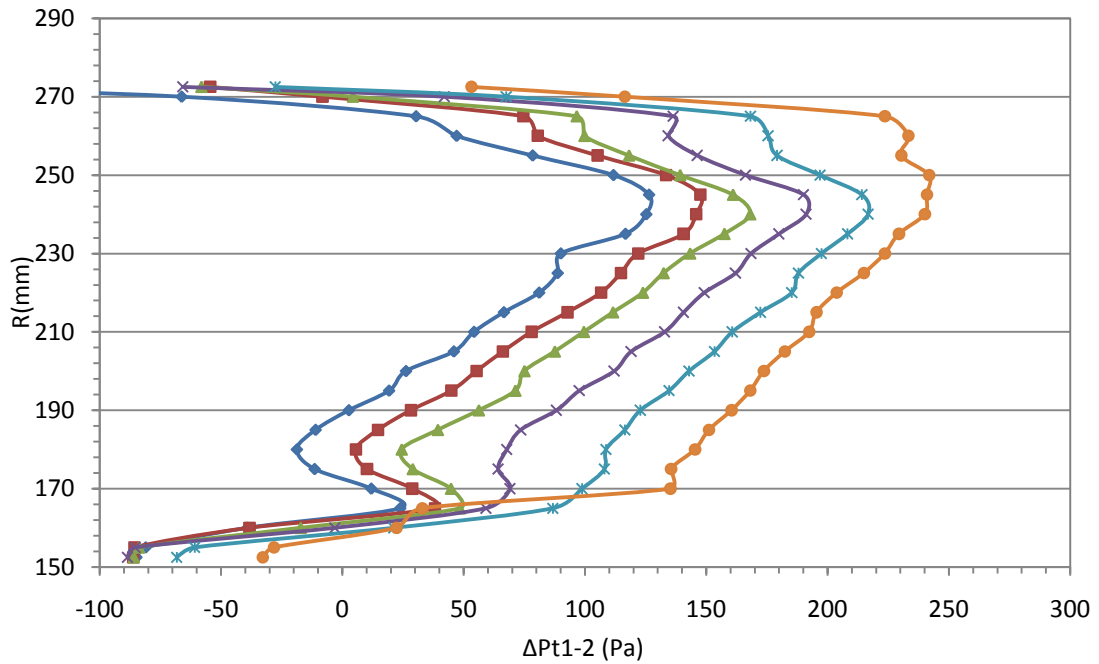
Ακολουθεί διάγραμμα (Σχήμα 3.13) που αντιπαραβάλλει τις χαρακτηριστικές καμπύλες λόγου πίεσης-παροχής της βαθμίδας όπως αυτές προκύπτουν από τις μετρήσεις σε συμμετρικά σημεία του καναλιού ροής (+60 & - 60 μοίρες). Καθώς ο αριθμός των ακτινικών σημείων μέτρησης διέφερε (12 σημεία ανά σάρωση στις -60 και 26 στις +60) πραγματοποιήθηκε μια σάρωση στις -60 μοίρες με 26 μετρήσεις με τη βάνα στραγγαλισμού τελείως ανοιχτή (σημείο λειτουργίας μέγιστης παροχής). Η μέτρηση αυτή είχε ως σκοπό την επιβεβαίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων με λιγότερες μετρήσεις ανά σάρωση και στο νέο σημείο μετρήσεων (-60°).



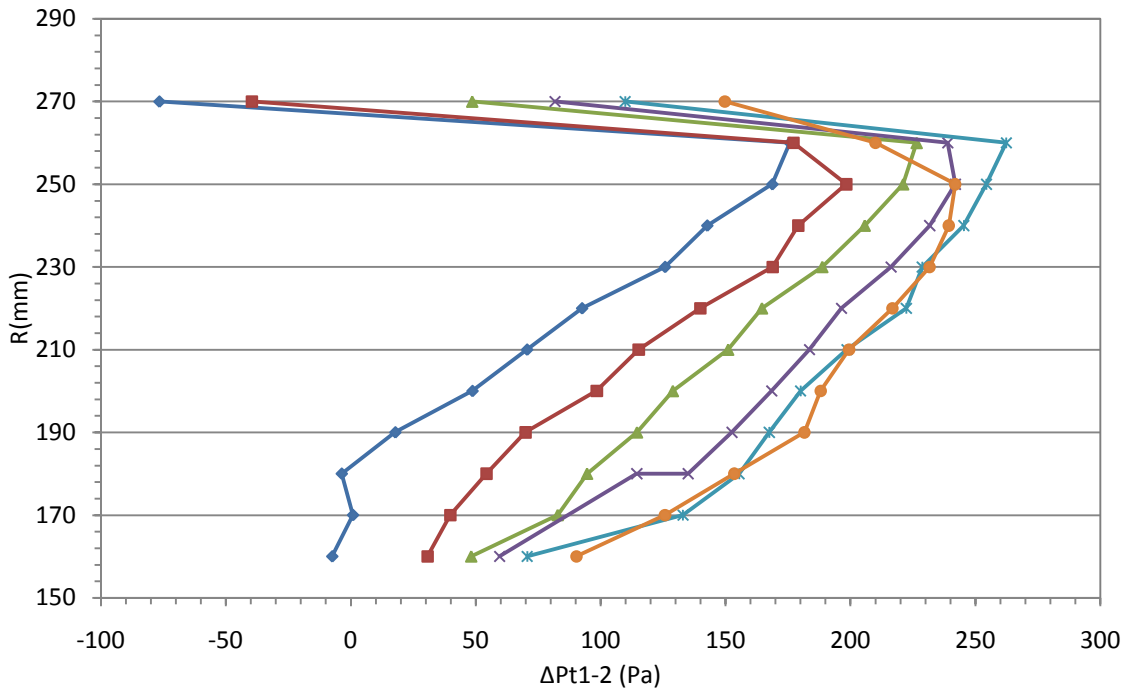
Σχήμα 3.13: Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων λόγου πίεσης σε συμμετρικά σημεία του καναλιού ροής

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.13 είναι εμφανές ότι η βελτίωση της απόδοσης του ρότορα επεκτείνεται σε όλο το εύρος λειτουργίας καθώς ο λόγος πίεσης κινείται σε σαφώς μεγαλύτερα επίπεδα. Από μετρήσεις που έγιναν, το σύστημα των 12 σημείων μέτρησης ανά σάρωση δεν φαίνεται να επηρεάζει την ακρίβεια ούτε στη νέα θέση μετρήσεων αφού το σημείο λειτουργίας μέγιστης παροχής στο διάγραμμα πρακτικά ταυτίστηκε με τη μέτρηση 26 σημείων μέτρησης.

Ακολουθούν δύο διαγράμματα (Σχήμα 3.14 & 3.15) που απεικονίζουν την αύξηση της ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα σε κάθε σημείο λειτουργίας. Το πρώτο διάγραμμα αφορά τη θέση των +60 μοιρών και το δεύτερο τη θέση των -60. Η αντιδιαστολή των διαγραμμάτων αυτών βοηθά στην οπτικοποίηση και την κατανόηση της διαφοράς της λειτουργίας του πρώτου ρότορα σε όλο το εύρος της παροχής.



Σχήμα 3.14: Ακτινική απεικόνιση της αύξησης της ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα για τα 6 σημεία λειτουργίας με μέτρηση στις +60°



Σχήμα 3.15: Ακτινική απεικόνιση της αύξησης της ολικής πίεσης στον πρώτο ρότορα για τα 7 σημεία λειτουργίας με μέτρηση στις -60°

Τα διαγράμματα 3.14 & 3.15 καταδεικνύουν την υπεροχή της νέας θέσης μετρήσεων σε κάθε σημείο λειτουργίας. Στο διάγραμμα 3.14 είναι εμφανής μια ανωμαλία σε ύψος περί τα 260mm. Στο σημείο αυτό η αύξηση πίεσης είναι σαφώς μικρότερη της αναμενόμενης, δεδομένης της τάσης για καλύτερη λειτουργία του πτερυγίου όσο βαίνουμε προς το tip. Επιπλέον οι μεγαλύτεροι λόγοι πίεσης στα σημεία λειτουργίας μικρότερης παροχής δεν είναι ικανοί να επιβάλλουν κάποια καλύτερη συμπεριφορά στη ροή και η ανωμαλία παραμένει. Το αντίστοιχο διάγραμμα στις -60° δεν παρουσιάζει την ανωμαλία αυτή σε κανένα σημείο, δίνοντας έτσι μεγαλύτερους λόγους πίεσης. Η ανωμαλία αυτή πιθανότατα οφείλεται σε περιφερειακή ανομοιομορφία της εισερχόμενης ροής η οποία μεταφέρει κάποια τύρβη που δεν αποσβένει στην είσοδο παρά τα μέτρα πρόληψης τέτοιων φαινομένων.

3.5 Μέτρηση καταναλισκόμενης ισχύος

Ήδη από τις προηγούμενες εργασίες στη διάταξη είχε εκφραστεί η ανάγκη επιβεβαίωσης των μεγεθών του βαθμού απόδοσης. Ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης και η ερμηνεία των μεταβολών του άλλωστε αποτελεί ένα από τα «θολά» σημεία της ανοικτής βιβλιογραφίας στο θέμα των C-R διατάξεων.

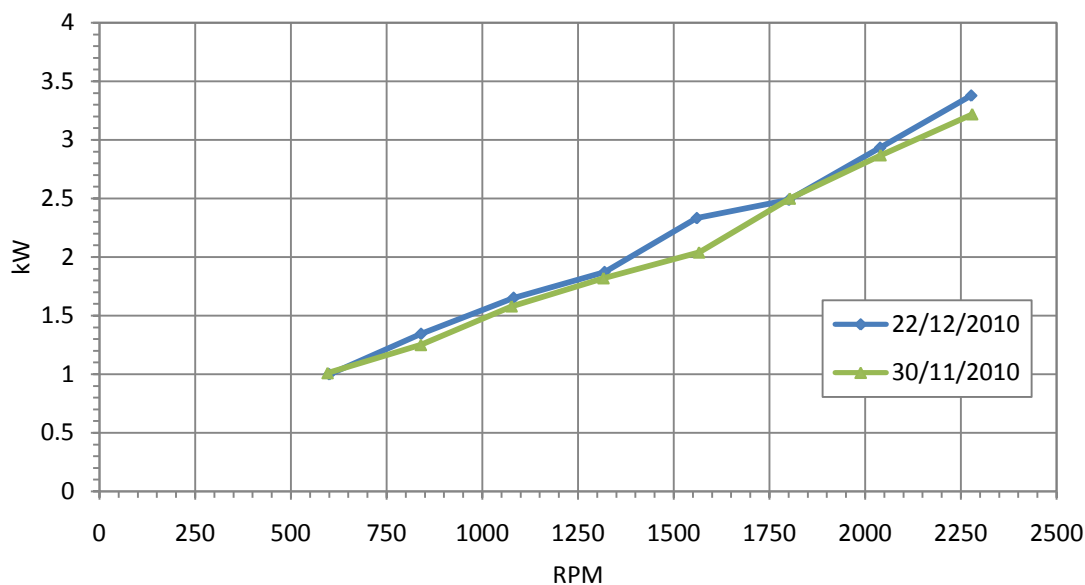
Τον βαθμό απόδοσης των πτερυγώσεων παρέχει ο υπολογιστικός κώδικας CRCALC από τα μεγέθη της ροής. Ο σκοπός των μετρήσεων ισχύος είναι να απαλλαγεί ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης από τα μεγέθη της ροής, τα οποία προσκτώνται μέσω της πολύπλοκης διαδικασίας λήψης και μετάφρασης δεδομένων από τη μετρητική αλυσίδα και περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων αυτών μέσω υπολογιστικού κώδικα. Αν και οι μέχρι τώρα μετρήσεις δεν έχουν αφήσει περιθώρια αμφισβήτησης της αξιοπιστίας της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων, θεωρήσαμε συνετό προχωρήσουμε σε μια μη ρευστομηχανική προσέγγιση του ζητήματος.

Η μέτρηση της καταναλισκόμενης ισχύος έγινε με τη χρήση φορητού αναλυτή ηλεκτρικής ενέργειας του εργαστηρίου (microVIP 3). Αρχικά έπρεπε να υπολογιστούν οι απώλειες της εγκατάστασης σε λειτουργία εν κενό. Χωρίς να είναι τοποθετημένες οι πτερωτές στους άξονες, θέσαμε σε λειτουργία τη διάταξη για να μετρηθεί η ισχύς που καταναλώνεται σε εδράσεις, ηλεκτροκινητήρες, μεταδόσεις κίνησης και τα λοιπά επιμέρους συστήματα που απαρτίζουν την εγκατάσταση. Η μέθοδος αυτή μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την ισχύ που καταναλώνει η εγκατάσταση πλην της ισχύος που μεταφέρεται στο ρευστό, αποκλείοντας το ενδεχόμενο παράβλεψης κάποιων επιμέρους απωλειών.

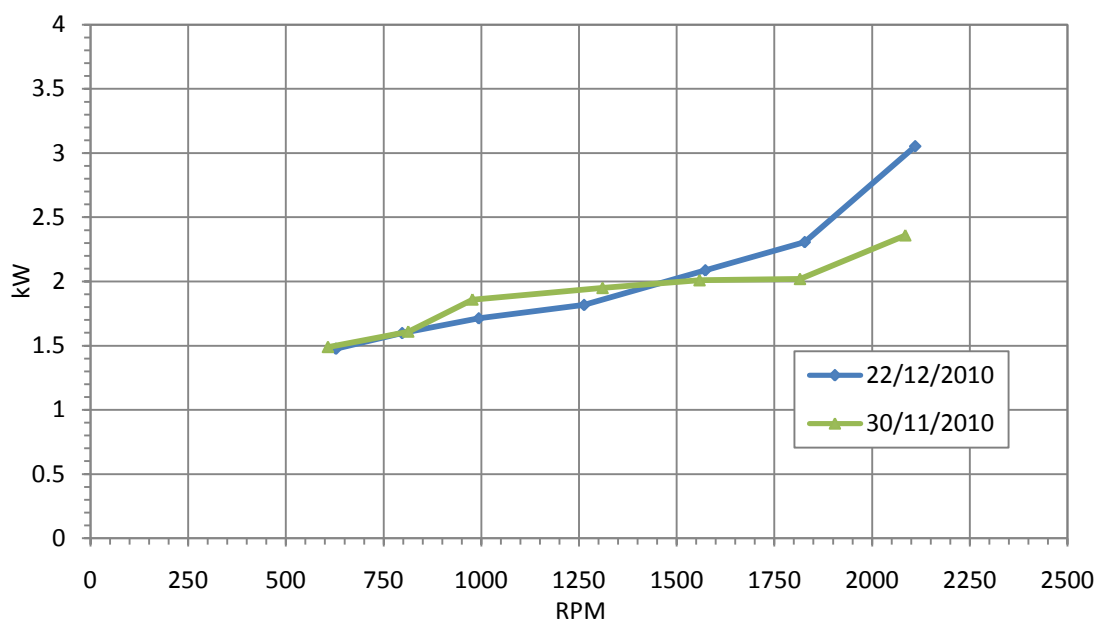
Μετρήθηκαν έτσι οι απώλειες ισχύος του πρώτου και δεύτερου ρότορα για διαφορές ταχύτητες περιστροφής.

Η διαδικασία των μετρήσεων αυτών περιέχει προθέρμανση της εγκατάστασης σε σχετικά χαμηλές στροφές (~400RPM) για τουλάχιστον 10 λεπτά, όπως γίνεται άλλωστε σε κάθε εκκίνηση της εγκατάστασης. Η προθέρμανση είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία των εδράσεων και την επίτευξη της απαραίτητης θερμοκρασίας των λιπαντικών. Αν και στις υπόλοιπες μετρήσεις δεν θα υπάρξει αντίκτυπο σε λειτουργία χωρίς προθέρμανση, στις μετρήσεις ισχύος εν κενό η απόκλιση ενδέχεται να είναι σημαντική. Κατόπιν της προθέρμανσης οι άξονες επιταχύνονται σε στροφές κανονικής λειτουργίας και παραμονή σε σταθερές στροφές για ορισμένο χρονικό διάστημα πριν τη λήψη των μετρήσεων.

Οι αρχικές προσπάθειες για προσδιορισμό της καταναλισκόμενης ισχύος επικεντρώνονταν την στιγμιαία ένδειξη του αναλυτή ενέργειας. Τα αποτελέσματα, τόσο για τον πρώτο (Σχήμα 3.16) αλλά ιδιαίτερα για τον δεύτερο άξονα (Σχήμα 3.17) ο οποίος ελέγχεται μέσω inverter παρουσίασαν μεγάλη απόκλιση και το σφάλμα που θα υπεισέρχονταν στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης θα ήταν τέτοιο που δεν θα βοηθούσε στην εξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 3.16: Αντιπαραβολή 2 διαφορετικών μετρήσεων απωλειών ισχύος πρώτου ρότορα

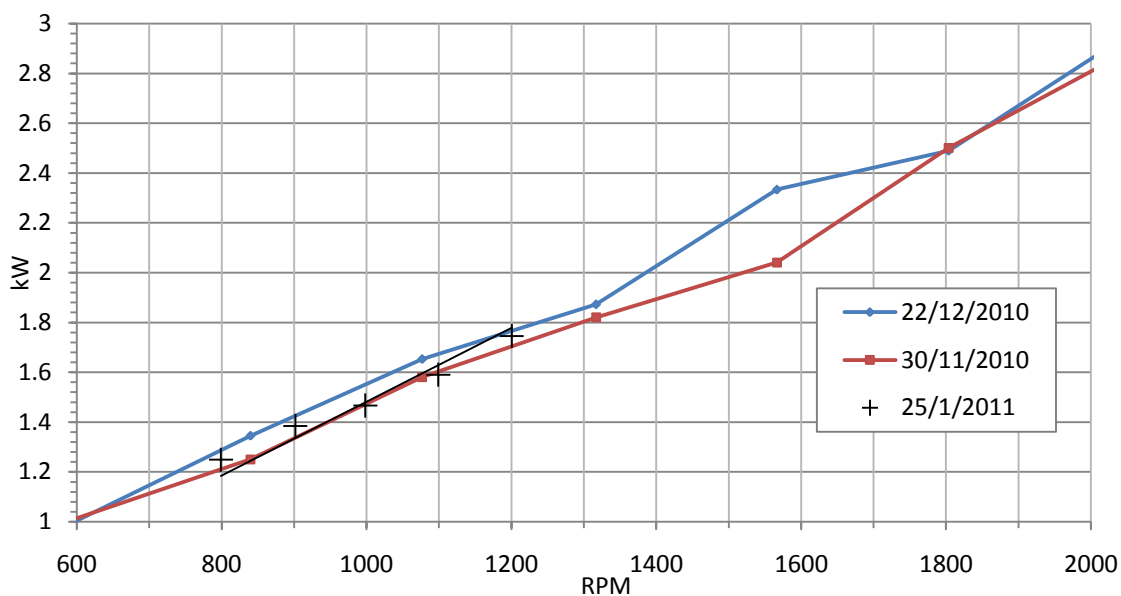


Σχήμα 3.17: Αντιπαραβολή 2 διαφορετικών μετρήσεων απωλειών ισχύος δευτέρου ρότορα

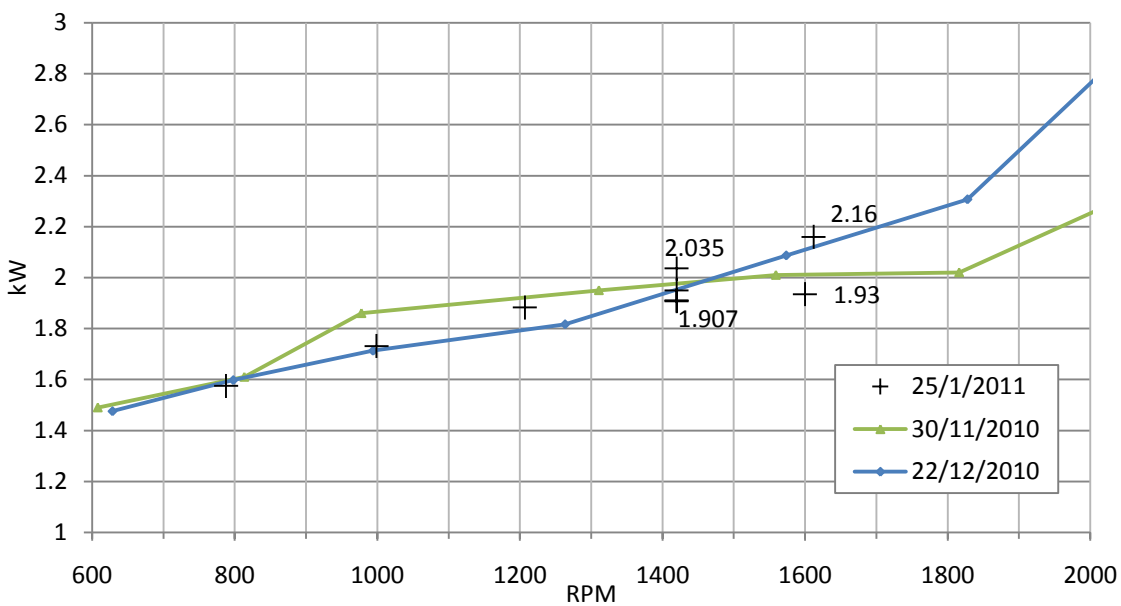
Εφόσον κατέστη προφανές ότι οι μετρήσεις αυτές δεν θα ήταν αξιοποιήσιμες στραφήκαμε σε άλλη μέθοδο υπολογισμού των απωλειών. Η κάθε μέτρηση του αναλυτή ενέργειας αναγράφει τις κιλοβατώρες που έχουν διέλθει από το σημείο μέτρησης. Εκμεταλλευόμενοι τα χαρακτηριστικά αυτό λάβαμε μετρήσεις ανά μισή ώρα για σταθερές στροφές και υπολογίσαμε τις απώλειες ισχύος για το διάστημα αυτό. Η διακριτική ικανότητα του αναλυτή ενέργειας είναι 10 βατώρες, επομένως το σφάλμα των απωλειών ανέρχεται στα 20 watt. Για την πρώτη πτερωτή, στην προσπάθεια κατάρτισης μιας εξίσωσης απωλειών επικεντρωθήκαμε στο εύρος στροφών όπου αναμένεται να λειτουργήσει στη διαδικασία της παραμετρικής μελέτης. Για τη δεύτερη πτερωτή, για επιβεβαίωση των μετρήσεων, δεδομένης της αύξησης της απόκλισης αυξανόμενων των στροφών, στις 1400RPM λάβαμε 3 μετρήσεις σε χρόνο λειτουργίας μιάμισης ώρας και η μέτρηση στα 1600 RPM έγινε 2 φορές.

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι απουσία των πτερωτών δεν επέτρεπε τη μέτρηση των στροφών μέσω του προγράμματος πρόσκτησης δεδομένων το οποίο δέχεται τα δεδομένα των αισθητήρων προσέγγισης (proximity sensors) και ο καθορισμός των στροφών έγινε για τον μεν πρώτο ρότορα με ψηφιακό ταχύμετρο χειρός για τον δε δεύτερο μέσω της συχνότητας του ρεύματος η οποία αναγράφονταν στην οθόνη του inverter. Σύγκριση των υπολογιζόμενων στροφών του δεύτερου ρότορα μέσω της συχνότητας του ρεύματος και των μετρήσεων του ψηφιακού ταχύμετρου κατέδειξαν απόκλιση της τάξης των 0.25 RPM.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν συγκρίνονται τα αποτελέσματα των νέων μετρήσεων (25/1/2011) με τις προηγούμενες καμπύλες απωλειών.



Σχήμα 3.18: Αντιπαραβολή μετρήσεων απωλειών πρώτου ρότορα & γραμμή τάσης για τα αποτελέσματα της νέας μεθόδου.



Σχήμα 3.19: Αντιπαραβολή μετρήσεων απωλειών δεύτερου ρότορα και αποτελεσμάτων νέας μεθόδου

Παρατηρούμε ότι για σταθερές συνθήκες λειτουργίας η ισχύς που απορροφάται δεν είναι σταθερή. Οι μεταβολές που παρουσιάζονται στην εν κενό

καταναλισκόμενη από την εγκατάσταση ισχύ ενδεχομένως δεν είναι μεγάλες σε απόλυτες τιμές, είναι όμως ικανές να παρουσιάσουν σημαντική αλλοίωση στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης. Γι' αυτό το λόγο δεν κρίθηκε σκόπιμο να προχωρήσουμε σε επαλήθευση του βαθμού απόδοσης των πτερυγώσεων με τη μέθοδο αυτή. Παρουσιάζουμε ωστόσο μια σύγκριση του βαθμού απόδοσης (Σχήμα 3.20) όπως αυτός προκύπτει από τα ρευστοδυναμικά μεγέθη (Σχέση 2.2) και από τις μετρήσεις ισχύος (Σχέση 3.2). Για τον υπολογισμό των απωλειών χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της γραμμής τάσης απωλειών του πρώτου ρότορα με παρεμβολή της αρχής των αξόνων (Σχέση 3.1, Σχήμα 3.18).

$$\eta_{\text{μετρήσεων}} = \frac{\text{ενέργεια ρευστου}}{\text{καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια - απώλειες}}$$

$$\text{ενέργεια ρευστού} = \frac{\Delta P_t \times \dot{m} \frac{\sqrt{\theta}}{\delta}}{\rho} \times 10^{-3} \text{ (kW)}$$

όπου

ΔP_t : αύξηση ολικής πίεσης στην πτερωτή

$\dot{m} \frac{\sqrt{\theta}}{\delta}$: ανηγμένη παροχή μάζας

ρ : πυκνότητα ρευστού (kg/m^3)

$$\text{καταναλισκόμενη ενέργεια} = \frac{\Delta kWh}{\Delta t} \text{ (kW)}$$

όπου

ΔkWh : η ισχύς που διήλθε από τον αναλυτή ενέργειας

Δt : ο χρόνος που διήρκησε η μέτρηση (h)

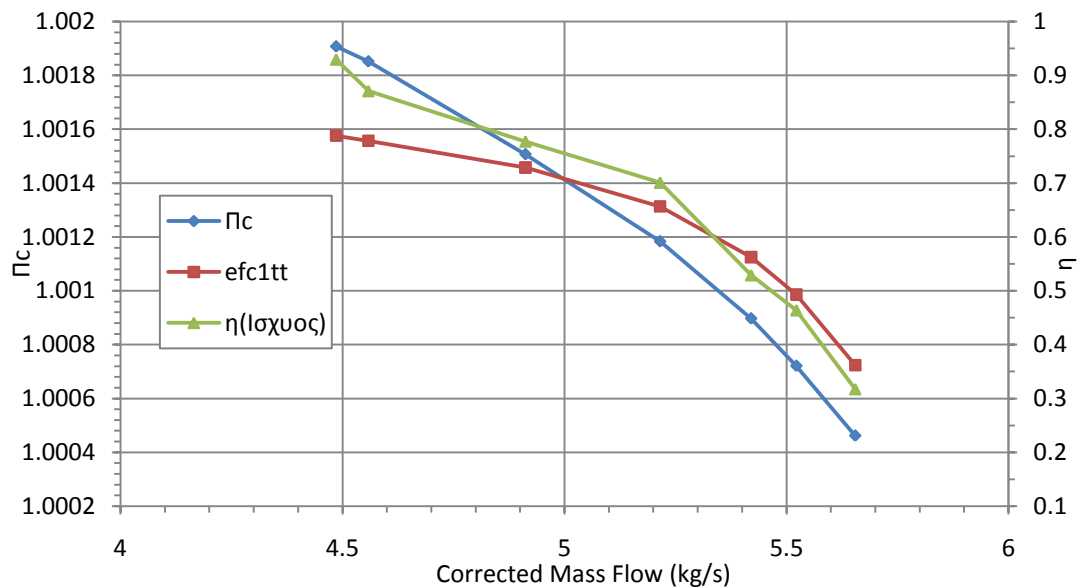
$$\text{απώλειες} = 0.0014 \times N_1 \text{ (kW)} \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

όπου

N_1 : ταχύτητα περιστροφής πρώτης πτερωτής (RPM)

εν τέλει ο βαθμός απόδοσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση

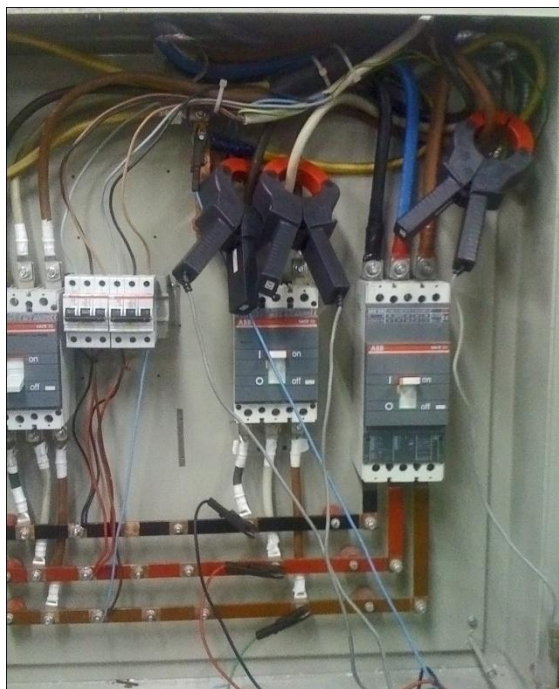
$$\eta = \frac{\frac{\Delta P_t \times \dot{m} \frac{\sqrt{\theta}}{\delta}}{\rho}}{\frac{\Delta kWh}{\Delta t} - 0.0014 \times N_1} \quad (\text{Σχέση 3.2})$$



Σχήμα 3.20: Αντιπαραβολή των δύο μεθόδων υπολογισμού του βαθμού απόδοσης. Διάγραμμα λόγου πίεσης & βαθμών απόδοσης. Χαρακτηριστικά μέτρησης 800-1200RPM 2c αξονικό διάκενο.

Παρά το γεγονός ότι δεν κρίθηκε ακριβής η μέθοδος υπάρχουν τα δεδομένα ισχύος του πρώτου ρότορα για όλες τις μετρήσεις της παραμετρικής μελέτης που ακολούθησε. Στις μετρήσεις παρέχεται και ο συντελεστής ισχύος (P.F. - coosφ) ο οποίος εκφράζει την σύνθετη αντίσταση του φορτίου του ηλεκτροκινητήρα. Το στοιχείο αυτό ίσως εμπεριέχει χρήσιμες πληροφορίες για την ισχύ που αποδίδεται στο ρευστό αν ο αναλυτής ενέργειας συνδεθεί στις φάσεις του κινητήρα. Οι περισσότερες μετρήσεις ισχύος έγιναν με σύνδεση στον ηλεκτρολογικό πίνακα, πριν την παρεμβολή του inverter, για λόγους ασφάλειας. Η ακρίβεια των μετρήσεων που τυπώνει ο αναλυτής ενέργειας, ανέρχεται στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο και οι μεταβολές σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας είναι της τάξης του 0.01. Η συμπεριφορά αυτή ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ο η διάταξη λειτουργεί χωρίς πτερωτές ο ηλεκτροκινητήρας κινητήρας λειτουργεί πολύ μακριά από το πλήρες φορτίο και σε χαμηλούς βαθμούς απόδοσης.

Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό της συνδεσμολογίας του αναλυτή στον ηλεκτρολογικό πίνακα της εγκατάστασης και της αρχειοθέτησης των μετρήσεων ισχύος στο αρχείο εργασιών της διάταξης.



Φωτογραφία 3.2: Συνδεσμολογία του αναλυτή ενέργειας στις 3 φάσεις του ηλεκτροκινητήρα της πρώτης περρωτής.

microVIP 3	22/12/10	13:25:16	Manual
V	405	A 7.10	P.F. .34 KW 1.71
KVAh	4.98	KVAh 4.68	Hz 50.0
KWh	0000.85		KVAh 0001.59
PEAK MEM	KVA 3.66	KW	1.66
Phase	L1	L2	L3
V	235	235	232
A	8.24	6.08	7.13
W	565	341	807

Φωτογραφία 3.3: Μετρήσεις ισχύος. Απόκομμα τυπώματος Αναλυτή Ενέργειας MicroVAX 3. Διακρίνονται στο άνω μέρος τα συνολικά μεγέθη στιγμιαίας μέτρησης ισχύος επάνω δεξιά (KW), συντελεστή ισχύος (P.F) αριστερά της μέτρησης ισχύος, τάσης και έντασης ρεύματος καθώς και η κατανάλωση ισχύος (KWh). Επίσης στο κάτω μέρος του αποκόμματος εμφανίζονται ανά φάση (L1,L2&L3) τα μεγέθη τάσης (V), έντασης (A) και ισχύος (W) ηλεκτρικού ρεύματος.

4

Διερεύνηση επίδρασης της αξονικής απόστασης πτερωτών στη λειτουργία της βαθμίδας C-R συμπιεστή

Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτονται τα διαγράμματα των επιδόσεων της βαθμίδας όπως προέκυψαν από τη διαδικασία της παραμετρικής μελέτης. Η παράμετρος της μελέτης είναι το αξονικό διάκενο των δύο πτερωτών και ο λόγος στροφών. Οι γωνίες stagger είναι σταθερές και ίσες με 30° για τον πρώτο ρότορα και 43° για τον δεύτερο. Για όλα σετ στροφών πραγματοποιήθηκαν ακτινικές σαρώσεις 12 σημείων σε 6 σημεία λειτουργίας. Τα διαγράμματα αποτελούν απλή παράθεση των μετρήσεων και δεν επιχειρήθηκε υπολογισμός πολυωνύμων παρεμβολής λόγω του περιορισμένου αριθμού σημείων λειτουργίας και του έντονου σφάλματος που μπορεί να υπεισέρθει από τα σημεία όπου η βαθμίδα λειτουργεί σε κατάσταση αποκόλλησης (stall).

Αρχικά παραθέτονται τα διαγράμματα λόγου πίεσης-διορθωμένης παροχής του πρώτου ρότορα και ακολουθούν αυτά του δεύτερου. Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι μετρήσεις και κατόπιν αναλύονται ξεχωριστά βάσει των μεταβολών που παρουσιάζουν. Επιπλέον παρατίθεται χάρτης της κάθε πτερωτής προς οπτικοποίηση των μεταβολών που επιφέρει η αλλαγή λόγου στροφών.

Κατόπιν ακολουθούν τα διαγράμματα των διαστατών συντελεστών παροχής και φόρτισης Φ - Ψ . Ο συντελεστής φόρτισης αφορά τα ολικά μεγέθη (Ψ_{tt}). Και εδώ ακολουθείται η λογική της παρουσίασης των διαγραμμάτων λόγου πίεσης - παροχής.

Κατόπιν παραθέτονται ενδεικτικά κάποια διαγράμματα γωνιών της ροής. Τα διαγράμματα αυτά αφορούν γωνίες παρέκκλισης (δ) και πρόσπτωσης (i) των πτερυγίων του πρώτου και του δεύτερου ρότορα.

Εν τέλει παρουσιάζονται διαγράμματα του βαθμού απόδοσης από ενδεικτικές μετρήσεις τα οποία παραθέτουν τη μεταβολή του βαθμού απόδοσης που επιφέρει η αλλαγή του λόγου στροφών.

4.1 Διαδικασία διεξαγωγής μετρήσεων

4.1.1 Μετρήσεις

Στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης διεξήχθησαν μετρήσεις σε εύρος 800-1500 RPM για τον πρώτο ρότορα και 800-1800 RPM για τον δεύτερο. Οι μετρήσεις ομαδοποιήθηκαν σε 8 ζεύγη στροφών μοιρασμένα σε 2 λόγους στροφών: 5 για λόγο στροφών $R_u=N_2/N_1=1$ και 3 $R_u=1.5$. Κατασκευαστικοί περιορισμοί (υψηλά επίπεδα κραδασμών) δεν επέτρεψαν υψηλές ταχύτητες περιστροφής με αποτέλεσμα να μη γίνουν οι μετρήσεις 1800-1800 & 1500-2250 RPM οι οποίες θα παρείχαν μια πληρέστερη εικόνα της λειτουργίας σε υψηλές στροφές. Θα ήταν επιθυμητή και η διεξαγωγή μετρήσεων σε λόγο στροφών μικρότερο της μονάδας (π.χ. 0.8) ώστε να αποκομιστεί μια πληρέστερη εικόνα της λειτουργίας της βαθμίδας. Ωστόσο δεν πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αυτές δεδομένου ότι ταχύτερη περιστροφή της πρώτης πτερωτής απαιτεί αλλαγή γωνιών stagger της δεύτερης για αποδοτική λειτουργία.

$R_u=N_2/N_1$	N_1	N_2
1	800	800
1	1000	1000
1	1200	1200
1	1350	1350
1	1500	1500
1.5	800	1200
1.5	1000	1500
1.5	1200	1800

Μετρήσεις αυτές διεξήχθησαν σε κάθε μία από τις 3 αξονικές αποστάσεις στις οποίες φέραμε τις δύο πτερωτές: 1, 1.5 & 2 χορδές. Εν τέλει διεξήχθησαν 24 διαφορετικές μετρήσεις προς διερεύνηση της επίδρασης του αξονικού διακένου και του λόγου στροφών στην λειτουργία της βαθμίδας αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

4.1.2 Περιγραφή χρήσης αποστατών

Εφ' όσον όλες οι προκαταρκτικές μετρήσεις έγιναν σε αξονική απόσταση πτερωτών ίση με 2 χορδές, δεν υπήρχε ανάγκη επέμβασης στην εγκατάσταση. Η μεταβολή του αξονικού διακένου, η οποία είναι η κύρια παράμετρος της μελέτης που ακολουθεί, απαιτεί ορισμένες διεργασίες και τροποποιήσεις στην διάταξη.

Σε μια απλουστευμένη περιγραφή, η διάταξη αποτελείται από δύο κυρίως τμήματα: το εμπρός τμήμα που περιλαμβάνει τον αγωγό που περιέχει την πρώτη περωτή, την έδρασή της και την διαμόρφωση της εισόδου της ροής, και το πίσω τμήμα το οποίο περιλαμβάνει τον αγωγό που περιέχει την δεύτερη περωτή, τις εδράσεις της, το χείλος εκφυγής και την βαλβίδα στραγγαλισμού της παροχής. Τα δύο αυτά τμήματα ενώνονται στην περιοχή του διακένου των δύο περωτών και συγκρατούνται με 4 κοχλίες σύνδεσης.

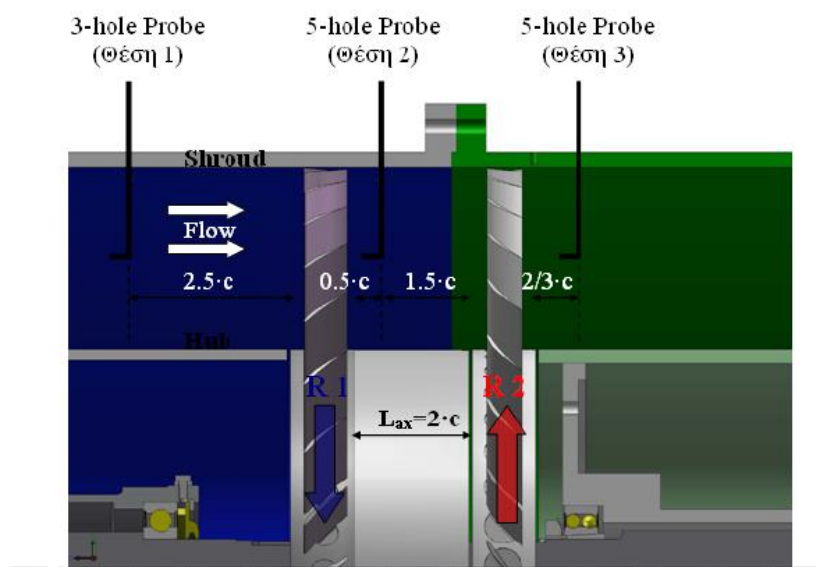
Μεταξύ των δύο περωτών παρεμβάλλεται ένας κυλινδρικός αποστάτης για την διατήρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καναλιού της ροής. Ο αποστάτης αυτός συνδέεται με τον δίσκο-φορέα των περυγίων της δεύτερης περωτής με 6 κοχλίες και περιστρέφεται μαζί της. Η μεταβολή του αξονικού διακένου επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφορετικού μήκους αποστατών. Για κάθε τιμή αξονικού διακένου μικρότερη των 2 χορδών απαιτείται χρήση ζεύγους αποστατών, ενός που περιστρέφεται μαζί με την δεύτερη περωτή και έχει μήκος ίσο με το επιθυμητό αξονικό διάκενο και ένα σταθερό ο οποίος έχει μήκος ίσο με τη διαφορά της επιθυμητής αξονικής απόστασης από το μήκος των 2 χορδών. Ο σταθερός αποστάτης και τοποθετείται πίσω από τη δεύτερη περωτή η οποία μετακινείται προς την πρώτη μειώνοντας το αξονικό διάκενο.

Στις μετρήσεις που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης διερευνήθηκαν 3 αξονικές αποστάσεις: 1, 1.5 & 2 χορδές. Το μήκος των 2 χορδών αποτελεί το μέγιστο δυνατό αξονικό διάκενο της παρούσας διάταξης, ενώ το ελάχιστο περιορίζεται μόνο από τη θέση του σωλήνα πίεσης 5 οπών που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο περωτών. Στην παρούσα μορφή δεν προβλέπεται αξονικό διάκενο μικρότερο της μίας χορδής καθώς κάτι τέτοιο απαιτεί νέα οπή για τον σωλήνα πίεσης.

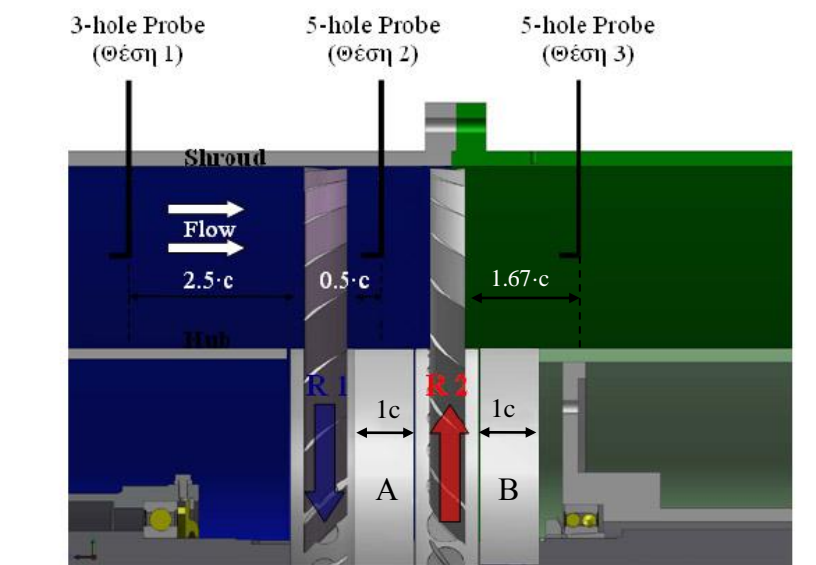
Η αλλαγή των αποστατών είναι μια διαδικασία η οποία απαιτεί μεγάλη προσοχή. Αρχικά απαιτείται αφαίρεση του περιστρεφόμενου αποστάτη από τον δίσκο της δεύτερης περωτής και κατόπιν αφαίρεση της δεύτερης περωτής από τον άξονά της. Η διαδικασία αυτή πρέπει να εκτελείται με μεγάλη προσοχή καθώς υπάρχει κίνδυνος στρέβλωσης των περυγίων. Μετά την αφαίρεση της περωτής αφαιρείται ο σταθερός αποστάτης (αν υπάρχει) και τοποθετείται ο νέος σταθερός αποστάτης. Η επανατοποθέτηση της δεύτερης περωτής είναι από τα πιο δύσκολα και λεπτεπίλεπτα σημεία της διαδικασίας καθώς για τη σωστή λειτουργία απαιτείται μια ελάχιστη απόσταση του δίσκου φορέα από τον σταθερό αποστάτη και απόλυτα κάθετη στον άξονα περιστροφή της περωτής για αποφυγή αζυγοσταθμίας. Και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά τη σύσφιξη της περωτής στον άξονα και συνήθως η διαδικασία απαιτεί κάποιες δοκιμές και πρέπει πάντα να ελέγχουμε το διάκενο περιφερειακά με feeler gauge του 1 mm ή τουλάχιστον 0.8 mm. Μετά την σύσφιξη της δεύτερης περωτής τοποθετείται ο περιστρεφόμενος αποστάτης και επανασυναρμολογείται η εγκατάσταση. Προσοχή πρέπει να δοθεί και στην πρώτη περωτή η οποία

πρέπει επίσης να διατηρεί περιφερειακά ένα διάκενο τουλάχιστον 0.8-1mm από τον εσωτερικό κύλινδρο του αγωγού, και να έχει μια ελάχιστη απόσταση 15 mm από την άκρη του άξονά της.

Στο σχήμα 4.1 απεικονίζεται αξονική τομή της διάταξης με τον αποστάτη μήκους 2 χορδών και στο σχήμα 4.2 η ίδια τομή με το ζεύγος αποστατών 1 χορδής.



Σχήμα 4.1: Αξονική τομή της διάταξης με αποστάτη 2 χορδών



Σχήμα 4.2: Αξονική τομή της διάταξης με το ζεύγος αποστατών για αξονική απόσταση περωτών 1 χορδής. Ο περιστρεφόμενος αποστάτης (A) προσαρμόζεται επί του δίσκου-φορέα των πτερυγίων της δεύτερης περωτής ενώ σταθερός αποστάτης (B) παρεμβάλλεται μεταξύ δίσκου-φορέα των πτερυγίων και κελύφους του άξονα της δεύτερης περωτής.

4.1.3 Αρχειοθέτηση-οδηγίες

Κατά την διεξαγωγή των πρώτων εργασιών στην εγκατάσταση διαπιστώθηκε η ανάγκη αρχειοθέτησης των μετρήσεων και κατάρτισης ενός οδηγού χρήσης της διάταξης.

Αρχικά σχεδιάστηκε ένα φύλλο αναφοράς (Παράρτημα 2) το οποίο συμπληρώνεται κάθε φορά που γίνονται εργασίες στην εγκατάσταση, είτε αφορούν μετρήσεις είτε τροποποιήσεις ή άλλου είδους εργασίες. Στο φύλλο αναφοράς καταγράφονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες της μέτρησης/εργασίας (ημερομηνία, συνθήκες περιβάλλοντος, σκοπός της μέτρησης κ.λπ.), το ποιος διεξήγαγε την μέτρηση/εργασία και αναλυτική χρονική καταγραφή των εργασιών. Το φύλλο αναφοράς τοποθετείται στο αρχείο εργασιών της εγκατάστασης μαζί με όλες τις επιπλέον συνοδευτικές πληροφορίες της μέτρησης (μετρήσεις ισχύος, διαγράμματα).

Κατόπιν καταρτίστηκε ένας οδηγός χρήσης της εγκατάστασης (Παράρτημα 2) ο οποίος εξηγεί αναλυτικά όλες τις απαραίτητες διαδικασίες για την ορθή λήψη μιας σειράς μετρήσεων (ενεργοποίηση αισθητήρων, ορθή έναρξη & τερματισμός λειτουργίας ηλεκτροκινητήρων, χρήση του προγράμματος πρόσκτησης δεδομένων κ.λπ.). Στον οδηγό περιλαμβάνονται επίσης όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την λειτουργία της διάταξης (τροφοδοσίες ρεύματος, προθέρμανση εδράσεων κ.λπ.).

Ο οδηγός χρήσης τοποθετήθηκε στο αρχείο εργασιών μαζί με άλλα χρήσιμα έγγραφα όπως τα αρχεία εισόδου του προγράμματος πρόσκτησης δεδομένων και απαραίτητες πληροφορίες για την διεξαγωγή τροποποιήσεων στην εγκατάσταση (ροπή σύσφιξης των πτερυγίων στο δίσκο-φορέα κ.λπ.).

4.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων Pc-q.

Από την παραμετρική μελέτη προέκυψαν ενδιαφέρουσες μεταβολές στη λειτουργία και των δύο πτερωτών, χρήσιμες για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Ακολουθεί η ανάλυση της συμπεριφοράς κάθε πτερωτής ξεχωριστά. Τα διαγράμματα αφορούν διορθωμένες τιμές παροχής (Σχέση 4.1) και λόγου πίεσης (Σχέση 4.2) τόσο ως προς τις ατμοσφαιρικές συνθήκες όσο και ως προς την ταχύτητα περιστροφής. Η ανάγκη διόρθωσης των αποτελεσμάτων ως προς την

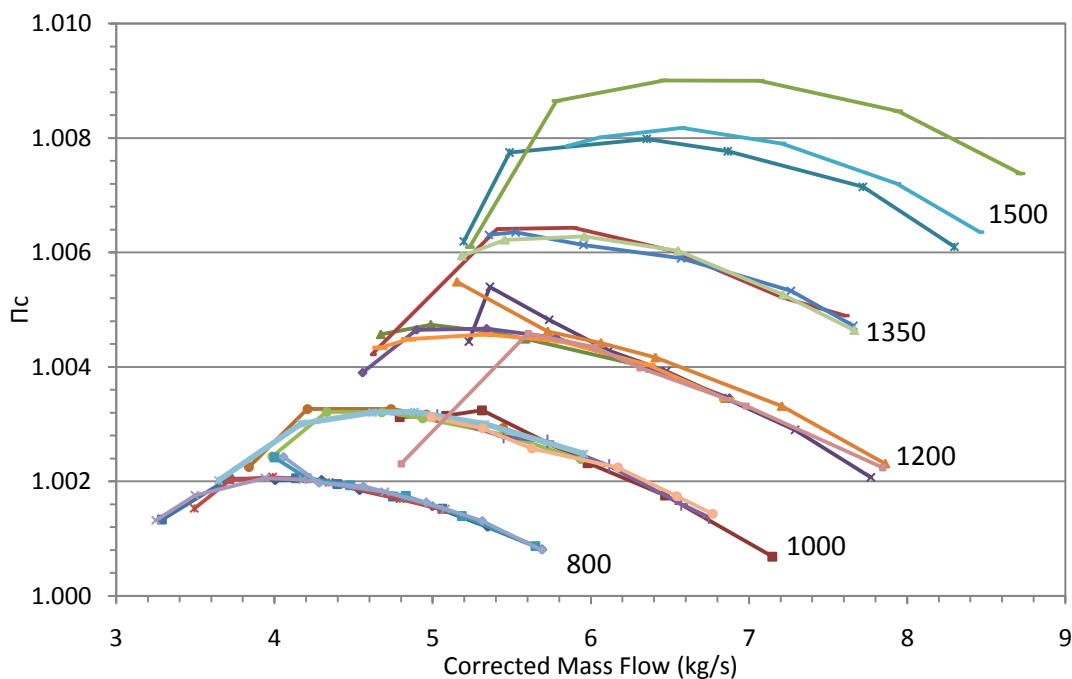
ταχύτητα περιστροφής προκύπτει από την περιστασιακή ασταθή συμπεριφορά των οδηγήσεων των ηλεκτροκινητήρων.

$$\dot{m}_{cor,B} = \dot{m}_{cor,A} \frac{N_{cor,B}}{N_{cor,A}} \quad (\text{Σχέση 4.1})$$

$$P_{c,B} = \left[\left(P_{c,A}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \frac{N_{cor,B}^2}{N_{cor,A}^2} + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (\text{Σχέση 4.2})$$

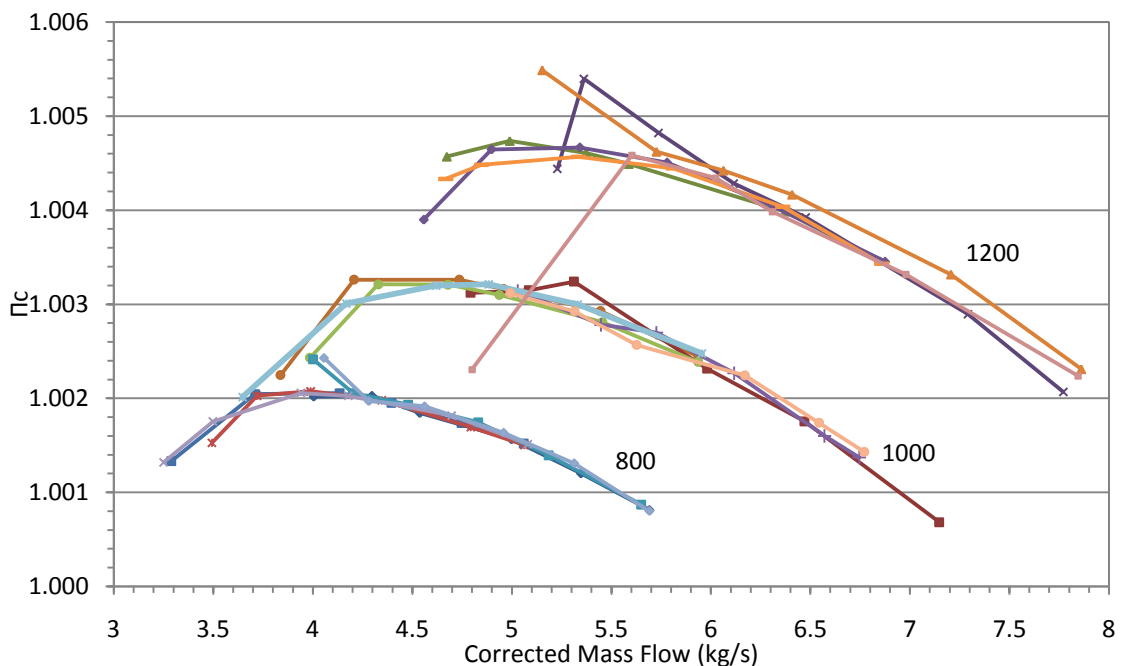
4.2.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες πρώτου ρότορα

Στην πλειοψηφία των μετρήσεων δεν προέκυψαν σημαντικές αλλαγές στις χαρακτηριστικές καμπύλες λόγου πίεσης, εν τέλει όμως παρατηρήθηκαν μεταβολές, κυρίως στις υψηλές στροφές. Στο σχήμα 4.2.1 παραθέτονται όλες οι μετρήσεις λόγου πίεσης του πρώτου ρότορα. Σε γενικές γραμμές, δεν είδαμε κάποια διαφορά στις μετρήσεις χαμηλών στροφών (800, 1000 & 1200 RPM). Αντιθέτως παρατηρείται μεγάλη ομαδοποίηση και οι χαρακτηριστικές ταυτίζονται. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά της χαρακτηριστικής συναρτήσεως του λόγου στροφών ο οποίος φαίνεται να επηρεάζει την χαρακτηριστική σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό απ' ό,τι το αξονικό διάκενο τουλάχιστον στις χαμηλές στροφές. Από τις μετρήσεις υψηλών στροφών (1350 & 1500 RPM) θα εξάγουμε κάποια συμπεράσματα για την επίδραση του αξονικού διακένου καθώς σε αυτές τις στροφές γίνεται πιο καθαρά αντιληπτή η επίδραση του.



Σχήμα 4.2.1: Συγκεντρωτικός χάρτης όλων των μετρήσεων του πρώτου ρότορα

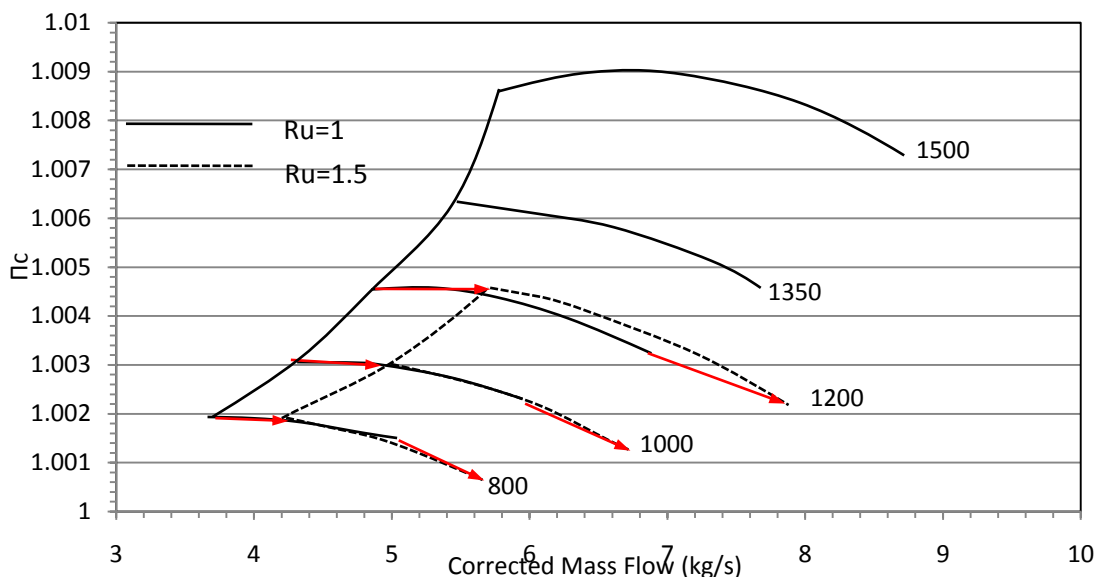
Μια πιο προσεκτική διερεύνηση των χαρακτηριστικών των χαμηλών στροφών καταδεικνύει απόλυτη ταύτιση στις πιο χαμηλές στροφές (800 RPM) και ελαφρά διαφοροποίηση στις μεγαλύτερες. Παρατηρούμε ότι ανάλογα με το λόγο στροφών η περωτή λειτουργεί σε διαφορετικό κομμάτι της χαρακτηριστικής. Ταχύτερη περιστροφή της δεύτερης περωτής ($R_u=1.5$) επιτρέπει μεγαλύτερη παροχή μάζας, έτσι η περωτή λειτουργεί από χαμηλότερους λόγους πίεσης ενώ φτάνει στα ίδια μέγιστα. Για λειτουργία σε λόγο στροφών 1.5 παρατηρούμε ότι αρκετές μετρήσεις παρουσιάζουν ένα άλμα στον λόγο πίεσης όταν πλησιάζουν την κορυφή της χαρακτηριστικής. Το φαινόμενο αυτό αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν καθώς τα σημεία αυτά δεν ανήκουν στην χαρακτηριστική, οποία μένει αναλλοίωτη συναρτήσει του λόγου στροφών.



Σχήμα 4.2.2: Συγκεντρωτικός χάρτης λόγου πίεσης πρώτου ρότορα, μετρήσεις χαμηλών στροφών (800, 1000 & 1200 RPM)

Το σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.2.3) απεικονίζει τη μετατόπιση του χάρτη της πρώτης περωτής συναρτήσει του λόγου στροφών για σταθερό αξονικό διάκενο. Η συμπεριφορά αυτή είναι ανεξάρτητη του αξονικού διακένου και γι' αυτό επιλέχτηκε τυχαία ο χάρτης της περωτής για λειτουργία με αξονικό διάκενο μιάμισης χορδής (1.5c). Αδυναμία διεξαγωγής μετρήσεων για πλήρες

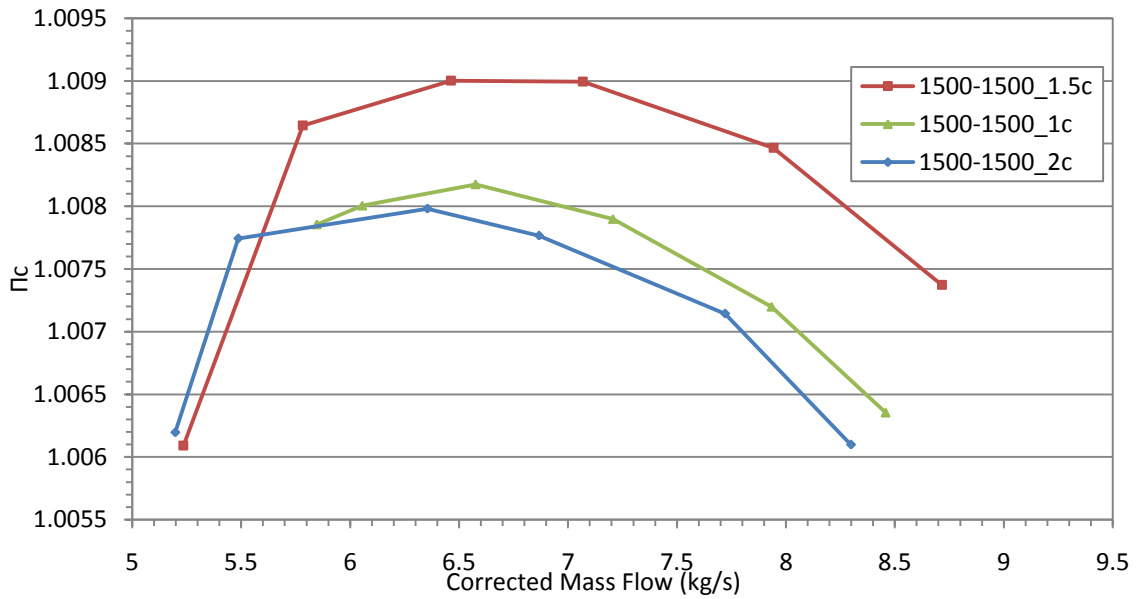
εύρος στροφών για λόγο στροφών $R_u=1.5$ δεν επιτρέπει την αποτύπωση χάρτη ίδιου εύρους με το χάρτη για λόγο στροφών $R_u=1$.



Σχήμα 4.2.3: Μετατόπιση του χάρτη της πρώτης βαθμίδας συναρτήσει του λόγου στροφών.

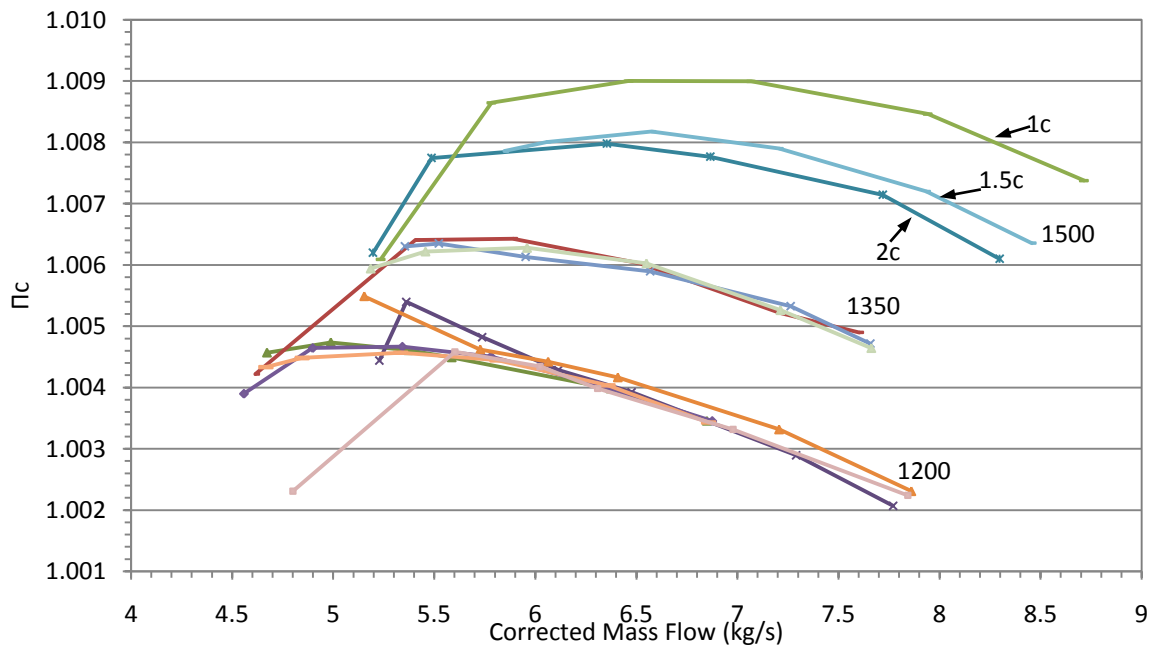
Σε αυτή την απεικόνιση είναι εμφανής μετατόπιση ολόκληρου του χάρτη προς **μεγαλύτερες τιμές παροχής με παράλληλη διατήρηση του μέγιστου λόγου πίεσης**. Επιπλέον διαπιστώνεται **μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας** ξεκινώντας από χαμηλότερους λόγους πίεσης. Η παρατήρηση αυτή συνάδει με τα συμπεράσματα που παρατηρούνται στις εργασίες των Sharma et al. Δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στην κλίση της χαρακτηριστικής. Υποθέτουμε ότι ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται και σε υψηλότερες στροφές.

Στις μετρήσεις υψηλότερων στροφών και δει σε αυτή των μέγιστων είδαμε αισθητή βελτίωση και μετατόπιση ολόκληρης της χαρακτηριστικής καμπύλης προς υψηλότερους λόγους πίεσης. Η ανάλυση βασίζεται στη μέτρηση 1500-1500 RPM (Σχήμα 4.2.4) όπου και η συμπεριφορά αυτή είναι απολύτως εμφανής. Η βελτίωση αυτή ωστόσο δεν είναι γραμμική. Ο λόγος πίεσης δεν αυξάνει σταθερά μειούμενου του αξονικού διακένου. Αντιθέτως τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την ύπαρξη μιας βέλτιστης απόστασης μεταξύ των δύο πτερωτών. Περαιτέρω μείωση του αξονικού διακένου οδηγεί σε εκ νέου μετατόπιση της χαρακτηριστικής του πρώτου ρότορα σε χαμηλότερους λόγους πίεσης. Στην δική μας περίπτωση η χαρακτηριστική καμπύλη για ελάχιστο αξονικό διάκενο (μήκος μίας χορδής) κινούταν σε ελαφρώς μεγαλύτερους λόγους πίεσης από αυτή που αντιστοιχεί στο μέγιστο αξονικό διάκενο (μήκος δύο χορδών). Η χαρακτηριστική που αντιστοιχεί στην ενδιάμεση τιμή αξονικού διακένου (ενάμιση μήκος χορδής) κυμαινόταν σε επίπεδα βελτίωσης της τάξης του 12%.



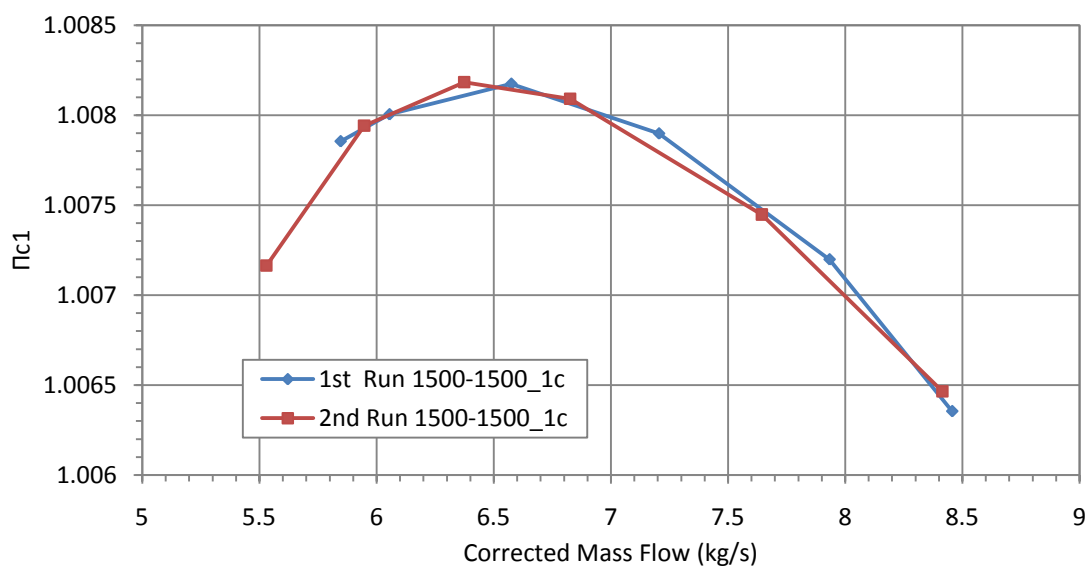
Σχήμα 4.2.4: Μετατόπιση χαρακτηριστικής πρώτου ρότορα συναρτήσεως του αξονικού διακένου στη μέτρηση 1500-1500 RPM

Η τάση αυτή ενδέχεται να εμφανίζεται από τις 1200 RPM κυρίως για λόγο στροφών $R_u=1.5$ αν και η εμβόλιμη μέτρηση των 1350 RPM δεν μπόρεσε να το επιβεβαιώσει. Και εδώ η ενδιάμεση τιμή αξονικού διακένου φαίνεται να λειτουργεί ελαφρώς πιο ευεργετικά για την πρώτη περωτή όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.5. Θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνήσουμε την επίδραση του λόγου στροφών στη λειτουργία του αξονικού διακένου στις στροφές αυτές αλλά δυστυχώς τεχνικοί περιορισμοί της εγκατάστασης δεν το επέτρεψαν.



Σχήμα 4.2.5: Συγκεντρωτικός λόγος πίεσης πρώτου ρότορα, μετρήσεις χάρτης υψηλών στροφών (1200,1350 & 1500RPM)

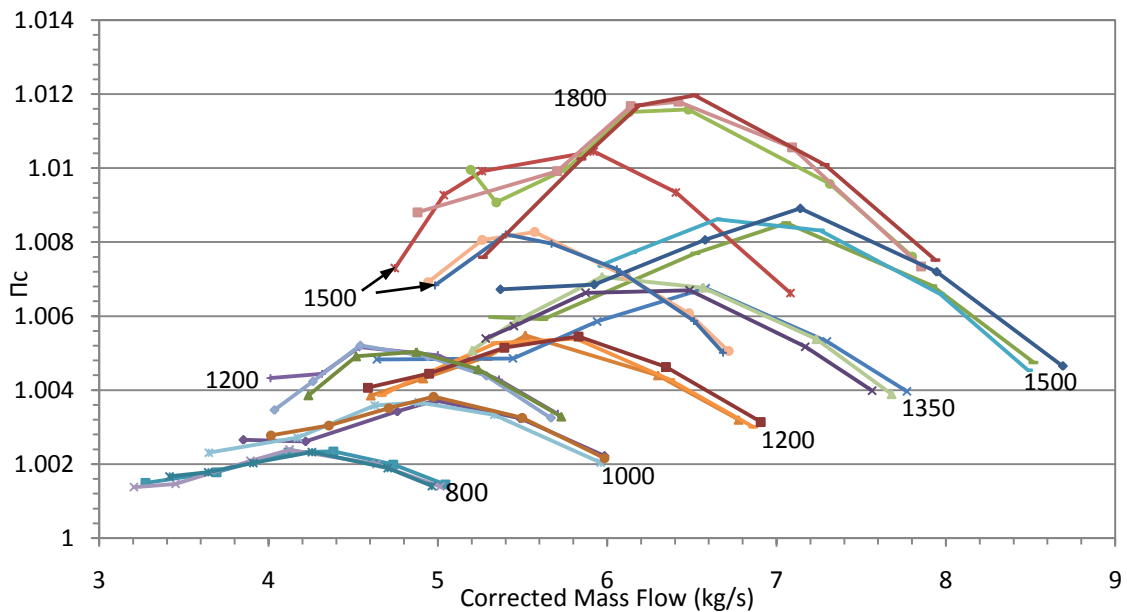
Από τα δεδομένα αυτά υποθέτουμε ότι βέλτιστο αξονικό διάκενο των δύο πτερωτών, για την παρούσα διάταξη, κυμαίνεται σε μήκος ίσο με μιάμιση χορδή του πτερυγίου. Για την επιβεβαίωση της συμπεριφοράς αυτής, της ύπαρξης δηλαδή βέλτιστης αξονικής απόστασης για τη λειτουργία της πρώτης πτερωτής, επαναλάβαμε την μέτρηση 1500-1500 RPM για αξονικό διάκενο μιας χορδής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.4.6). Η ταύτιση των χαρακτηριστικών καμπύλων λόγω πίεσης των δύο μετρήσεων είναι ξεκάθαρη.



Σχήμα 4.2.6: Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων πίεσης κανονικής και επαναληπτικής μέτρησης στις 1500-1500 RPM 1c αξονικό διάκενο.

4.2.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες δεύτερου ρότορα

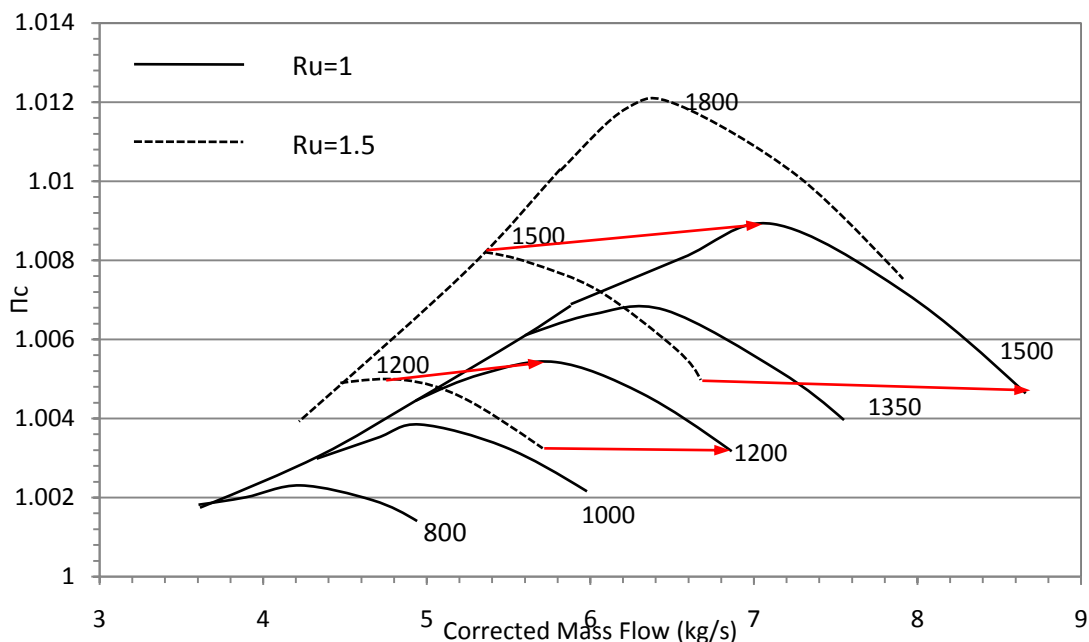
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι χαρακτηριστικές λόγου πίεσης του δεύτερου ρότορα. Όπως συνέβη και στον πρώτο ρότορα, έτσι και εδώ, στην πλειοψηφία των μετρήσεων δεν παρατηρήθηκε κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της δεύτερης πτερωτής ειδικότερα στις χαμηλές στροφές. Εν αντιθέσει, σε μεμονωμένες μετρήσεις υψηλών στροφών παρατηρήθηκαν ενδιαφέρουσες μεταβολές. Ακολουθεί συγκεντρωτικός χάρτης των μετρήσεων του δεύτερου ρότορα (Σχήμα 4.2.7).



Σχήμα 4.2.7:Συγκεντρωτικός χάρτης όλων των μετρήσεων του δεύτερου ρότορα.

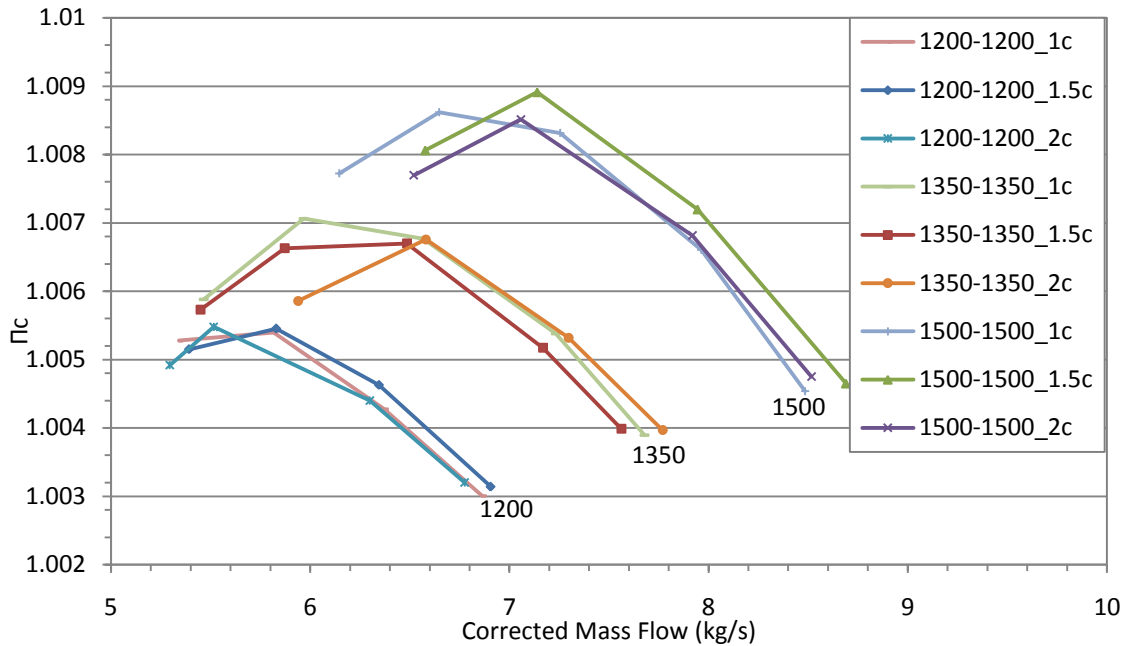
Όπως φαίνεται οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των μετρήσεων ίδιων στροφών διαφορετικού αξονικού διακένου είναι πολύ μικρές. Μια απεικόνιση του χάρτη της δεύτερης πτερωτής φαίνεται στο σχήμα 4.2.8 το οποίο προέρχεται από τις μετρήσεις αξονικής απόστασης μιάμισης χορδής (1.5c). Από την απεικόνιση του χάρτη της δεύτερης πτερωτής είναι εμφανής η επίδραση του λόγου στροφών στη συμπεριφορά της. Από τα ζεύγη στροφών που επιλέχθηκαν για την παραμετρική μελέτη, προκύπτουν μόνο δύο τιμές ταχυτήτων περιστροφής για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις και στους δύο λόγους στροφών. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν τα 1200 & 1500 RPM και από τη συμπεριφορά των μετρήσεων αυτών θα εξάγουμε τα όποια συμπεράσματα για την επίδραση του λόγου στροφών στη λειτουργία της βαθμίδας. Μεταβαίνοντας από λόγο στροφών $R_u=1.5$ σε $R_u=1$ παρατηρείται μετατόπιση ολόκληρης της χαρακτηριστικής σε μεγαλύτερες τιμές παροχής και ελαφρώς μεγαλύτερους λόγους πίεσης. Η επίτευξη μεγαλύτερου μέγιστου λόγου πίεσης γίνεται επί του ίδιου αρχικού λόγου πίεσης της βαθμίδας στο σημείο μέγιστης παροχής. Υπενθυμίζουμε ότι για

τον δεύτερο ρότορα μετάβαση από λόγο στροφών $R_u=N_2/N_1=1.5$ σε $R_u=1$ γίνεται με αύξηση των στροφών του πρώτου ρότορα. Εν αντιθέσει με τον πρώτο ρότορα, ο λόγος στροφών $R_u=1$ είναι αυτός που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες τιμές παροχής.



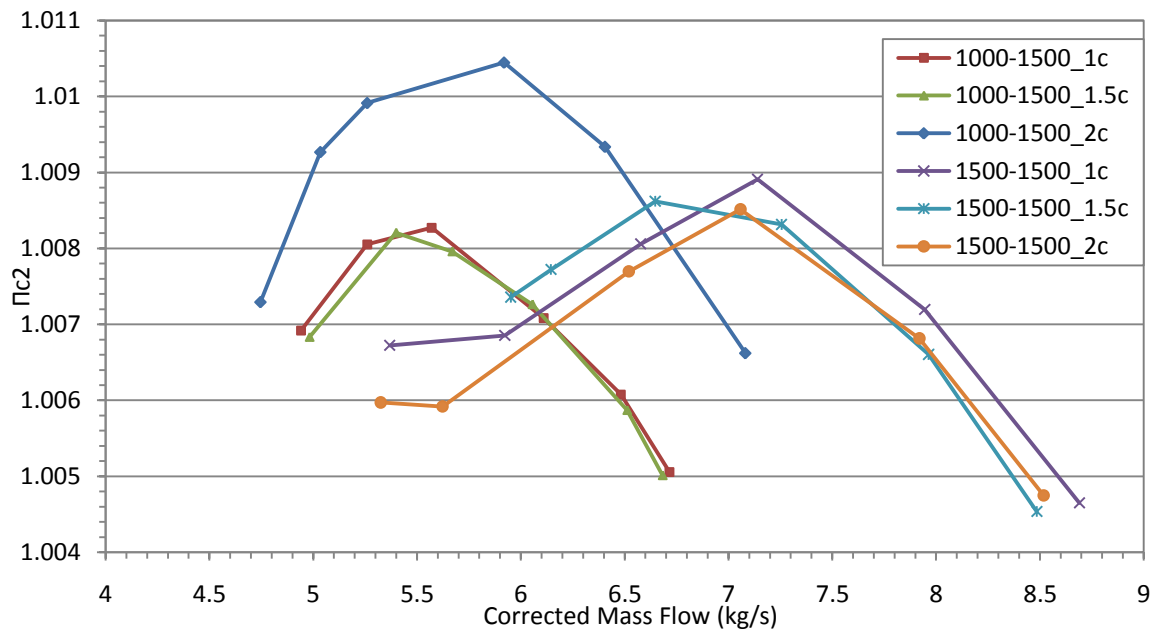
Σχήμα 4.2.8: Χάρτης δεύτερου ρότορα για αξονική απόσταση 1.5 χορδής

Για να μελετήσουμε την επίδραση του αξονικού διακένου στον δεύτερο ρότορα θα μελετήσουμε τις μετρήσεις υψηλών στροφών όπου η ταύτιση των χαρακτηριστικών καμπύλων είναι σαφώς μικρότερη από αυτή των χαμηλών στροφών. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.2.9) απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λόγου πίεσης των μετρήσεων υψηλών στροφών (1200, 1350 & 1500 RPM) για λόγο στροφών $R_u=1$. Συνολικά, με **αξονικό διάκενο 2 χορδών, η πτερωτή παρουσιάζει χαμηλότερη απόδοση έναντι αξονικών διακένων μικρότερων τιμών, τόσο σε λόγους πίεσης όσο και σε εύρος λειτουργίας** αφού εισέρχεται σε κατάσταση αποκολλημένης λειτουργίας σε μεγαλύτερες τιμές παροχής. Το φαινόμενο αυτό, της διεύρυνσης της περιοχής λειτουργίας, θα το εξετάσουμε πιο ενδελεχώς στην ανάλυση των καμπύλων αδιάστατων συντελεστών Φ - Ψ . Από τα διάκενα μικρότερων τιμών, **το διάκενο μιάμισης χορδής φαίνεται να υπερισχύει αυτού της μίας χορδής** παρέχοντας μεγαλύτερες τιμές λόγου πίεσης επιτυγχάνοντας όμως παρόμοιες μέγιστες τιμές. Η εμπόλιμη διερευνητική μέτρηση των 1350 RPM δεν κατάφερε να επιβεβαιώσει την τάση επίτευξης υψηλότερων λόγων πίεσης κατέδειξε ωστόσο την αύξηση του εύρους λειτουργίας.



Σχήμα 4.2.9: Χάρτης μετρήσεων υψηλών στροφών, λόγος στροφών $R_u=1$

Για λόγο στροφών $R_u=1.5$ παρουσιάζεται σημαντική ταύτιση των χαρακτηριστικών καμπύλων σε όλες τις μετρήσεις εκτός της μέτρησης 1000-1500 RPM όπου παρατηρείται σαφώς καλύτερη συμπεριφορά της δεύτερης πτερωτής στο μέγιστο αξονικό διάκενο. Αν αντιπαραθέσουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες των 1000-1500 και 1500-1500 RPM της δεύτερης πτερωτής (Σχήμα 4.2.10) παρατηρούμε ότι αυξάνοντας την ταχύτητα περιστροφής της πρώτης πτερωτής, η χαρακτηριστική της δεύτερης πτερωτής **μετατοπίζεται κυρίως ως προς την παροχή και κινείται σε ελαφρώς μεγαλύτερους λόγους πίεσης**. Η μετατόπιση σε μεγαλύτερες τιμές παροχής οφείλεται προφανώς στην αυξημένη παροχή του πρώτου ρότορα αφού περιστρέφεται σε υψηλότερες στροφές. Σε απόσταση 2 χορδών όμως παρουσιάζεται, πέραν της μετατόπισης ως προς την παροχή, και σημαντική αύξηση του λόγου πίεσης. Για να κατανοήσουμε καλύτερα το λόγο της μετατόπισης αυτής πρέπει να δούμε άλλες παραμέτρους λειτουργίας της πτερωτής και δει τις γωνίες της ροής. Η ανάλυση των γωνιών ροής ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.2.10: Αντιπαράβολη χαρακτηριστικών καμπύλων δεύτερου ρότορα για σταθερές στροφές (1500 RPM) μεταβαλλόμενου του αξονικού διακένου και του λόγου στροφών.

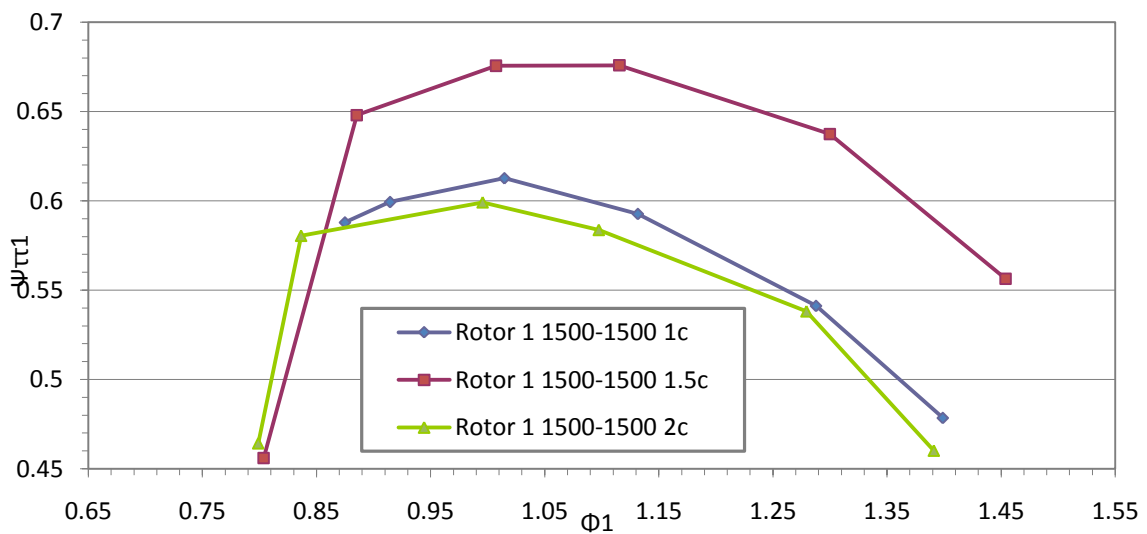
4.3 Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων Φ - Ψ

Αναφορικά με την **πρώτη πτερωτή**, η χαρακτηριστική Φ - Ψ δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη μεταβολή του αξονικού διακένου τουλάχιστον στις μετρήσεις χαμηλών στροφών. Και εδώ παρατηρείται διαφορά στη μέτρηση στις 1500 RPM (Σχήμα 4.3.1). Στη συγκεκριμένη μέτρηση, ελάττωση του αξονικού διακένου να λειτουργεί ευεργετικά, αλλά όπως συμπεράναμε και από τα τις χαρακτηριστικές λόγου πίεσης, η ενδιάμεση απόσταση είναι αυτή που παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα. Δυστυχώς ο αριθμός των σημείων λειτουργίας δεν προσφέρει την απαραίτητη πυκνότητα μετρήσεων που θα μας επέτρεπε αν παρατηρήσουμε μια μεταβολή του Φ_{stall} και να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα για την διεύρυνση της περιοχής λειτουργίας της πτερωτής.

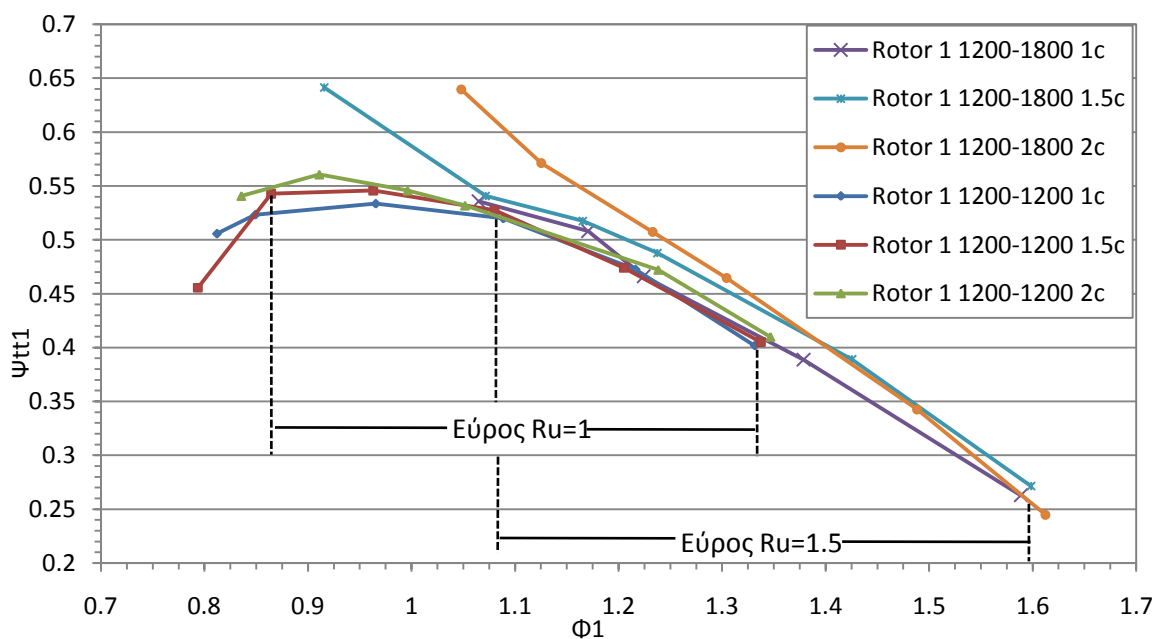
Αν εξετάσουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες ως προς το λόγο στροφών, παρατηρούμε μια σημαντική διαφορά ιδιαίτερα στις μετρήσεις υψηλών στροφών. Ενώ για λόγο στροφών $R_u=1$ οι καμπύλες παρουσιάζουν φυσιολογική μορφή δε συμβαίνει το ίδιο για λόγο στροφών $R_u=1.5$. Στις περιπτώσεις όπου η δεύτερη πτερωτή περιστρέφεται ταχύτερα από την πρώτη, είναι συχνό το φαινόμενο όπου η χαρακτηριστική δεν παρουσιάζει την αναμενόμενη μορφή σταδιακής προσέγγισης τοπικού μέγιστου και πτώσης σε χαμηλότερους συντελεστές φόρτισης. Αντιθέτως σημεία λειτουργίας κοντά στο αναμενόμενο μέγιστο της καμπύλης, όπου αναμένεται πτώση σε χαμηλότερους συντελεστές εμφανίζουν

σταθερή άνοδο σε μεγαλύτερες τιμές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι μετρήσεις όπου η πρώτη πτερωτή περιστρέφεται με 1200RPM (Σχήμα 4.3.2) Οι μετρήσεις αυτές εκάστοτε συνδυάζονται με αύξηση και του βαθμού απόδοσης της περύγωσης σε τιμές άνω της μονάδας. Το φαινόμενο αυτό ίσως εξηγείται αν η ταχύτερη περιστροφή της δεύτερης πτερωτής επιβάλει χαρακτηριστικά στη ροή τα οποία αποδίδονται από την μετρητική αλυσίδα ως βελτιωμένη απόδοση της πρώτης πτερωτής.

Παρόλα αυτά μπορούμε να διακρίνουμε μια τάση αύξησης του εύρους λειτουργίας της πρώτης πτερωτής για λόγο στροφών $R_u=1.5$. Παρά την αδυναμία προσδιορισμού του σημείου Φ_{stall} με ακρίβεια, η χαρακτηριστική για λόγο στροφών $R_u=1.5$ παρουσιάζει μια διεύρυνση της τάξης του 20% (Σχήμα 4.3.2).

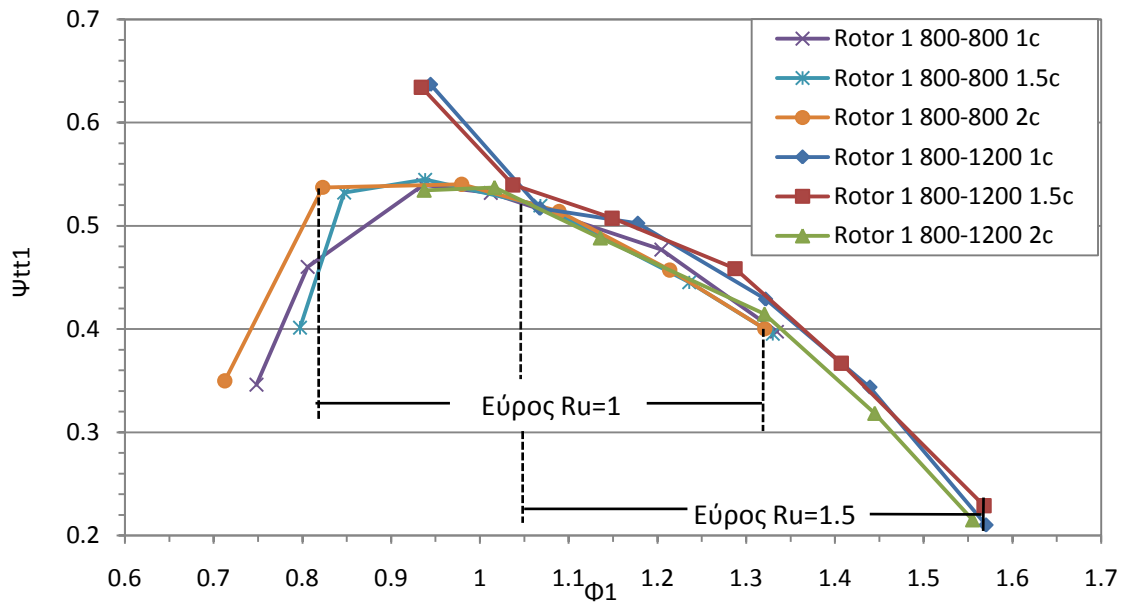


Σχήμα 4.3.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων Φ-Ψ του πρώτου ρότορα για τη μέτρηση 1500-1500 μεταβαλλόμενου του αξονικού διακένου

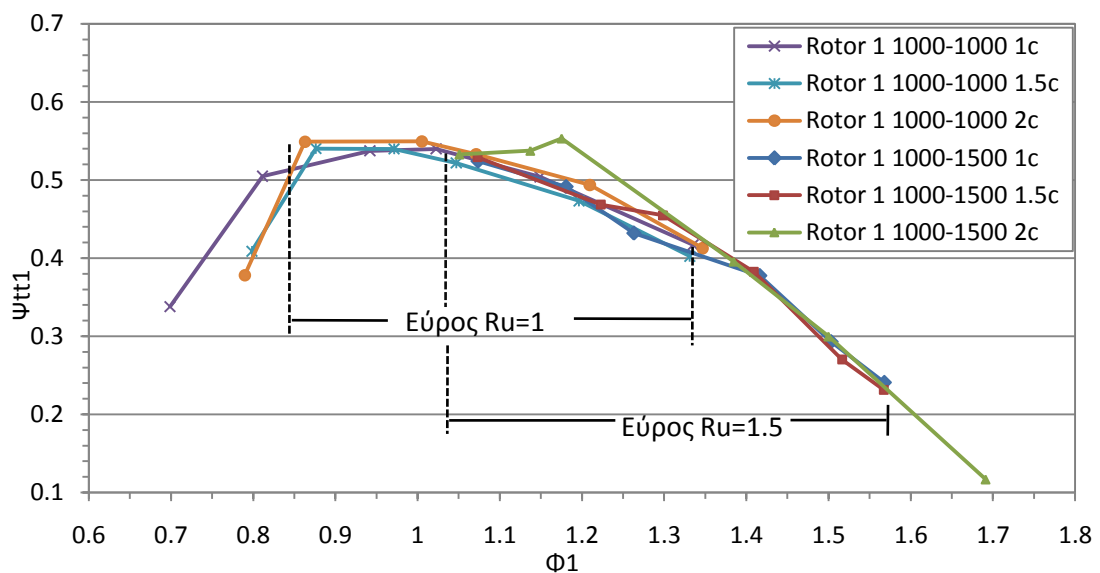


Σχήμα 4.3.2: Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ-Ψ πρώτου ρότορα στις 1200 RPM

Η τάση αυτή είναι εμφανής σε όλα τα ζεύγη στροφών όπου έχουμε μετρήσεις για λόγο στροφών $R_u=1$ & $R_u=1.5$. Στα Σχήματα 4.3.3 & 4.3.4 φαίνεται διεύρυνση της περιοχής λειτουργίας της πρώτης περωτής για τις 800 & 1000 RPM η οποία κυμαίνεται στο 25%.



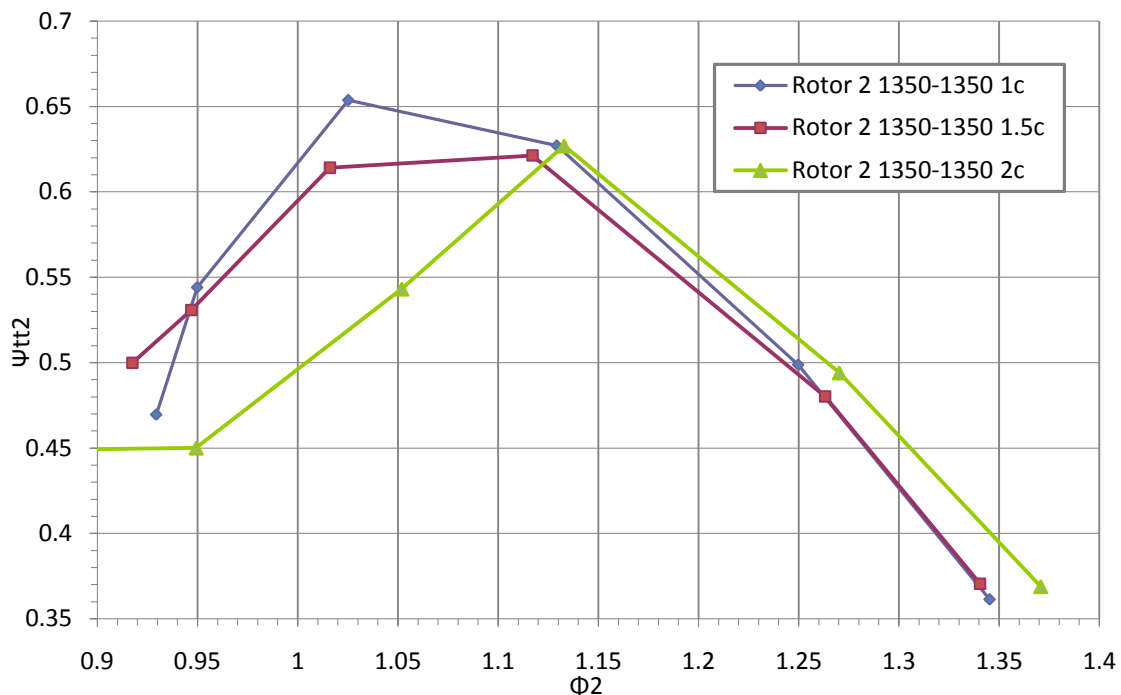
Σχήμα 4.3.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ-Ψ πρώτου ρότορα στις 800 RPM



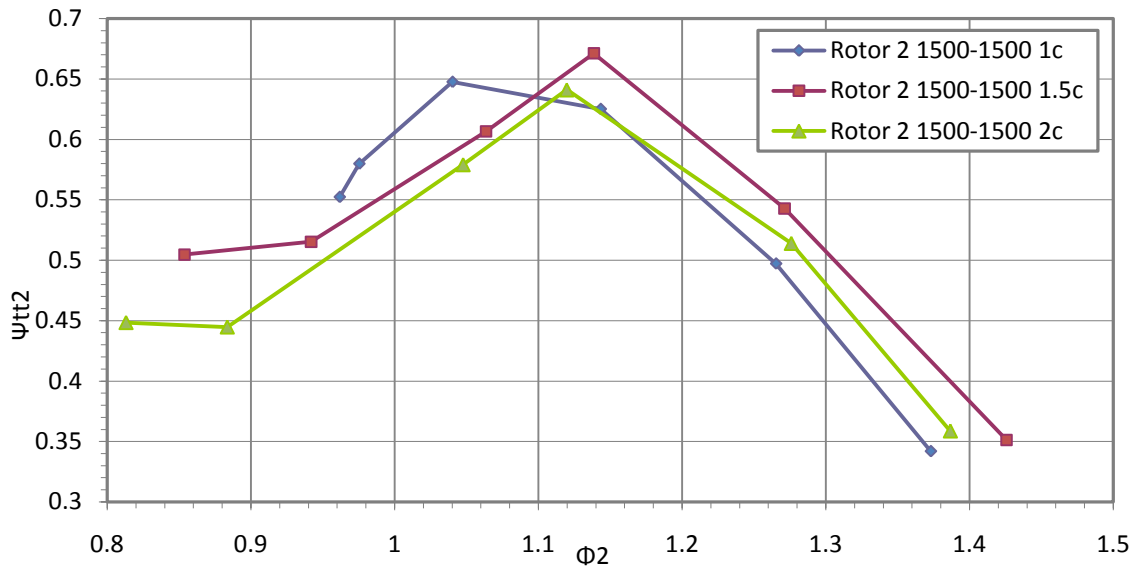
Σχήμα 4.3.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ-Ψ πρώτου ρότορα στις 1000 RPM

Στην περίπτωση της **δεύτερης πτερωτής** πρέπει να εξετάσουμε κάθε λόγο στροφών ξεχωριστά.

Για λόγο στροφών $R_u=1$ παρατηρούμε ότι στις μετρήσεις υψηλών στροφών (1350 & 1500 RPM), ενώ η χαρακτηριστική δεν μεταβάλλεται στα σημεία λειτουργίας μεγαλύτερης παροχής (μικρότεροι λόγοι πίεσης), παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στα σημεία μέγιστης φόρτισης (μέγιστου λόγου πίεσης). Εκεί παρατηρείται μια σαφής **τάση αύξησης του εύρους λειτουργίας με μικρότερο διάκενο** (Σχήματα 4.3.3 & 4.3.4). Η συμπεριφορά βελτιώνεται τόσο μεταξύ δύο και μιάμισης χορδής όσο και μεταξύ μιάμισης και μίας χορδής. Η τάση αύξησης του εύρους λειτουργίας είναι σαφώς μεγαλύτερη όταν βαίνουμε από διάκενο μιάμισης χορδής σε διάκενο μίας χορδής. Μεγαλύτερος αριθμός σημείων λειτουργίας στην κορυφή της χαρακτηριστικής θα μπορούσε να δώσει μια πιο σαφή εικόνα για τη μετατόπιση του σημείου αποκόλλησης Φ_{stall} . Παρά τη μικρή πυκνότητα δεδομένων η βελτίωση είναι σαφής και γίνεται ολοένα πιο εμφανής αυξανόμενων των στροφών. Μία εκτίμηση της μετατόπισης του σημείου Φ_{stall} στις υψηλές στροφές κυμαίνεται στα 0.08 μέχρι και 0.11 του αδιάστατου συντελεστή παροχής. Ακολουθούν μεγεθύνσεις των συγκριτικών διαγραμμάτων των εν λόγω μετρήσεων για οπτικοποίηση των μεταβολών.

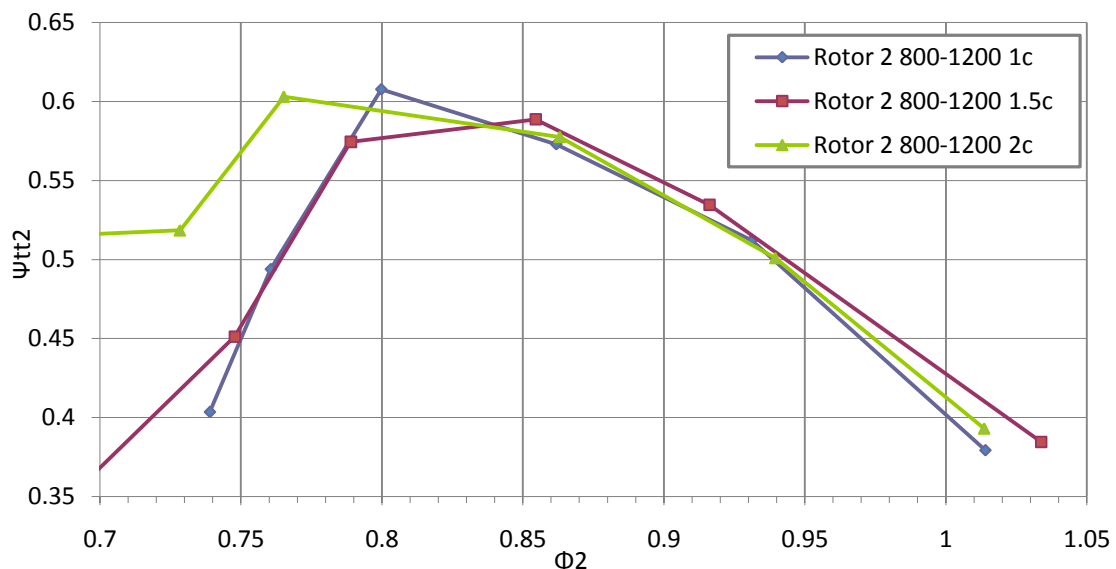


Σχήμα 4.3.5: Μεγέθυνση των χαρακτηριστικών καμπύλων Φ-Ψ του set στροφών 1350-1350



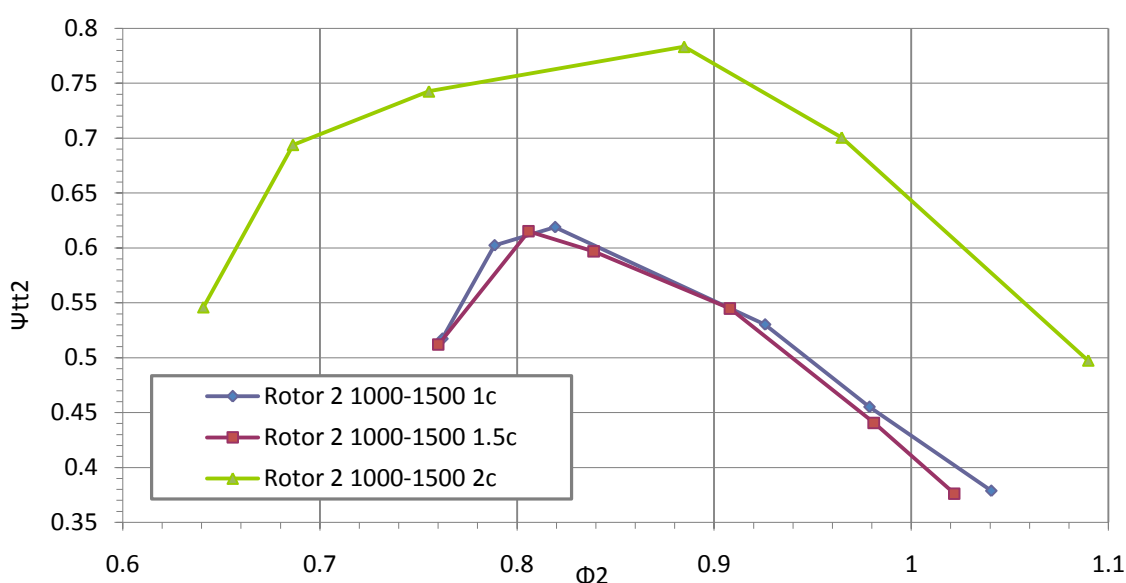
Σχήμα 4.3.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ - Ψ του set στροφών 1500-1500

Για λόγο στροφών $R_n=1.5$ δεν παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά. Αντιθέτως το μεγαλύτερο διάκενο (δύο χορδές) είναι αυτό που φαίνεται να ευνοεί τη λειτουργία της δεύτερης περωτής. Ωστόσο οι μετρήσεις δεν είναι αρκετές για να καταλήξουμε σε κάποιο ασφαλές συμπέρασμα. Ενδεικτικό είναι ότι για 1200RPM (Σχήμα 4.3.5) η χαρακτηριστική των δύο χορδών έχει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας αλλά κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα φόρτισης, στο set μετρήσεων 1500RPM (Σχήμα 4.3.6) παρουσιάζει θεαματική βελτίωση τόσο σε εύρος όσο και σε επίπεδα φόρτισης, ενώ στις υψηλές στροφές φαίνεται ανεπηρέαστη και ταυτίζεται με τις χαρακτηριστικές μίας και μιάμισης χορδής.



Σχήμα 4.3.7: Μεγέθυνση των χαρακτηριστικών καμπύλων Φ - Ψ του set στροφών 800-1200

Στο σημείο αυτό πρέπει να σταθούμε στην επίδραση του λόγου στροφών στις μετρήσεις όπου η δεύτερη πτερωτή στρέφονταν με 1500 RPM. Ενώ στην μέτρηση λόγου στροφών $R_u=1$ η χαρακτηριστική δεν επηρεάζεται αισθητά, στην μέτρηση όπου ο λόγος στροφών είναι $R_u=1.5$ η λειτουργία της δεύτερης βαθμίδας αλλάζει δραματικά. Η πτερωτή λειτουργεί σε μεγαλύτερους συντελεστές φόρτισης και σε σαφώς μεγαλύτερο εύρος. Η βελτίωση αυτή ωστόσο παρουσιάζεται όταν το ακτινικό διάκενο είναι στη μέγιστη τιμή (δύο χορδές) ενώ για τις άλλες τιμές η χαρακτηριστικές ουσιαστικά ταυτίζονται και μάλιστα η πτερωτή έχει σχετικά φτωχή απόδοση. Η συμπεριφορά αυτή ίσως μπορεί να οφείλεται στο λόγο στροφών και τις γωνίες πρόσπτωσης που «βλέπουν» τα πτερύγια του δεύτερου ρότορα.



Σχήμα 4.3.8: Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ - Ψ του set στροφών 1000-1500

4.4 Σύγκριση γωνιών ροής

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μία βαθμίδα αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών είναι απαραίτητο να μελετήσουμε τις γωνίες της ροής. Κυρίως δε, τη συμπεριφορά και τις μεταβολές της γωνίας εξόδου του πρώτου ρότορα και της γωνίας εισόδου του δεύτερου ρότορα. Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτονται επιλεκτικά κάποια διαγράμματα ορισμένων set στροφών μόνο, προς αποφυγή κορεσμού. Δεδομένου ότι στις χαμηλές στροφές δεν παρατηρούνται αλλαγές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της βαθμίδας θα επικεντρώσουμε την ανάλυση στις μετρήσεις 1500-1500 RPM και 1000-1500 RPM όπου και παρουσιάζονται τα πιο ενδιαφέροντα στοιχεία.

. Θα προσπαθήσουμε να ερμηνεύσουμε την μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας της πρώτης πτερωτής που παρουσιάζεται στη μέτρηση 1500-1500RPM για αξονικό διάκενο πτερωτών ίσο με μιάμιση χορδή (1.5c) καθώς και την αντίστοιχη μετατόπιση της χαρακτηριστικής της δεύτερης πτερωτής που παρουσιάστηκε στη μέτρηση 1000-1500RPM για αξονικό διάκενο δύο χορδών (2c). Υπενθυμίζεται ότι πέραν του σημείου μέγιστης παροχής (1^ο σημείο λειτουργίας) οποιαδήποτε σύγκριση θα είναι ποιοτική και όχι ποσοτική καθώς τα σημεία λειτουργίας διαφορετικών μετρήσεων σε ίδιες στροφές δεν συμπίπτουν σε κοινές τιμές παροχής.

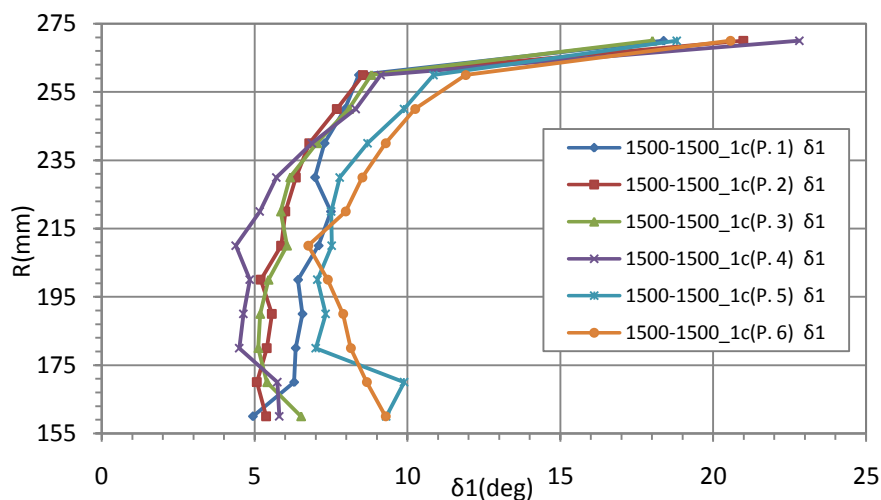
4.4.1 Γωνία παρέκκλισης πρώτης πτερωτής

Συγκρίνοντας τις γωνίες παρέκκλισης του πρώτου ρότορα (Σχήματα 4.4.1 4.4.2 & 4.4.3 για λόγο στροφών $R_u=1$, Σχήματα 4.3.4 4.3.5 & 4.3.6 για λόγο στροφών $R_u=1.5$) παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στη ροή όταν αλλάζει το αξονικό διάκενο. Συγκεκριμένα για λόγο στροφών $R_u=1$ οι γωνίες παρέκκλισης για απόσταση πτερωτών ίση με μία χορδή (Σχήμα 4.4.1) παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση στην περιοχή 5-8 μοιρών και υπάρχει εμφανής τάση για αύξηση προς την άκρη του πτερυγίου. Συγκριτικά με τις άλλες μετρήσεις, στα τα ενδιάμεσα σημεία λειτουργίας, οι γωνίες παρέκκλισης τείνουν να αυξηθούν νωρίτερα. Αυτό ίσως αποτελεί ένδειξη ευαισθησίας της ροής σε μικρό αξονικό διάκενο. Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρούμε και στις γωνίες για αξονικό διάκενο ίσο με 2 χορδές (Σχήμα 4.4.3). Και εδώ υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση στην περιοχή 5-10 μοιρών με σαφή τάση για αύξηση της γωνίας παρέκκλισης προς την άκρη του πτερυγίου. Επιπλέον φαίνεται το πτερύγιο να μην μπορεί να επιβάλλει γωνίες παρέκκλισης μικρότερες κάποιας συγκεκριμένης τιμής ανά ακτινική θέση.

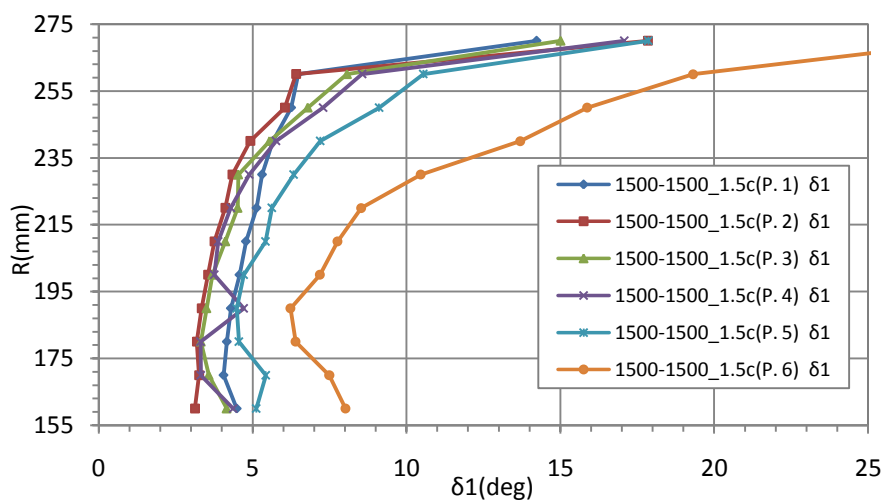
Σημαντική διαφορά παρουσιάζεται στη μέτρηση με αξονικό διάκενο πτερωτών ίσο με μιάμιση χορδή για λόγο στροφών $R_u=1$ (Σχήμα 4.4.2). Η συγκέντρωση είναι εμφανώς μετατοπισμένη και κυμαίνεται στην περιοχή 3-5 μοιρών. Επιπλέον η τάση για αύξηση της γωνίας παρέκκλισης στις περιφερειακές θέσεις είναι αισθητά μειωμένη. Η μετατόπιση αυτή καταδεικνύει καλύτερη λειτουργία του πτερυγίου καθώς η ροή τείνει περισσότερο προς τη γωνία μετάλλου σε μεγαλύτερο μήκος του πτερυγίου.

Για λόγο στροφών $R_u=1.5$ παρατηρείται τάση αύξησης της γωνίας παρέκκλισης στα πτερύγια του πρώτου ρότορα αυξανόμενου του αξονικού διακένου στην προβληματική περιοχή της βάσης. Ανάλογη συμπεριφορά δεν παρατηρείται για λόγο στροφών $R_u=1$. Εκεί παρατηρείται ομαδοποίηση των γωνιών παρέκκλισης ανεξαρτήτως αξονικού διακένου. Το γεγονός αυτό

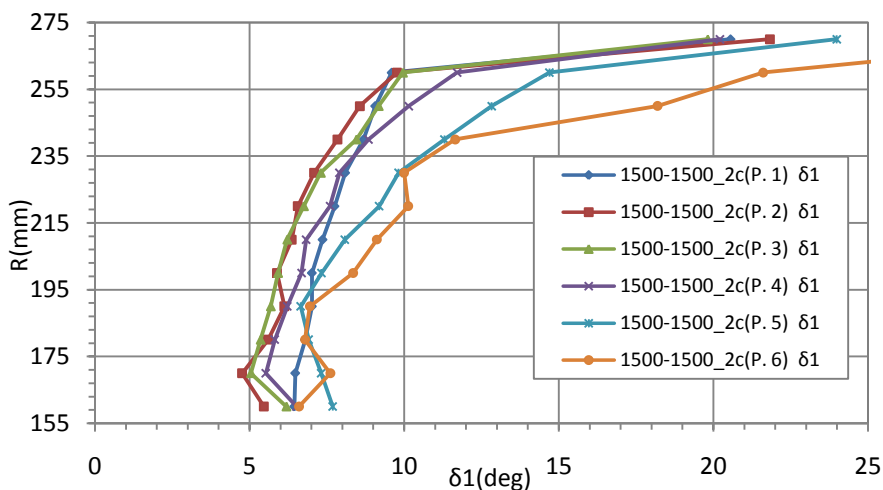
πιθανότατα έγκειται στην αυξημένη ταχύτητα περιστροφής του δεύτερου ρότορα η οποία πιθανώς επιβάλλει συγκεκριμένη λειτουργία στα πτερύγια του πρώτου.



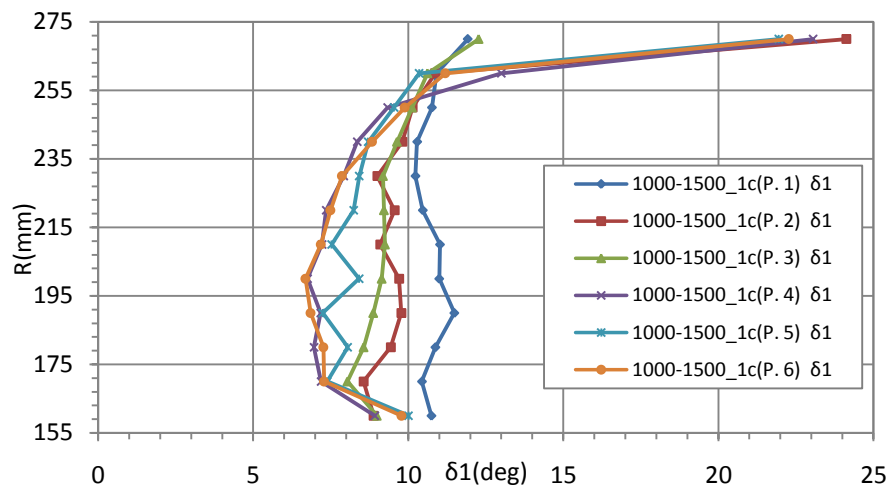
Σχήμα 4.4.1: Γωνία παρέκλισης πρώτης πτερωτής 1500-1500 1c αξονική απόσταση



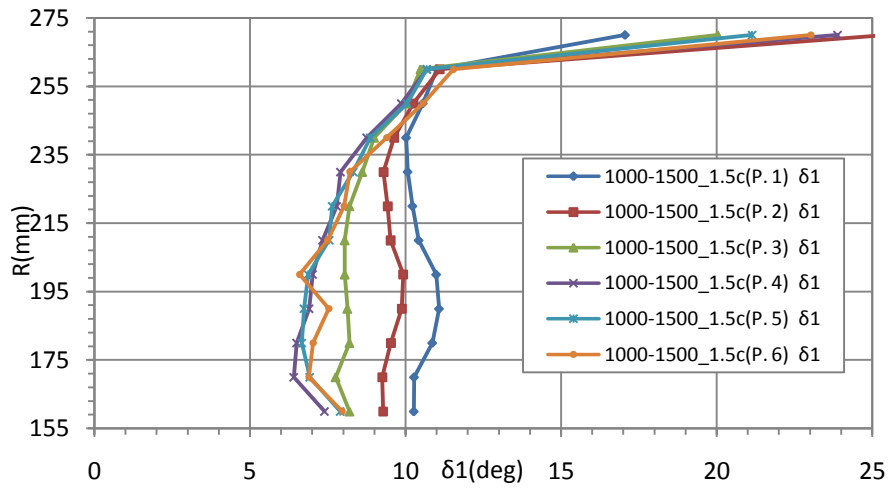
Σχήμα 4.4.2: Γωνία παρέκλισης πρώτης πτερωτής 1500-1500 1.5c αξονική απόσταση



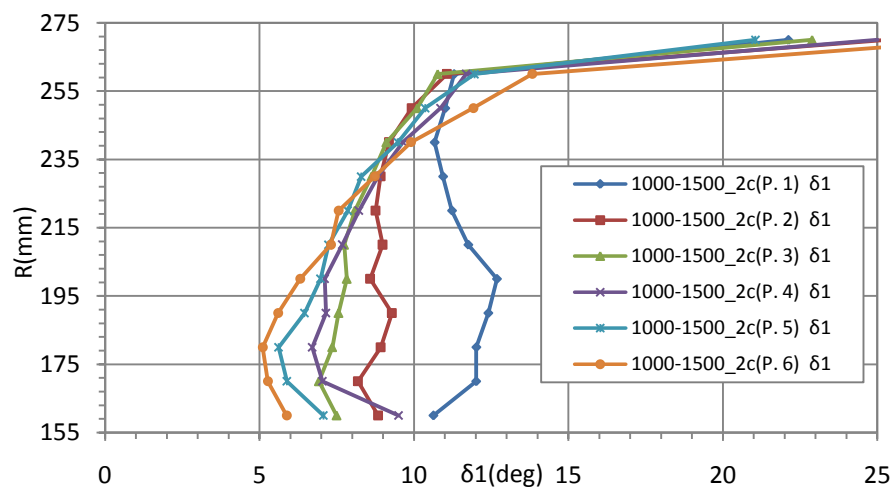
Σχήμα 4.4.3: Γωνία παρέκλισης πρώτης πτερωτής 1500-1500 2c αξονική απόσταση



Σχήμα 4.4.4: Γωνία παρέκκλισης πρώτης πτερωτής 1000-1500 1c αξονική απόσταση



Σχήμα 4.4.5: Γωνία παρέκκλισης πρώτης πτερωτής 1000-1500 1.5c αξονική απόσταση



Σχήμα 4.4.6: Γωνία παρέκκλισης πρώτης πτερωτής 1000-1500 1c αξονική απόσταση

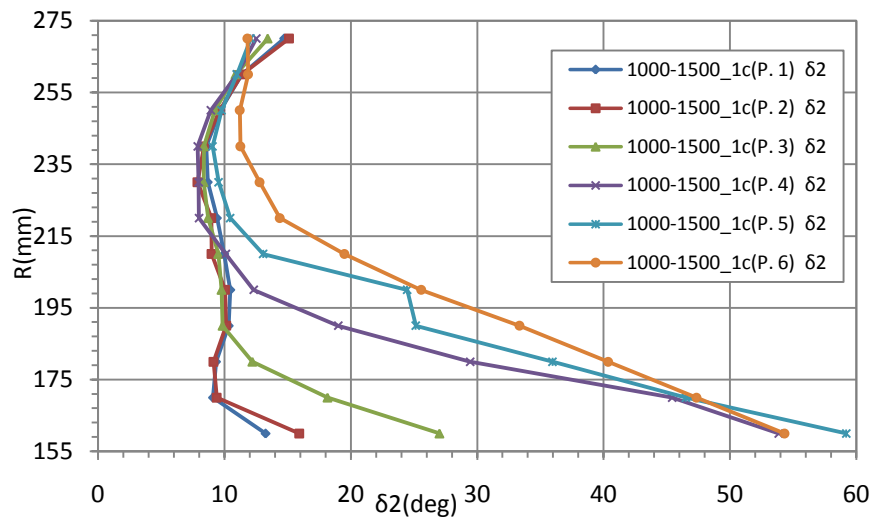
4.4.2 Γωνία παρέκκλισης δεύτερης πτερωτής

Ανάλογη συμπεριφορά με αυτή του πρώτου ρότορα παρατηρείται και στις γωνίες παρέκκλισης του δεύτερου στη μέτρηση 1000-1500 (Σχήματα 4.4.7, 4.4.8 & 4.4.9). Για αξονικό διάκενο μιας και μιάμισης χορδής οι γωνίες παρέκκλισης παρουσιάζουν ομαδοποίηση στην περιοχή των 10 μοιρών (Σχήματα 4.4.7 & 4.4.8). Μειούμενης της παροχής είναι εμφανής η τάση αύξησης της γωνίας παρέκκλισης σε επίπεδα έντονης αποκόλλησης. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται ήδη από το 3^ο σημείο λειτουργίας κάτι που υποδεικνύει ότι το πτερυγίο δεν μπορεί να δουλέψει σωστά και να στρέψει τη ροή. Η αύξηση της γωνίας παρέκκλισης συντελείται κυρίως κάτω της μέσης ακτίνας. Στο κομμάτι αυτό του πτερυγίου του δεύτερου ρότορα δεν υπάρχει κάποια συστροφή σε αντίθεση με το τμήμα από τη μέση ακτίνα έως το tip όπου υπάρχει γωνία συστροφής 2.2 μοιρών. Το κατασκευαστικό αυτό χαρακτηριστικό ίσως ερμηνεύει τη συμπεριφορά της ροής στο κατώτερο τμήμα του πτερυγίου.

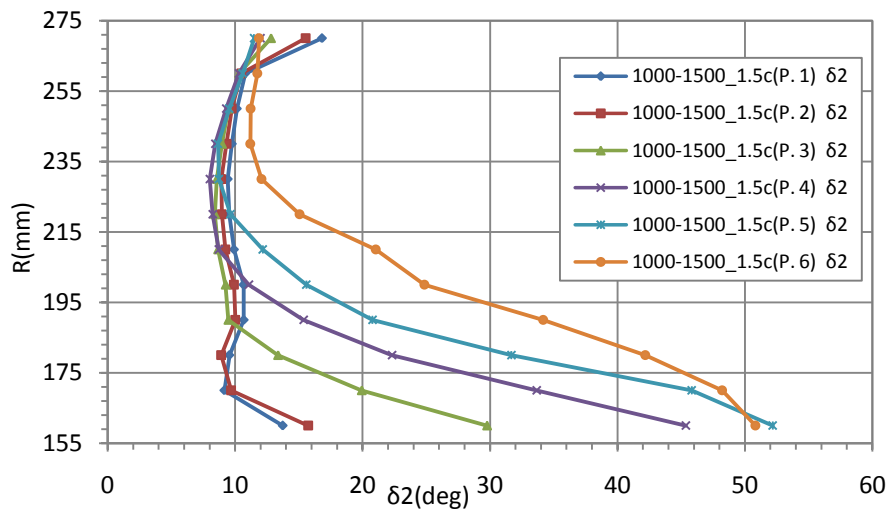
Στην αντίστοιχη μέτρηση με αξονικό διάκενο δύο χορδές (Σχήμα 4.4.9) η ομαδοποίηση των γωνιών παρέκκλισης παρατηρείται σε τιμές σαφώς μικρότερες των 10 μοιρών. Η τάση για αύξηση της γωνίας παρέκκλισης ωστόσο παραμένει, και η ροή εισέρχεται σε ξεκάθαρη αποκόλληση. Το φαινόμενο παρατηρείται και εδώ από το 3^ο σημείο λειτουργίας.

Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι για λόγο στροφών $R_u=1.5$, στα σημεία λειτουργίας που βρίσκονται κοντά στην κορυφή της χαρακτηριστικής, η αύξηση της γωνίας παρέκκλισης φαίνεται να αναστέλλεται αυξανόμενου του αξονικού διάκενου. Όσο αυξάνει το αξονικό διάκενο παρατηρούνται μικρότερες γωνίες παρέκκλισης σε μεγαλύτερο ποσοστό του πτερυγίου.

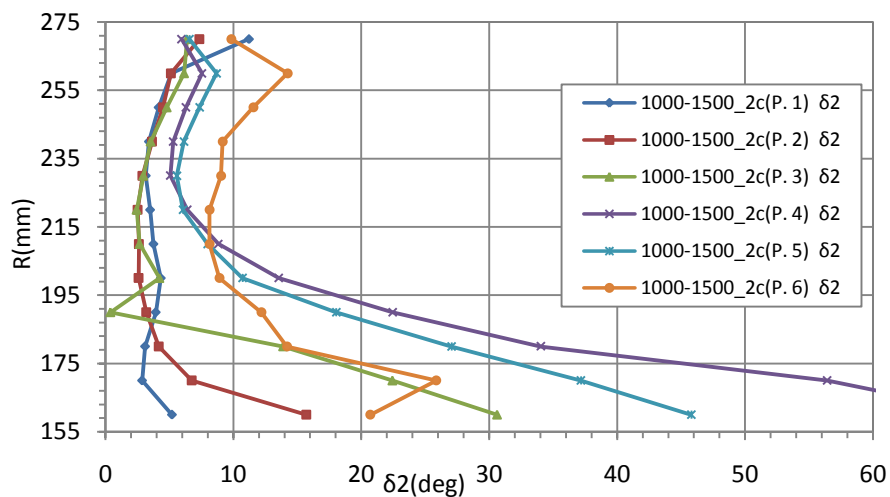
Την αντίθετη συμπεριφορά παρατηρούμε για λόγο στροφών $R_u=1$ στη μέτρηση 1500-1500RPM (Σχήματα 4.3.10 4.3.11 & 4.3.12). Εκεί η αύξηση του αξονικού διάκενου προκαλεί μεγαλύτερες γωνίες παρέκκλισης για σταθερό ύψος πτερυγίου αν και στη βάση του πτερυγίου βλέπουμε μειούμενες τιμές γωνιών στο τμήμα της ροής που έχει αποκολληθεί. Οι παρατηρήσεις αυτές αφορούν σημεία λειτουργίας κοντά στην κορυφή της χαρακτηριστικής (από το 3^ο σημείο λειτουργίας και μετά). Η εξαγωγή συμπερασμάτων από τη συμπεριφορά αυτή θα ήταν επισφαλής δεδομένης της αποκόλλησης της ροής σε μεγάλο ποσοστό του πτερυγίου.



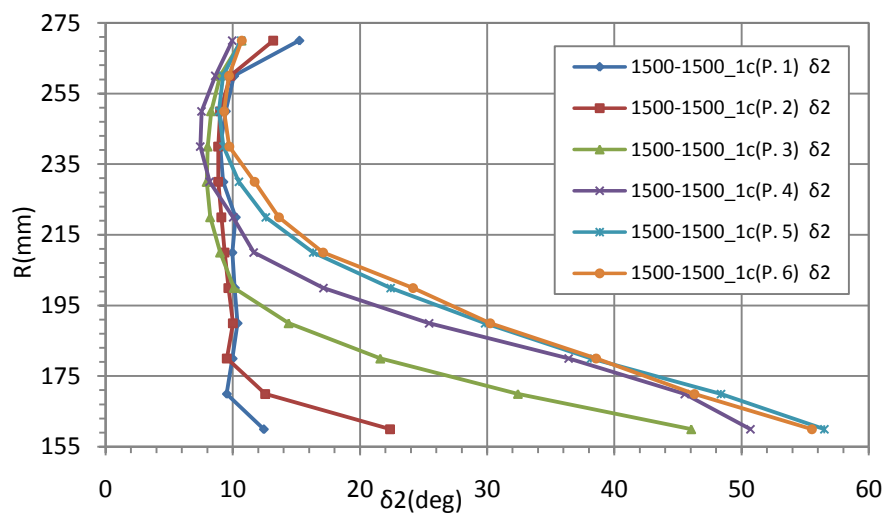
Σχήμα 4.4.7: Γωνία παρέκκλισης δεύτερης πτερωτής 1000-1500 1c αξονική απόσταση



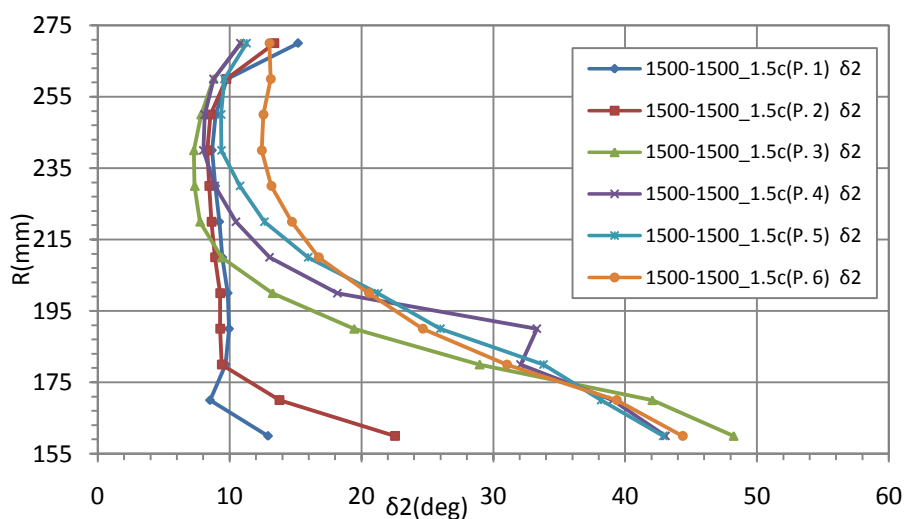
Σχήμα 4.4.8: Γωνία παρέκκλισης δεύτερης πτερωτής 1000-1500 1.5c αξονική απόσταση



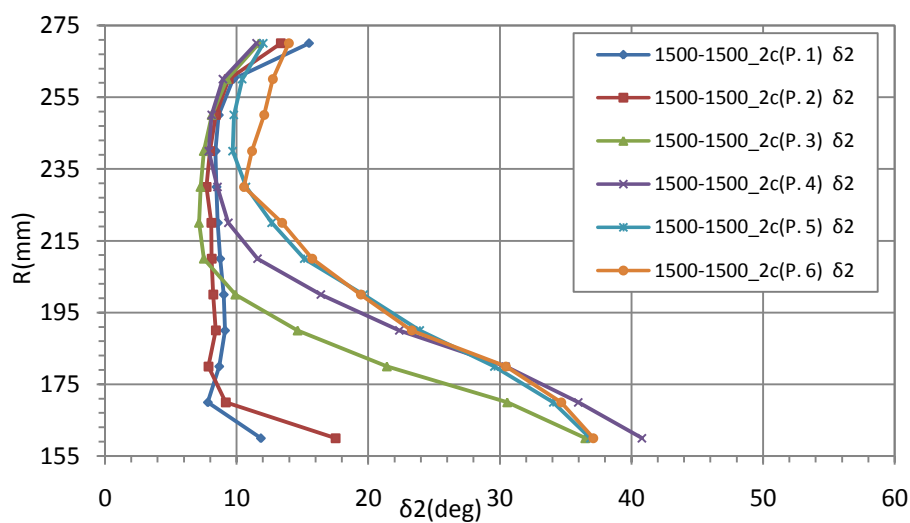
Σχήμα 4.4.9: Γωνία παρέκκλισης δεύτερης πτερωτής 1000-1500 2c αξονική απόσταση



Σχήμα 4.4.10: Γωνία παρέκκλισης δεύτερης πτερωτής 1500-1500 1c αξονική απόσταση



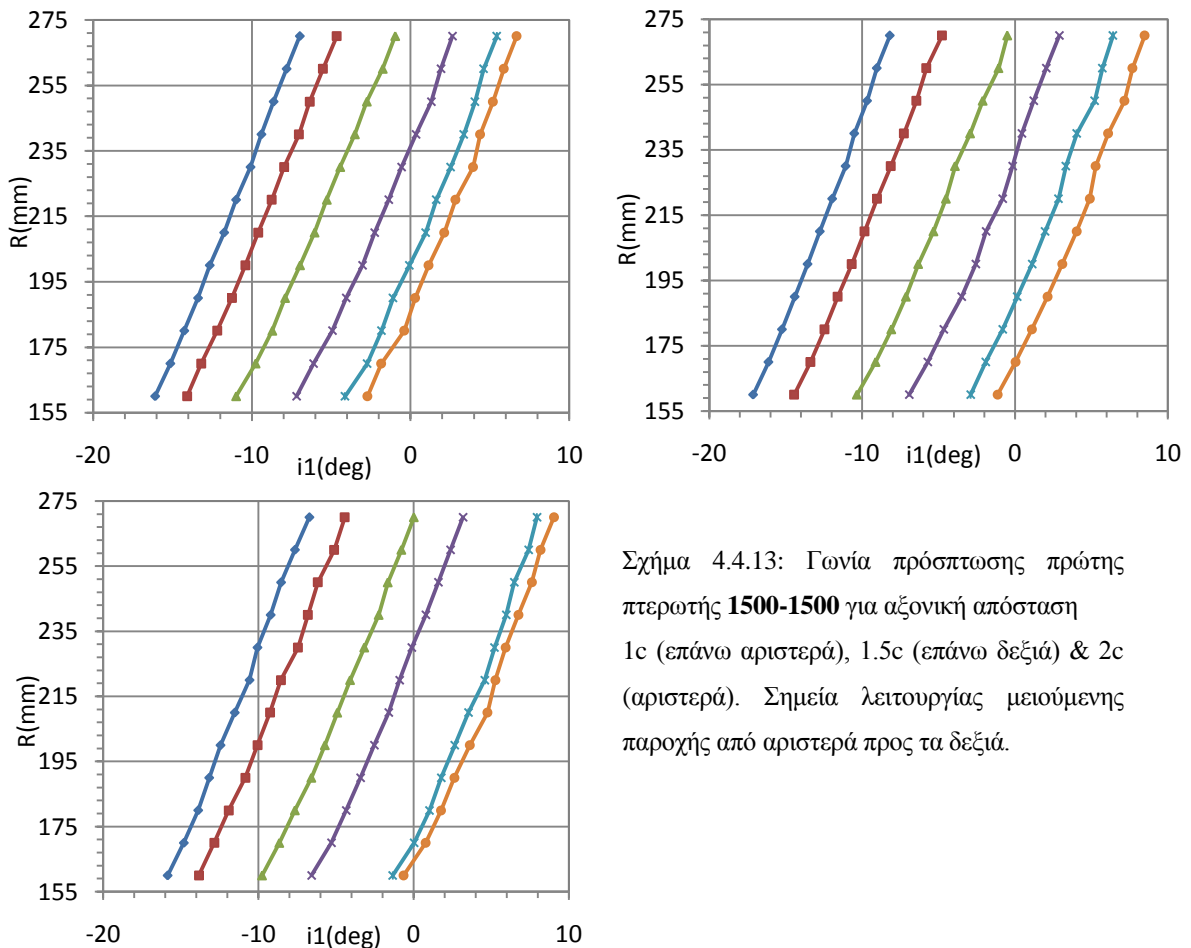
Σχήμα 4.4.11: Γωνία παρέκκλισης δεύτερης πτερωτής 1500-1500 1.5c αξονική απόσταση



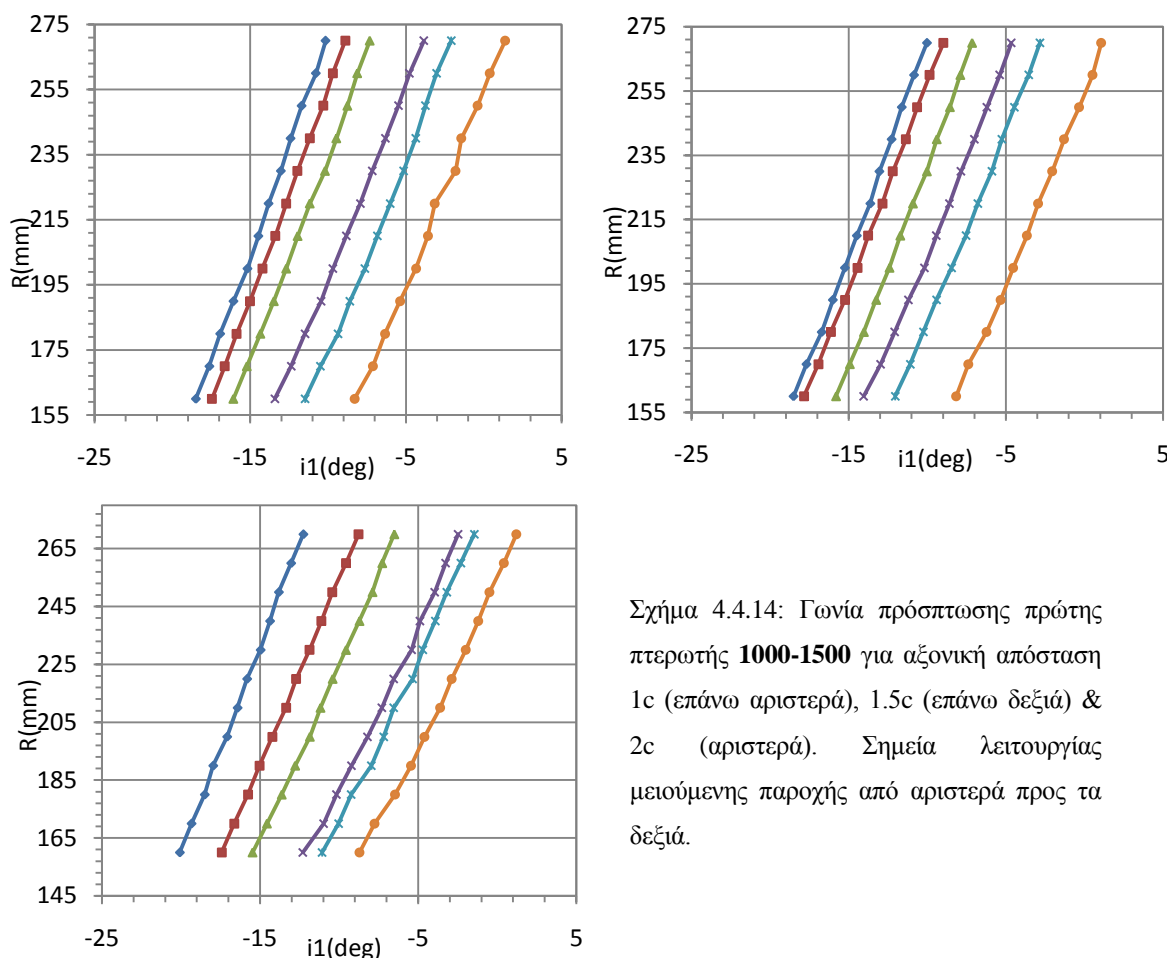
Σχήμα 4.4.12: Γωνία παρέκκλισης δεύτερης πτερωτής 1500-1500 2c αξονική απόσταση

4.4.3 Γωνία πρόσπτωσης πρώτης πτερωτής

Όπως προαναφέρθηκε η σύγκριση γωνιών πρόσπτωσης μεταξύ σημείων λειτουργίας πέραν του πρώτου θα ήταν επισφαλής. Για το λόγο αυτό η σύγκριση των διαγραμμάτων αναφέρεται σε τάσεις μεταβολής Η μεταβολή του αξονικού διακένου δεν φαίνεται να έχει κάποια επίπτωση στην γωνία πρόσπτωσης του πρώτου ρότορα (Σχήμα 4.4.13). Η μη εξάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης της πρώτης πτερωτής από την εγγύτητα της δεύτερης είναι αναμενόμενη καθώς το αξονικό διάκενο επηρεάζει το κομμάτι της ροής ανάμεσα στις δύο. Μπορούμε ωστόσο να παρατηρήσουμε μεταβολή των τιμών της γωνίας πρόσπτωσης με αλλαγή του λόγου στροφών. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την μεταβολή της παροχής η οποία έχει αντίκτυπο στο τμήμα της χαρακτηριστικής στο οποίο θα λειτουργήσει ο πρώτος ρότορας. Υψηλότερες στροφές στη δεύτερη πτερωτή προκαλούν αύξηση παροχής του πρώτου ρότορα και μετατόπιση του εύρους λειτουργίας του. Χαρακτηριστικό είναι ότι οι τιμές της γωνίας πρόσπτωσης των πρώτων σημείων λειτουργίας του πρώτου ρότορα για λόγο στροφών $R_u=1$ είναι αντίστοιχες με αυτές ενδιάμεσων σημείων λειτουργίας για λόγο στροφών $R_u=1.5$ (Σχήματα 4.3.16, 4.3.17 & 4.3.18 σε σύγκριση με σχήματα 4.3.19, 4.3.20 & 4.3.21).



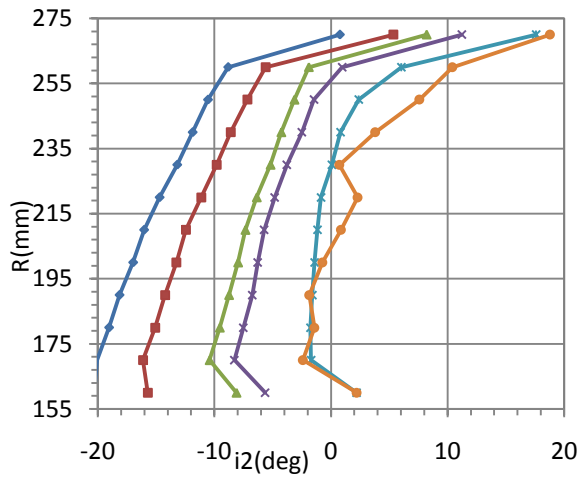
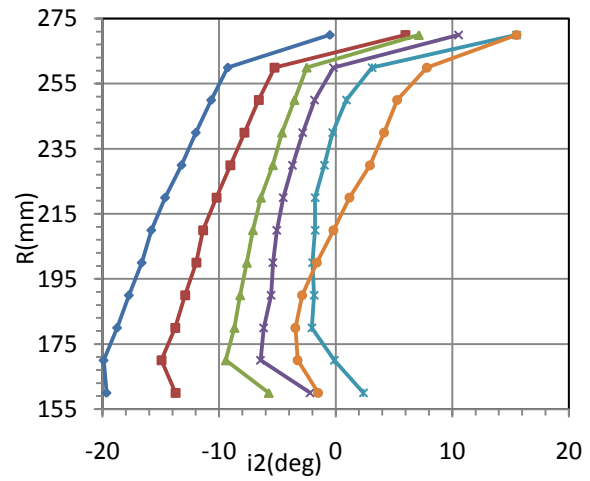
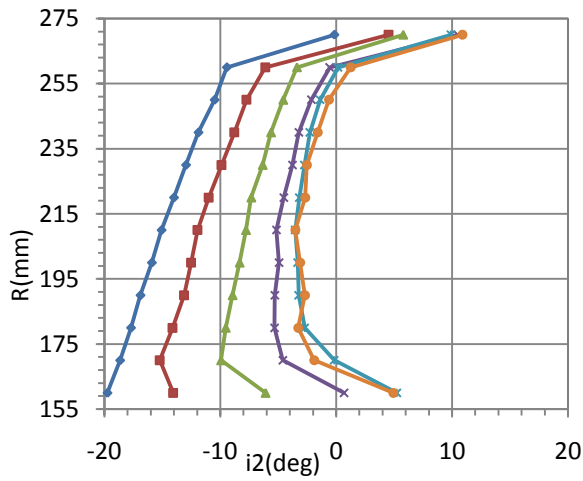
Σχήμα 4.4.13: Γωνία πρόσπτωσης πρώτης πτερωτής **1500-1500** για αξονική απόσταση 1c (επάνω αριστερά), 1.5c (επάνω δεξιά) & 2c (αριστερά). Σημεία λειτουργίας μειούμενης παροχής από αριστερά προς τα δεξιά.



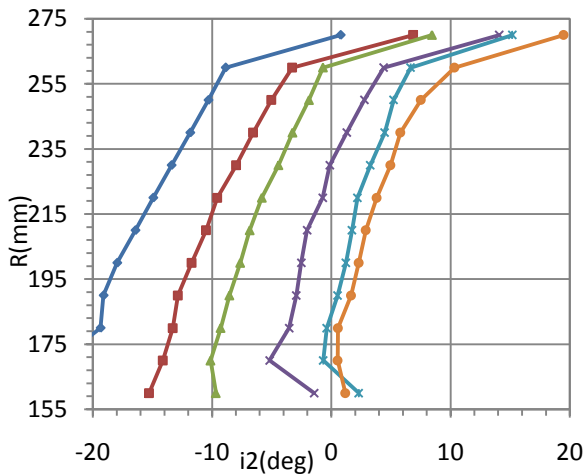
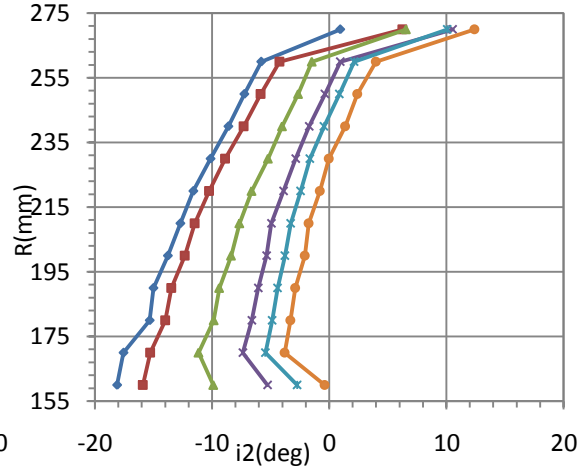
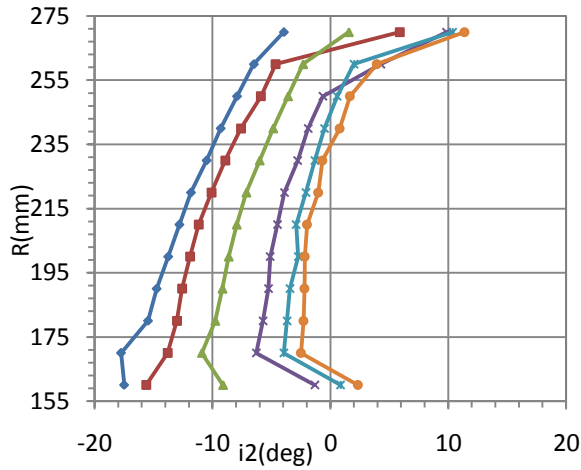
Σχήμα 4.4.14: Γωνία πρόσπτωσης πρώτης πτερωτής **1000-1500** για αξονική απόσταση 1c (επάνω αριστερά), 1.5c (επάνω δεξιά) & 2c (αριστερά). Σημεία λειτουργίας μειούμενης παροχής από αριστερά προς τα δεξιά.

4.4.4 Γωνία πρόσπτωσης δεύτερης πτερωτής

Και εδώ η σύγκριση πρέπει να είναι ποιοτική και όχι ποσοτική λόγω μη αντιστοιχίας των σημείων λειτουργίας. Από μια επισκόπηση των δεδομένων προκύπτει μια πρώτη σημαντική παρατήρηση, η οποία αφορά τις μεγάλες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης σε όλο το εύρος λειτουργίας. Καθώς βαίνουμε σε σημεία λειτουργίας χαμηλότερων παροχών και υψηλότερων λόγων πίεσης παρατηρείται σημαντική μείωση της γωνίας πρόσπτωσης σε όλο το μήκος του πτερυγίου παραμένοντας όμως μακριά από το σημείο σχεδίασης. Στις γωνίες πρόσπτωσης της δεύτερης πτερωτής δεν παρουσιάζεται σημαντική διαφοροποίηση ούτε συναρτήσε του αξονικού διακένου ούτε συναρτήσε του λόγου στροφών (Σχήματα 4.3.22 έως 4.3.27). Σε λόγο στροφών $R_u=1.5$ παρατηρείται ελαφρώς αυξημένη διαφοροποίηση της γωνίας πρόσπτωσης μεταξύ hub και tip του πτερυγίου. Ποσοτικός σχολιασμός της ελαφράς μετατόπισης των γωνιών πρόσπτωσης σε χαμηλότερες τιμές στη μέτρηση 1000-1500RPM 2c αξονικό διάκενο (Σχήμα 4.3.27), συγκριτικά με τις μετρήσεις μικρότερων αξονικών διακένων θα ήταν επισφαλής, αν και γνωρίζουμε ότι η μέτρηση αυτή έχει παρουσιάσει καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.4.15: Γωνία πρόσπτωσης δεύτερης περωτής **1500-1500** για αξονική απόσταση 1c (επάνω αριστερά), 1.5c (επάνω δεξιά) & 2c (αριστερά). Σημεία λειτουργίας μειούμενης παροχής από αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 4.4.16: Γωνία πρόσπτωσης δεύτερης περωτής **1000-1500** για αξονική απόσταση 1c (επάνω αριστερά), 1.5c (επάνω δεξιά) & 2c (αριστερά). Σημεία λειτουργίας μειούμενης παροχής από αριστερά προς τα δεξιά.

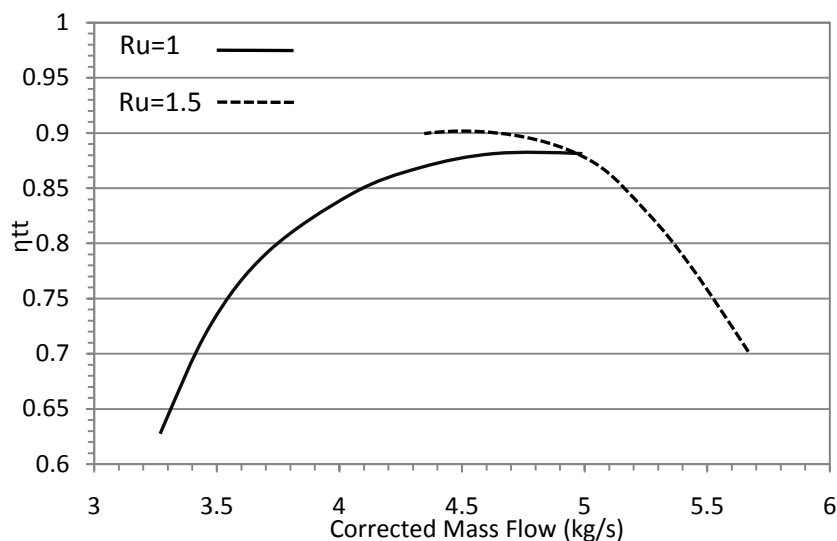
4.5 Σύγκριση βαθμού απόδοσης

Λόγο της αυξημένης ευαισθησίας που έχει παρατηρηθεί στη μέτρηση του συγκεκριμένου μεγέθους, τα δεδομένα θα σχολιασθούν αναφορικά με τις τάσεις μεταβολών που παρουσιάζουν, σε κάθε ρότορα ξεχωριστά. Το μέγεθος του βαθμού απόδοσης είναι αυτό το οποίο μπορεί να καταδείξει τον συνδυασμό των παραμέτρων ο οποίος επιτρέπει στην εκάστοτε πτερωτή να λειτουργεί το δυνατόν βέλτιστα.

Δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι το αξονικό διάκενο διαδραματίζει κάποιο ρόλο στο βαθμό απόδοσης καθώς οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν ήταν μικρές και ως επί το πλείστον εντός του περιθωρίου σφάλματος. Η παρατήρηση αυτή αφορά τόσο τον πρώτο όσο και τον δεύτερο ρότορα.

4.5.1 Βαθμός απόδοσης πρώτου ρότορα

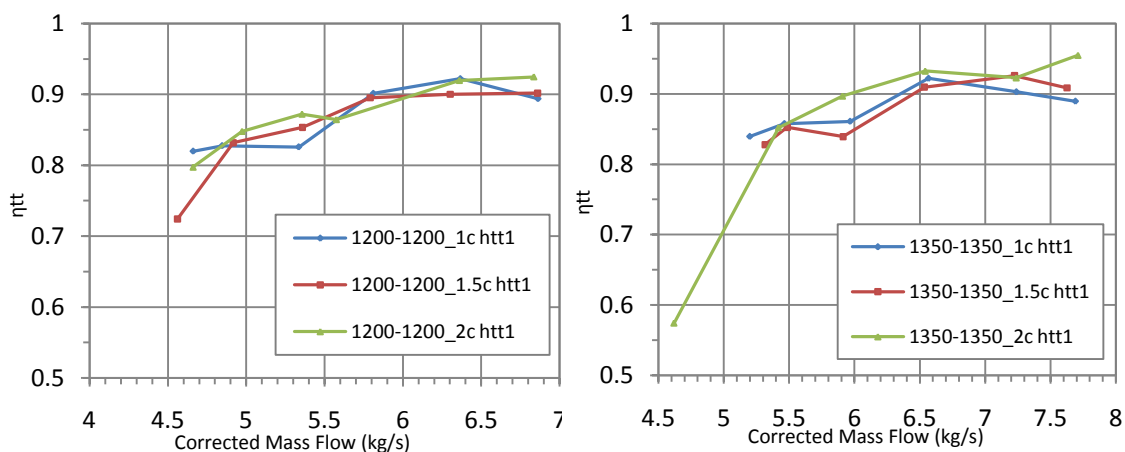
Γνωρίζουμε ότι η μεταβολή του λόγου στροφών αναγκάζει τον πρώτο ρότορα να λειτουργεί σε διαφορετικό τμήμα της χαρακτηριστικής. Αν συνδυάσουμε τις μετρήσεις του βαθμού απόδοσης και των δύο λόγων στροφών για σταθερές στροφές του πρώτου ρότορα προκύπτει μια ολοκληρωμένη εικόνα της εξέλιξης του μεγέθους κατά μήκος της πλήρους χαρακτηριστικής. Η πορεία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.1 και προκύπτει από τις μετρήσεις του πρώτου ρότορα όπου υπάρχουν δεδομένα και για τους δύο λόγους στροφών (800,1000 & 1200RPM). Παρατηρείται μια ομαλή μετάβαση από χαμηλούς βαθμούς απόδοσης σε μια μέγιστη τιμή ακολουθούμενη από πτώση σε



Σχήμα 4.5.1: Απεικόνιση της μεταβολής του βαθμού απόδοσης του πρώτου ρότορα

χαμηλότερες τιμές. Η επίτευξη του μέγιστου βαθμού απόδοσης παρατηρείται στα κοινά σημεία λειτουργίας που αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές παροχής της χαρακτηριστικής για λόγο στροφών $R_u=1.5$ και μικρής παροχής για την χαρακτηριστική που προκύπτει για $R_u=1$. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη να διερευνήσουμε την πορεία του βαθμού απόδοσης για κάθε λόγο στροφών ξεχωριστά.

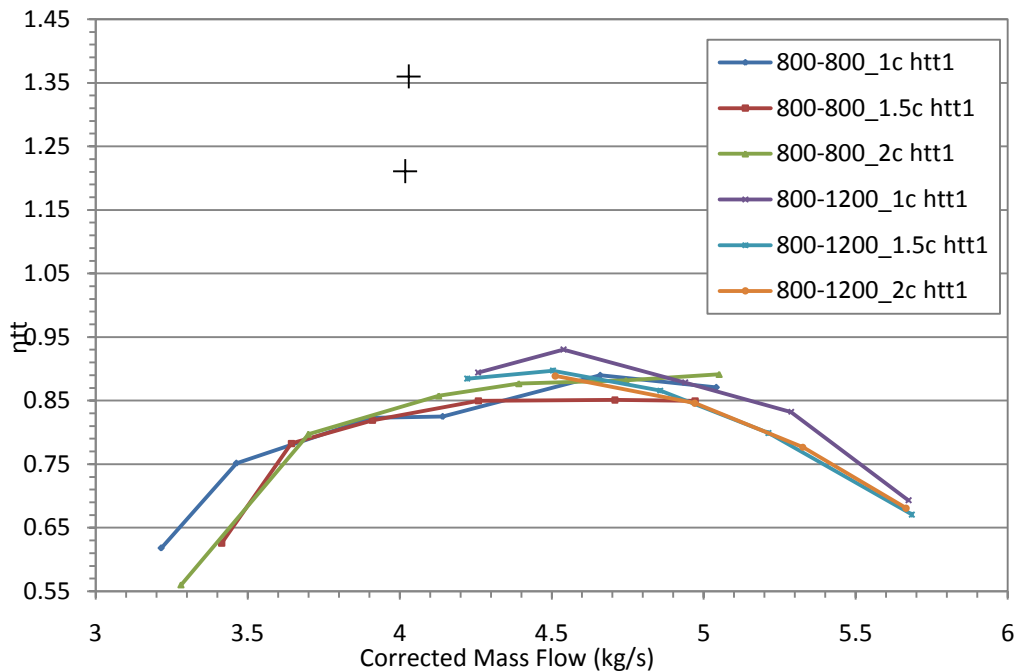
Στις μετρήσεις όπου ο λόγος στροφών είναι $R_u=1$, παρατηρείται η τάση ο βαθμός απόδοσης να λαμβάνει εξ' αρχής υψηλές τιμές οι οποίες εκάστοτε ακολουθούνται από μικρή άνοδο, επίτευξη της μέγιστης τιμής και πτώση. Πάντα όμως το μέγιστο εμφανίζεται στα πρώτα σημεία λειτουργίας και όχι στους υψηλούς λόγους πίεσης.



Σχήμα 4.5.2: Βαθμός απόδοσης στα 1200 RPM (αριστερά) και 1350 RPM (δεξιά)

Στον αντίποδα, για λόγους στροφών $R_u=1.5$ παρατηρείται η τάση για αύξηση του βαθμού απόδοσης αυξανόμενου του λόγου πίεσης. Δεν είναι λίγες δε οι περιπτώσεις όπου στα σημεία μέγιστου λόγου πίεσης ο βαθμός απόδοσης κάνει αλματώδη αύξηση σε τιμές άνω της μονάδας (Σχήμα 4.5.2). Τα σημεία αυτά δεν συνάδουν με την τάση εξέλιξης του βαθμού απόδοσης στην υπόλοιπη χαρακτηριστική και προφανώς δεν αντιπροσωπεύουν σε καμία περίπτωση τις πραγματικές παραμέτρους λειτουργίας της πτερωτής. Ενδεικτικό είναι ότι στα σημεία αυτά παρόμοια αύξηση παρουσιάζει και ο λόγος πίεσης. Οι μετρήσεις αυτές θεωρούνται εσφαλμένες. Για να λάβουμε μια καλύτερη εικόνα της κατάστασης υπολογίσαμε ενδεικτικά κάποιους βαθμούς απόδοσης των προβληματικών αυτών σημείων με τα στοιχεία ισχύος από τον αναλυτή ενέργειας. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν προφανώς ότι ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται σε επίπεδα χαμηλότερα της μονάδας. Η αξιοπιστία ωστόσο των υπολογισμών αυτών υπονομεύεται από τη μη ακριβή γνώση των απωλειών. Για τον καθορισμό του βαθμού απόδοσης μέσω του αναλυτή ενέργειας υπολογίσθηκε η ισχύς που απορροφά το ρευστό βάση της αύξησης ολικής

πίεσης, της πυκνότητας του ρευστού και της παροχής, και συγκρίθηκε με το πλεόνασμα ισχύος που προκύπτει μεταξύ των μετρήσεων του αναλυτή ενέργειας για το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας και της έκφρασης των απωλειών ισχύος για τις δεδομένες στροφές. Μικρή μεταβολή στην έκφραση των απωλειών επιφέρει σημαντική αλλαγή στην τιμή του βαθμού απόδοσης και για το λόγο αυτό οι τιμές που προκύπτουν μέσω της διαδικασίας αυτής μας παρέχουν μόνο το εύρος στο οποίο κυμαίνεται ο βαθμός απόδοσης.



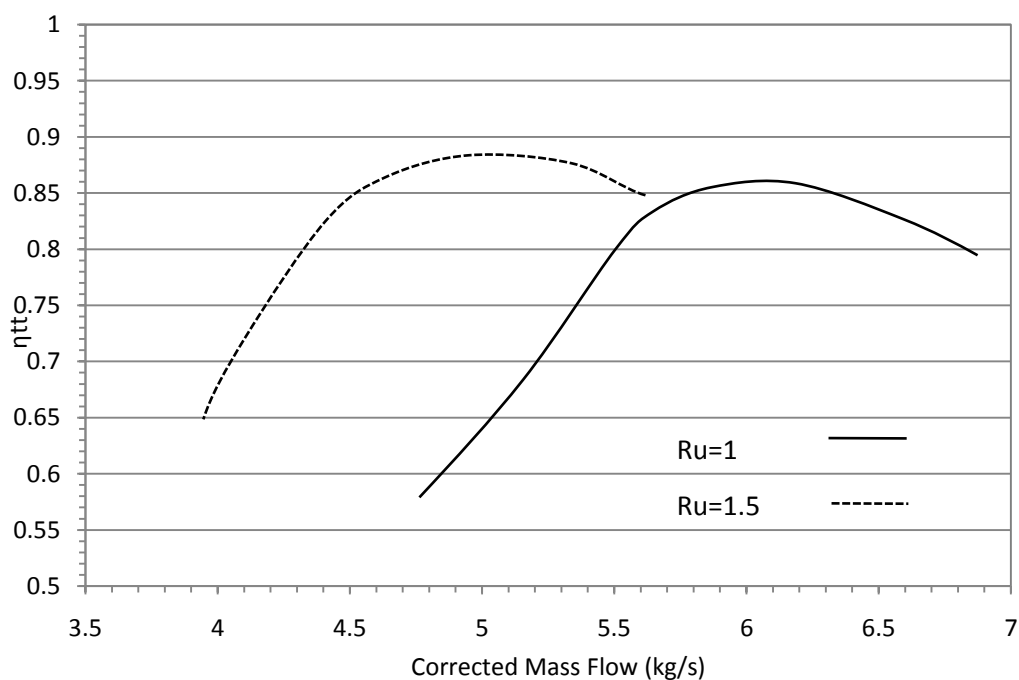
Σχήμα 4.5.2: Πλήρης απεικόνιση μετρήσεων βαθμού απόδοσης πρώτου ρότορα για ταχύτητα περιστροφής 800RPM & παράτυπες μετρήσεις (+).

Το γεγονός ότι οι παρατυπίες αυτές εμφανίζονται αποκλειστικά στα τελευταία σημεία λειτουργίας υποδεικνύει ότι το πρόβλημα προκαλείται από κάποια διαφοροποίηση στη ροή όταν πλησιάζουμε το σημείο αποκόλλησης. Η αιτία πιθανότατα έγκειται στην διαδικασία διεξαγωγής μετρήσεων. Βασική παραδοχή αποτελεί η ομοιόμορφη ροή στον αγωγό. Η γενίκευση των αποτελεσμάτων μιας ακτινικής θέσης για το σύνολο του καναλιού της ροής είναι αναγκαία καθώς η ύπαρξη έντονης ανομοιομορφίας της ροής επιβάλλει φτωχές επιδόσεις σε μεγάλο τμήμα του συμπιεστή. Με γνώμονα την παραδοχή αυτή δεν εκτελούνται σαρώσεις μπροστά από την πρώτη πτερωτή (θέση 1) όπου μελέτη προηγούμενης διπλωματικής κατέδειξε ικανοποιητικά ομοιόμορφη και στρωτή ροή και σε όλο το ύψος του αγωγού. Ωστόσο, εφόσον βρισκόμαστε κοντά στο σημείο αποκόλλησης, υπάρχει το ενδεχόμενο ο πρώτος ρότορας να έχει εισέλθει σε κατάσταση αποκόλλησης στο σημείο του σωλήνα πίεσης της θέσης 1. Σε αυτή την περίπτωση ο σωλήνας πίεσης ενδέχεται να δίνει ενδείξεις μη

αντιπροσωπευτικές της κατάστασης της ροής για το σύνολο του αγωγού. Δεδομένου ότι ο σωλήνας πίεσης κατάντη της πρώτης πτερωτής (θέση 2) έχει μεταφερθεί σε άλλη περιφερειακή θέση από αυτή του σωλήνα της θέσης 1 όπου ενδέχεται η ροή να μην έχει αποκολληθεί ακόμα (βλ Κεφάλαιο 3.4), υπάρχει πιθανότητα το τμήμα του ρότορα στο οποίο βρίσκεται ο σωλήνας πίεσης της θέσης 2 να μην έχει εισέλθει σε κατάσταση αποκόλλησης και ο συνδυασμός των δεδομένων αυτών να παρέχει εσφαλμένες μετρήσεις.

4.5.2 Βαθμός απόδοσης δεύτερου ρότορα

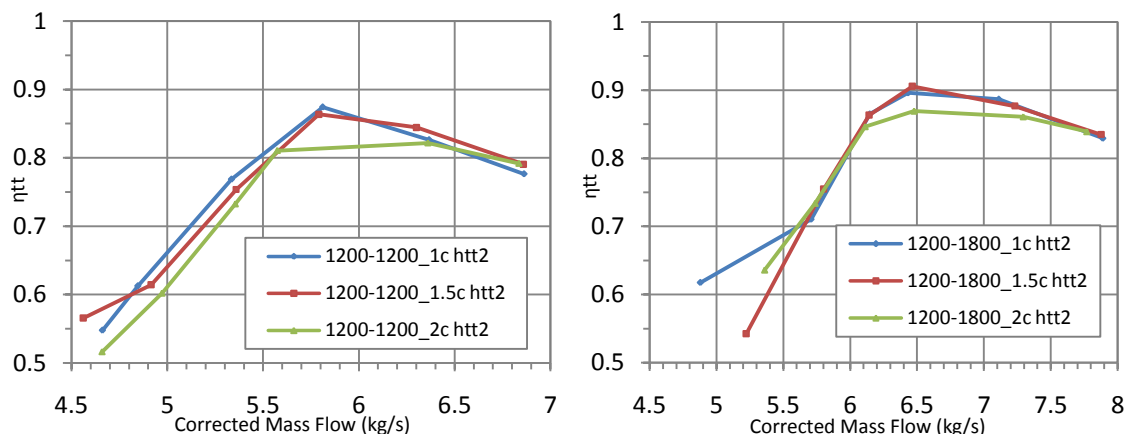
Ως αναφορά στο βαθμό απόδοσης του δεύτερου ρότορα και εδώ η επιρροή του αξονικού διακένου είναι ασήμαντη καθώς οι διαφορές μεταξύ μετρήσεων ίδιων στροφών για διαφορετικές αξονικές αποστάσεις κυμαίνονται στα όρια του σφάλματος. Η επίδραση του λόγου στροφών ωστόσο είναι διαφορετική από αυτή του πρώτου ρότορα. Στην περίπτωση του δεύτερου ρότορα η ελαφρά βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας για λόγο στροφών $R_u=1.5$ αντικατοπτρίζεται και στον βαθμό απόδοσης. Χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής του πρώτου ρότορα επιτρέπουν ελαφρώς μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης, πιθανώς λόγω μειωμένης διαταραχής στη ροή. Στο σχήμα 4.5.3 απεικονίζεται η επίδραση του λόγου στροφών στο βαθμό απόδοσης, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις για διάφορες τιμές αξονικού διακένου.



Σχήμα 4.5.3: Απεικόνιση της μεταβολής του βαθμού απόδοσης του δεύτερου ρότορα

Παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης του δεύτερου ρότορα ξεκινά από σχετικά υψηλές τιμές και συνεχίζει να αυξάνεται μειούμενης της παροχής σε τιμές άνω του 0.85 προσεγγίζοντας το 0.90 κυρίως για λειτουργία με λόγο στροφών $R_u=1.5$. Κατόπιν όμως μειώνεται σταθερά έως αρκετά χαμηλές τιμές καθώς η δεύτερη πτερωτή εισέρχεται σε αποκόλληση πριν την πρώτη.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθεται ενδεικτικά η μεταβολή του βαθμού απόδοσης της δεύτερης πτερωτής συναρτήσει του αξονικού διάκενου.



Σχήμα 4.5.4: Βαθμός απόδοσης στα 1200 & $R_u=1$ (αριστερά) και στα 1800 & $R_u=1.5$ (δεξιά)

4.6 Συμπεράσματα από την παραμετρική μελέτη

Από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν κατέστη σαφές ότι η λειτουργία μίας βαθμίδας αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών διέπεται από πολύπλοκα φαινόμενα ρευστομηχανικής που την καθιστούν ιδιαίτερα ευαίσθητη σε ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Η σωστή επιλογή και συνδυασμός των παραμέτρων αυτών είναι άκρως σημαντική για την αποδοτική λειτουργία της βαθμίδας.

Κατόπιν πλήθους μετρήσεων είναι εμφανές ότι στις χαμηλές στροφές, για τη συγκεκριμένη παραμετρική μελέτη, η εγκατάσταση δεν παρουσιάζει μεταβολές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας. Το ακτινικό διάκενο δεν φαίνεται να έχει κάποια επίδραση στις χαρακτηριστικές καμπύλες. Αντιθέτως ο λόγος στροφών επηρεάζει κυρίως τα χαρακτηριστικά της παροχής ωστόσο δεν φαίνεται να βελτιώνει έντονα την λειτουργία της βαθμίδας με κάποιον άλλο τρόπο.

Το ενδιαφέρον έγκειται στις μετρήσεις υψηλών στροφών. Εκεί παρατηρήθηκαν ενδιαφέρουσες αλλαγές σε ποιοτικά χαρακτηριστικά λειτουργίας. Συγκεκριμένα στις μετρήσεις 1500-1500 RPM παρουσιάστηκε

αύξηση του λόγου πίεσης του πρώτου ρότορα και μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης σε μεγαλύτερους συντελεστές φόρτισης για αξονική απόσταση 1.5 χορδής και στις μετρήσεις 1000-1500 RPM παρουσιάστηκε αύξηση του λόγου πίεσης του δεύτερου ρότορα και μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης σε μεγαλύτερους συντελεστές φόρτισης.

Η μελέτη των δεδομένων της ροής έδειξε ότι και στις δύο περιπτώσεις οι γωνίες παρέκκλισης ήταν σαφώς μικρότερες από τις αντίστοιχες γωνίες των μετρήσεων για άλλες τιμές αξονικού διακένου. Αυτό σημαίνει ότι η ροή ακολουθεί πιο πιστά τη γεωμετρία του πτερυγίου. Άρα στις μετρήσεις αυτές υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες που επιτρέπουν στο πτερύγιο να λειτουργήσει πιο αποδοτικά.

Στην περίπτωση της πρώτης πτερωτής οι μειωμένες τιμές παρέκκλισης πιθανότατα οφείλονται σε απορρόφηση του ομόρρου από τον δεύτερο κάτι που αποτρέπει την ανάπτυξη της αποκόλλησης. Αυτό επιτρέπει την πιο αποδοτική λειτουργία του πτερυγίου που αποδίδει μεγαλύτερο λόγο πίεσης και οδηγείται σε μεγαλύτερες φορτίσεις.

Στην περίπτωση της δεύτερης πτερωτής η μικρές τιμές της γωνίας παρέκκλισης και εδώ καταδεικνύουν καλύτερη ροή του αέρα πάνω στο πτερύγιο κάτι το οποίο πιθανώς οφείλεται στη γωνία πρόσπτωσης που «βλέπει» το πτερύγιο στην έξοδο του πρώτου ρότορα. Οι γωνίες πρόσπτωσης ωστόσο καταδεικνύουν μεγάλη διαταραχή της ροής στην είσοδο της δεύτερης πτερωτής με αποτέλεσμα τη φτωχή απόδοσή της. Χαρακτηριστικό είναι ότι μεγάλο τμήμα των πτερυγίων της δεύτερης πτερωτής λειτουργεί σε συνθήκες αποκόλλησης.

Από τη μελέτη των καμπύλων Φ-Ψ τόσο της πρώτης όσο και της δεύτερης πτερωτής παρατηρήθηκε μια ελαφρά διεύρυνση του εύρους λειτουργίας της, μειούμενου του αξονικού διακένου. Δυστυχώς ο αριθμός των σημείων λειτουργίας που καταρτίζουν την χαρακτηριστική καμπύλη δεν είναι ικανός να παρέχει σαφή δεδομένα για την τιμή του συντελεστή παροχής στο σημείο αποκόλλησης (Φstall). Ο ακριβής καθορισμός του Φstall θα καταδείκνυε την αναστολή της αποκόλλησης για μικρό αξονικό διάκενο

Ακόμα και στις υψηλές στροφές ωστόσο είναι εμφανές ότι απέχουμε πολύ από το σημείο σχεδίασης του πτερυγίου. Η φτωχή απόδοσή του είναι λοιπόν αναμενόμενη και δικαιολογεί τη μικρή ευαισθησία των ποιοτικών χαρακτηριστικών στις παραμέτρους της μελέτης.

Ως αναφορά το βαθμό απόδοσης δεν καταστεί δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση το αξονικού διακένου σε αυτόν. Είμαστε σε θέση να αναγνωρίσουμε συγκεκριμένες τάσεις στην συμπεριφορά του βαθμού απόδοσης ωστόσο άμεσες συγκρίσεις μεταξύ μετρήσεων θα ήταν επισφαλής. Για τα προβληματικά σημεία καταφύγαμε σε άλλες μεθόδους υπολογισμού του βαθμού απόδοσης που κατέδειξαν το εύρος στο οποίο κινείται. Η αιτία της προβληματικής αυτής συμπεριφοράς έγκειται πιθανώς σε περιφερειακή

ανομοιομορφία της ροής όταν πλησιάζουμε την κατάσταση αποκόλλησης ή και σε μεγέθη της ροής που επιβάλλονται στον πρώτο ρότορα από το δεύτερο και η μετρητική αλυσίδα αποδίδει σε αυξημένη απόδοση του πρώτου. Υπενθυμίζουμε ότι πρόκειται για πειραματικές μετρήσεις σε πολύπλοκο πεδίο ροής και πάντα υπεισέρχονται παραδοχές οι οποίες μπορεί να αλλοιώσουν ορισμένα αποτελέσματα.

Εν τέλει, ορισμένα αποτελέσματα συμβαδίζουν με τις βιβλιογραφικές αναφορές των Sharma et al. ή των Roy et al. ειδικά η διεύρυνση της περιοχής λειτουργίας της πρώτης για λόγο στροφών $R_{ii}=1.5$. Η παρουσία συγκεχυμένων αποτελεσμάτων για την δεύτερη πτερωτή δεν οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα, γεγονός που παρατηρήθηκε σε πλήθος ερευνητικών μελετών επί του φαινομένου.

Γνωρίζοντας την πολυπλοκότητα του φαινομένου και τις ιδιαιτερότητες της εγκατάστασης (έντονη αποκόλληση στον δεύτερο ρότορα, μικρή ή καθόλου συστροφή των πτερυγίων) κρίνουμε ότι τα αποτελέσματα συνάδουν με τις τάσεις που ορίζει η βιβλιογραφία επιφυλασσόμενοι της απευθείας συγκρίσεως μεγεθών τόσο λόγω απουσίας των εν λόγω μεγεθών από την βιβλιογραφία όσο και λόγω κατασκευαστικών και λειτουργικών διαφορών των εγκαταστάσεων άλλων πειραματικών μελετών.

5

Σύγκριση αποτελεσμάτων με κώδικα BLADE

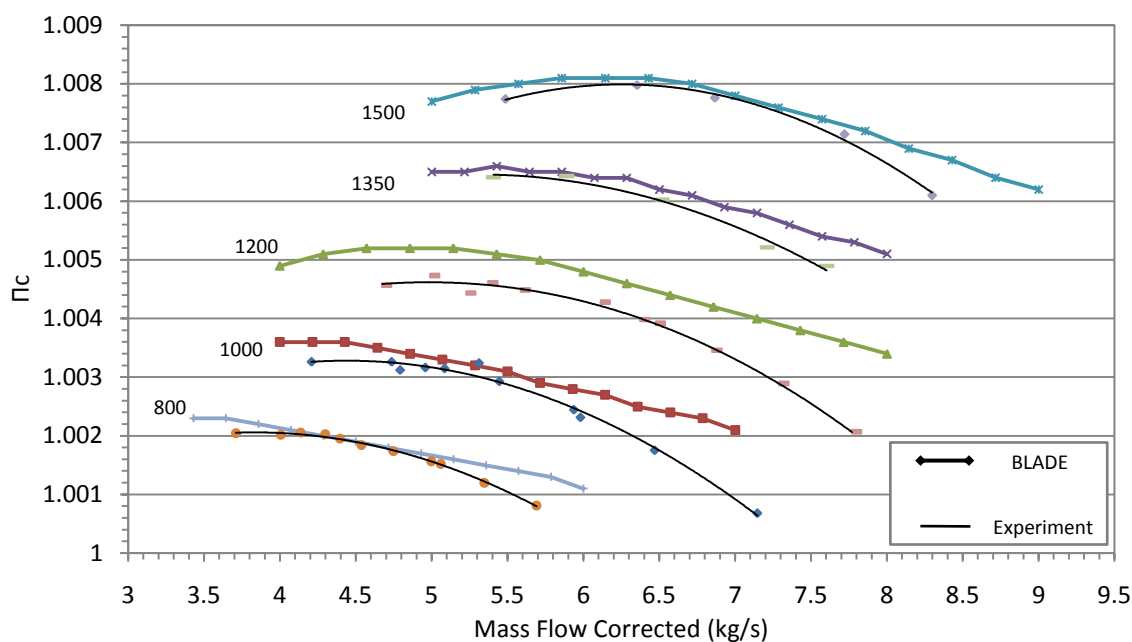
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης με τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από την εκτέλεση του κώδικα BLADE. Σκοπός είναι η διερεύνηση της αξιοπιστίας του κώδικα και η ικανότητα παροχής ρεαλιστικών δεδομένων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο για μια αρχική εκτίμηση της συμπεριφοράς της βαθμίδας όσο και για την μοντελοποίηση της βαθμίδας στα πλαίσια μιας πιο σύνθετης διάταξης.

Ο κώδικας BLADE ανεπτύχθη στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Γ. Κατσίκη ^[2] και αποτελεί μια μεθοδολογία μονοδιάστατης ανάλυσης της ροής όπως αυτή αναπτύσσεται μέσω των δύο πτερωτών. Στόχος της ανάπτυξης του εν λόγω κώδικα ήταν η εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων και δεδομένων για την αρχική διαστασιολόγηση της διάταξης. Για την ανάλυση της ροής ο κώδικας χρησιμοποιεί τις εμπειρικές σχέσεις Naca και θεωρείται ότι η συμπεριφορά της πρώτης πτερωτής δεν επηρεάζεται από την παρουσία της δεύτερης.

5.1 Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και αποτελεσμάτων κώδικα

Στη σύγκριση που ακολουθεί, οι πειραματικές μετρήσεις αφορούν λειτουργία της διάταξης με αξονικό διάκενο πτερωτών ίσο με δύο χορδές ενώ τα αποτελέσματα του κώδικα προέκυψαν κατόπιν εκτέλεσής του για εύρος παροχής ίσο με αυτό των αντίστοιχων πειραματικών δεδομένων. Καταφύγαμε στην μέθοδο αυτή καθώς είναι γνωστό από συγκρίσεις που έγιναν στα πλαίσια προηγούμενων διπλωματικών, ότι ο κώδικας τείνει να υπερεκτιμά τόσο την ικανότητα αύξησης πίεσης της βαθμίδας όσο και το εύρος λειτουργίας. Σε όλες τις μετρήσεις έχουμε ορίσει τα οριακά σημεία παροχής με συνθήκες αναφοράς ολική πίεση $P_{t1}=101325 \text{ Pa}$ και θερμοκρασία $T_{t1}=288.15 \text{ K}$ και αξονική ροή ($\alpha_1=0^\circ$).

Ως αναφορά στον **πρώτο ρότορα**, ήδη γνωρίζουμε ότι η μεταβολή των στροφών της δεύτερης πτερωτής μετατοπίζει τη λειτουργία της πρώτης πτερωτής στο αντίστοιχο εύρος παροχής πάνω στην ίδια χαρακτηριστική καμπύλη. Δεδομένης της προαναφερθείσας συμπεριφοράς ομαδοποιήσαμε τα πειραματικά δεδομένα του πρώτου ρότορα για λόγο στροφών $R_u=1$ & $R_u=1.5$ ώστε να παρουσιάζεται μια πλήρης χαρακτηριστική κατά την σύγκριση με τα αποτελέσματα του κώδικα.

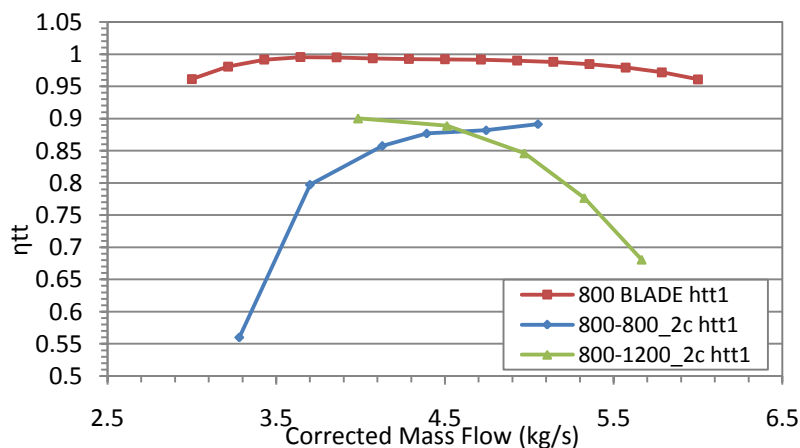


Σχήμα 5.1: Σύγκριση καμπύλων λόγου πίεσης κώδικα BLADE και πειραματικών μετρήσεων (καμπύλες προσέγγισης) πρώτου ρότορα

Στο Σχήμα 5.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα του κώδικα BLADE και οι προσεγγιστικές χαρακτηριστικές καμπύλες των πειραματικών μετρήσεων. Παρατηρούμε εμφανώς την τάση υπερεκτίμησης της ικανότητας αύξησης πίεσης της βαθμίδας καθώς και την διευρυμένη περιοχή λειτουργίας, χαρακτηριστικά που ο κώδικας έχει παρουσιάσει και σε προγενέστερες συγκρίσεις. Τα αποτελέσματα του κώδικα για τον πρώτο ρότορα κρίνονται ικανοποιητικά δεδομένου ότι γνωρίζουμε το εύρος λειτουργίας της βαθμίδας για την εκάστοτε ταχύτητα περιστροφής. Στις χαμηλές στροφές (800&1000 RPM) ο κώδικας συχνά παρουσιάζει διευρυμένη περιοχή λειτουργίας σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις ενώ στις υψηλές στροφές αναπαριστά αρκετά πιστά τη μορφή τις χαρακτηριστικής και ιδιαίτερα την περιοχή εμφάνισης μέγιστου λόγου πίεσης. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στην περιοχή μεγάλης παροχής σε όλες τις μετρήσεις, γεγονός ελάσσονος σημασίας καθώς η περιοχή αυτή δεν παρουσιάζει κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην παρούσα μελέτη.

Στο Σχήμα 5.2 παρατίθενται οι καμπύλες του βαθμού απόδοσης των πειραματικών μετρήσεων της πρώτης πτερωτής και τα αντίστοιχα μεγέθη του

κώδικα BLADE. Παρατηρούμε ότι ως αναφορά στον βαθμό απόδοσης παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων. Η μονοδιάστατη ανάλυση που χρησιμοποιεί ο κώδικας δεν δύναται να προσεγγίσει τις πραγματικές συνθήκες της τρισδιάστατης ροής. Δεδομένης της μη ορθής λειτουργίας της πρώτης περωτής όπως αυτή έχει διαπιστωθεί από τα πειραματικά δεδομένα, η υπερεκτίμηση του βαθμού απόδοσης από τον κώδικα είναι αναμενόμενη.



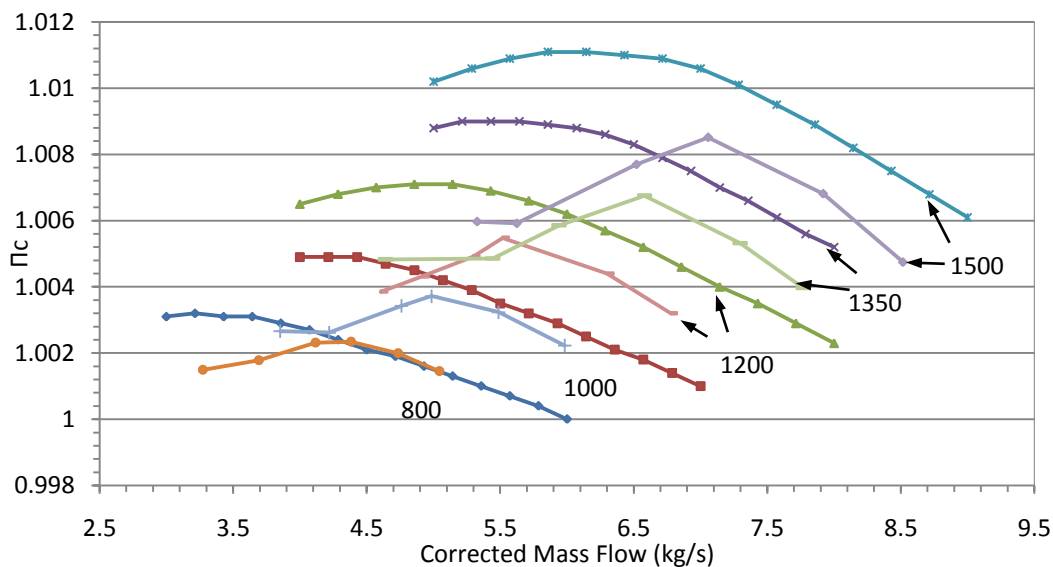
Σχήμα 5.2: Σύγκριση καμπύλων βαθμού απόδοσης κώδικα BLADE και πειραματικών μετρήσεων πρώτου ρότορα

Εν γένει, για τον πρώτο ρότορα, ο κώδικας BLADE κρίνεται ως ένα αξιόλογο εργαλείο για τους σκοπούς για τους οποίους δημιουργήθηκε και παρέχει μια ικανοποιητική προσέγγιση των χαρακτηριστικών λειτουργίας δεδομένου ότι γνωρίζουμε το εύρος παροχής στο οποίο λειτουργεί η διάταξη.

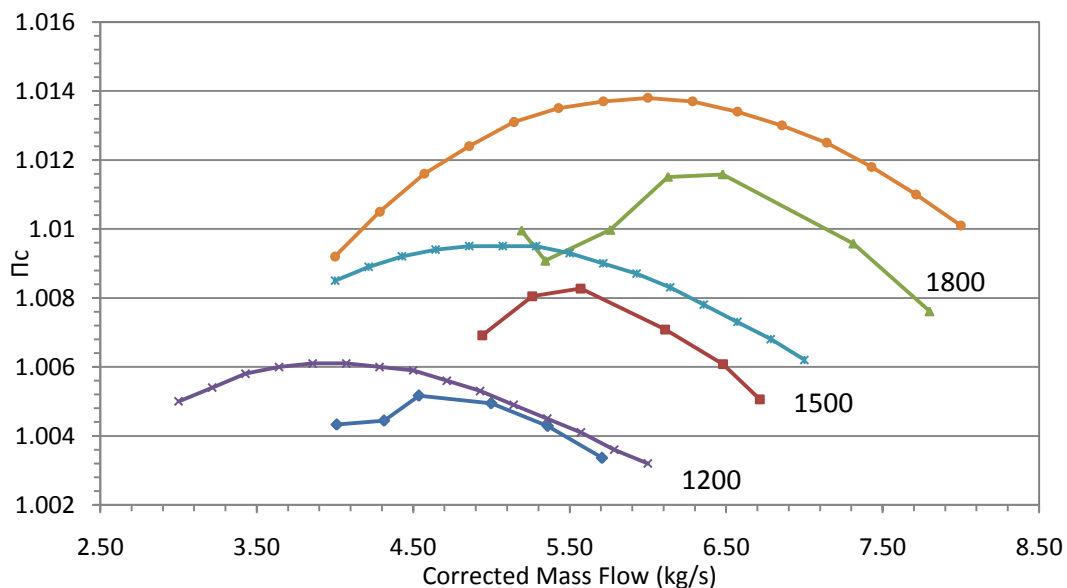
Ως αναφορά στον **δεύτερο ρότορα**, αν και παρατηρούνται κοινές τάσεις συμπεριφοράς, κρίνεται σκόπιμο να απεικονιστούν τα αποτελέσματα βάσει λόγου στροφών, καθώς η χαρακτηριστική της δεύτερης περωτής αλλάζει συναρτήσει των της ταχύτητας περιστροφής της πρώτης.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες λόγου πίεσης για λόγο στροφών $R_u=1$ και στο Σχήμα 5.4 οι αντίστοιχες καμπύλες για λόγο στροφών $R_u=1.5$. Στα υπολογιστικά δεδομένα παρατηρείται εμφανής υπερεκτίμηση του εύρους λειτουργίας της δεύτερης περωτής ανεξαρτήτως λόγου στροφών. Γνωρίζουμε από τις πειραματικές μετρήσεις ότι η δεύτερη περωτή εισέρχεται σε κατάσταση αποκολλημένης λειτουργίας πριν την πρώτη. Επιπλέον παρατηρείται απόκλιση στα μεγέθη του λόγου πίεσης η οποία αυξάνει βαίνοντας σε μεγαλύτερες ταχύτητας περιστροφής. Η απόκλιση του λόγου πίεσης είναι αναμενόμενη καθώς τα πειραματικά δεδομένα καταδεικνύουν αποκόλληση της ροής στη δεύτερη περωτή σε έκταση έως το 1/3 του συνολικού ύψους του

περυγίου. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα φαινόμενα αυτά δεν δύναται να προσεγγιστούν με μονοδιάστατο μοντέλο ροής. Η αύξηση της απόκλισης του λόγου πίεσης συναρτήσει των στροφών πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι αυξανόμενων των ταχυτήτων εντείνεται η διαταραχή της ροής.

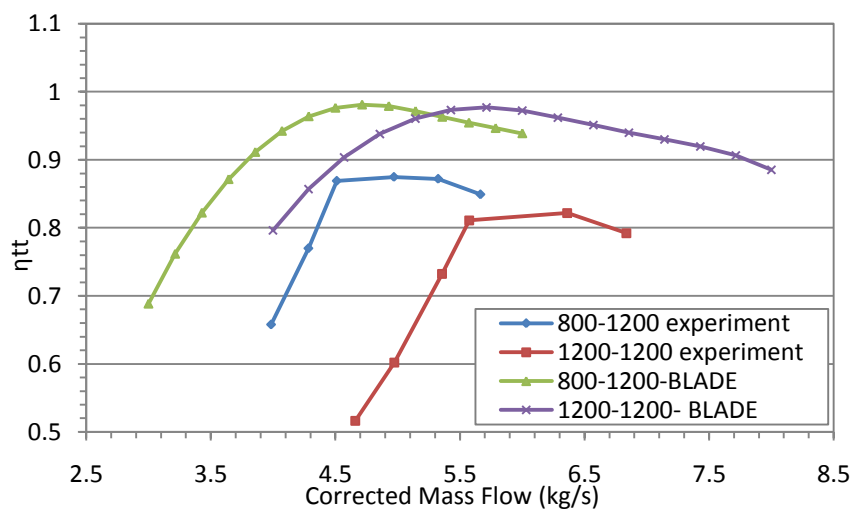


Σχήμα 5.3: Σύγκριση καμπύλων λόγου πίεσης κώδικα BLADE (15 σημεία) και πειραματικών μετρήσεων (6 σημεία) δευτέρου ρότορα για λόγο στροφών $R_{ti}=1$



Σχήμα 5.4: Σύγκριση καμπύλων λόγου πίεσης κώδικα BLADE (15 σημεία) και πειραματικών μετρήσεων (6 σημεία) δευτέρου ρότορα για λόγο στροφών $R_{ti}=1.5$

Ως αναφορά στον βαθμό απόδοσης του δεύτερου ρότορα, και εδώ παρατηρείται αντίστοιχη απόκλιση με αυτή που παρατηρήθηκε στον πρώτο ρότρα. Η μεγάλη απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών μεγεθών και εδώ έγκειται στο μοντέλο μονοδιάστατης ανάλυσης του κώδικα. Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται ότι ο κώδικας ποιοτικά ακολουθεί τη μορφή των πειραματικών αποτελεσμάτων υπερεκτιμώντας όμως τόσο το μέγεθος του βαθμού απόδοσης όσο και το εύρος λειτουργίας. Η ικανότητα του κώδικα να προσεγγίσει τις



πειραματικές τιμές δεν φαίνεται να αλλάζει με τον λόγο στροφών.

Σχήμα 5.5: Σύγκριση καμπύλων βαθμού απόδοσης κώδικα BLADE και πειραματικών μετρήσεων δεύτερου ρότορα για λόγο στροφών $R_{ii}=1&1.5$

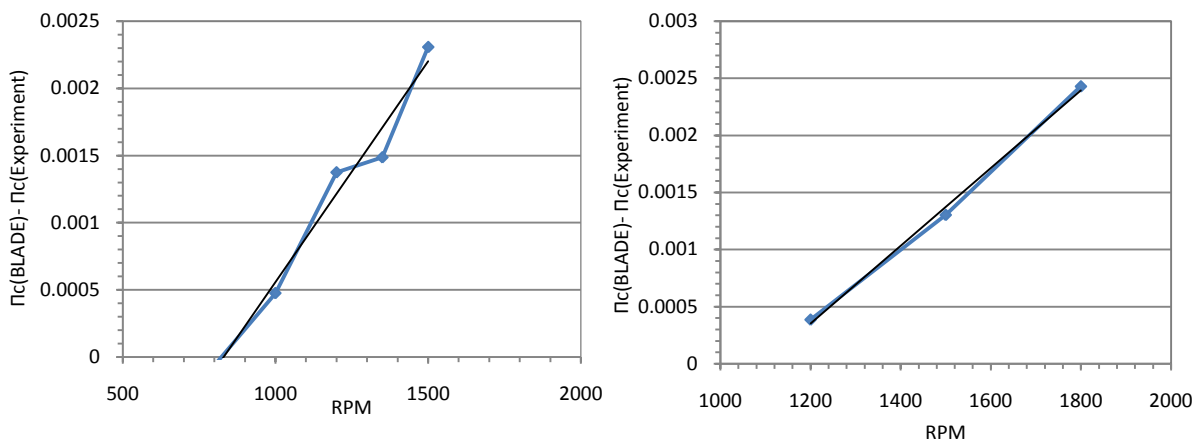
Κατόπιν της σύγκρισης των πειραματικών δεδομένων και των υπολογιστικών μεγεθών του κώδικα BLADE για τον δεύτερο ρότορα, κατέστη σαφές ότι η προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων δεν είναι ικανοποιητική. Το γεγονός αυτό δεν οφείλεται σε λάθος στο μοντέλο προσέγγισης της ροής του κώδικα αλλά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ροής της πειραματικής εγκατάστασης. Είναι εμφανές ότι οι διαταραχές της ροής που προσπαθήσαμε να αντιμετωπίσουμε στο πρώτο σκέλος της παρούσας εργασίας περιορίζουν την αποδοτικότητα της διάταξης.

5.2 Διόρθωση αποτελεσμάτων κώδικα

Από τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα του κώδικα παρατηρούμε ότι για τη μεν πρώτη πτερωτή τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, για τη δε δεύτερη η αυξανόμενη υπερεκτίμηση του λόγου πίεσης δεν παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Γνωρίζοντας τις ιδιαιτερότητες της ροής στη συγκεκριμένη διάταξη, δεν προτείνεται κάποια αναθεώρηση στο μοντέλο του κώδικα αλλά θα καταρτιστεί ένα σύνολο διορθωτικών εξισώσεων το οποίο

θα προσαρμόζει τα αποτελέσματα του λόγου πίεσης της δεύτερης πτερωτής του κώδικα στα πειραματικά δεδομένα. Δεν θα επιχειρηθεί κάτι αντίστοιχο για το βαθμό απόδοσης καθώς στο μέγεθος αυτό δεν παρουσιάζεται μόνο μεγάλη απόκλιση τιμών αλλά και αδυναμία ποιοτικής προσέγγισης της καμπύλης βαθμού απόδοσης από τον κώδικα. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η όσο το δυνατόν ρεαλιστική εκτίμηση των παραμέτρων λειτουργίας της πειραματικής διάταξης από τον υπάρχοντα κώδικα. Έμφαση πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι διορθωτικές αυτές εξισώσεις αφορούν αποκλειστικά την παρούσα διάταξη.

Κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθεί διαφορετική εξίσωση για τον κάθε λόγο στροφών για καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων. Για να καταρτιστεί η εξίσωση προσαρμογής υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της απόκλισης των μεγεθών του λόγου πίεσης των σημείων μη αποκολλημένης λειτουργίας της χαρακτηριστικής. Από τις μέσες τιμές καταρτίστηκε μια εξίσωση παρεμβολής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής.



Σχήμα 5.6: Καμπύλες απόκλισης δεδομένων λόγου πίεσης δεύτερης πτερωτής για λόγο στροφών $R_u=1$ (αριστερά) και $R_u=1.5$ (δεξιά)

Οι σχέσεις που δίνουν την απόκλιση του λόγου πίεσης μεταξύ κώδικα και πειραματικών δεδομένων για λόγο στροφών $R_u=1$ & $R_u=1.5$ είναι οι σχέσεις 5.1 & 5.2 αντίστοιχα:

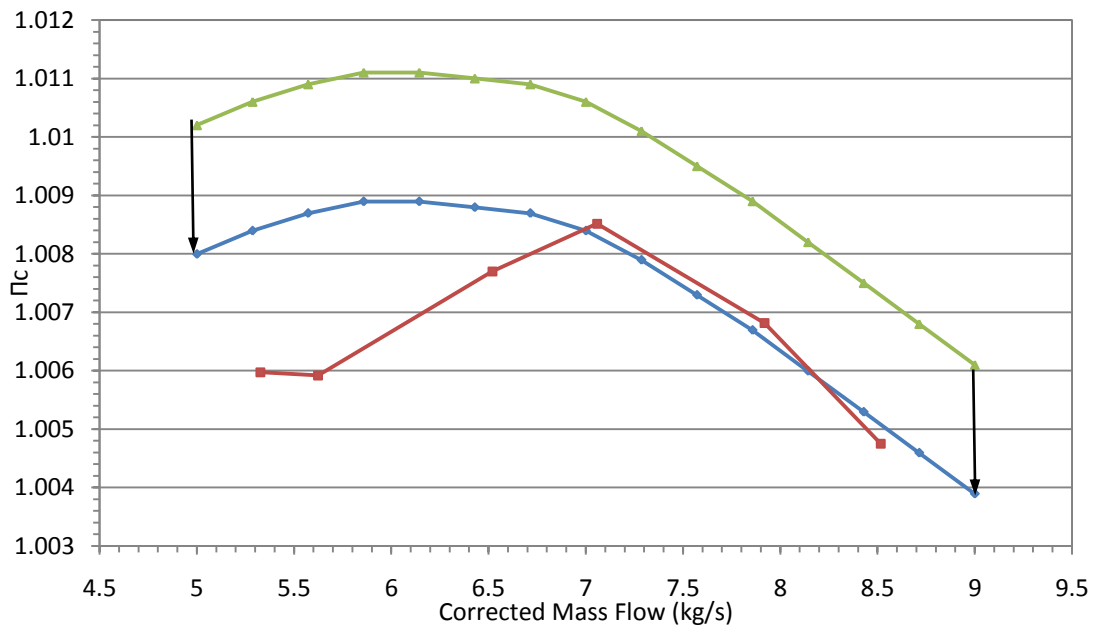
$$\Delta \Pi_c^{R_u=1} = 3.29 \times 10^{-6} \times N_2 - 2.73 \times 10^{-3} \quad (\text{Σχέση 5.1})$$

$$\Delta \Pi_c^{R_u=1.5} = 3 \times 10^{-6} \times N_2 - 3 \times 10^{-3} \quad (\text{Σχέση 5.2})$$

όπου

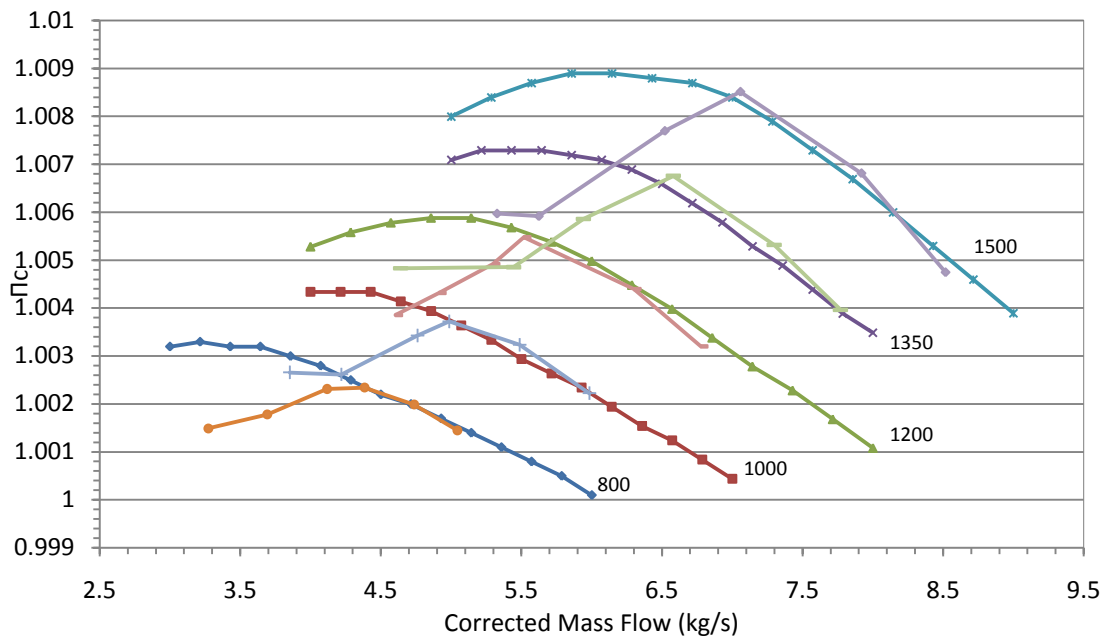
$$\Delta \Pi_c = \Pi_c^{BLADE} - \Pi_c^{experiment}$$

Κατόπιν της αναθεώρησης των δεδομένων μέσω των προσεγγιστικών καμπύλων παρατηρείται ικανοποιητική αναπαράσταση των πειραματικών δεδομένων. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η μετατόπιση της καμπύλης λόγου πίεσης του δεύτερου ρότορα για 1500 RPM και λόγο στροφών $R_u=1$

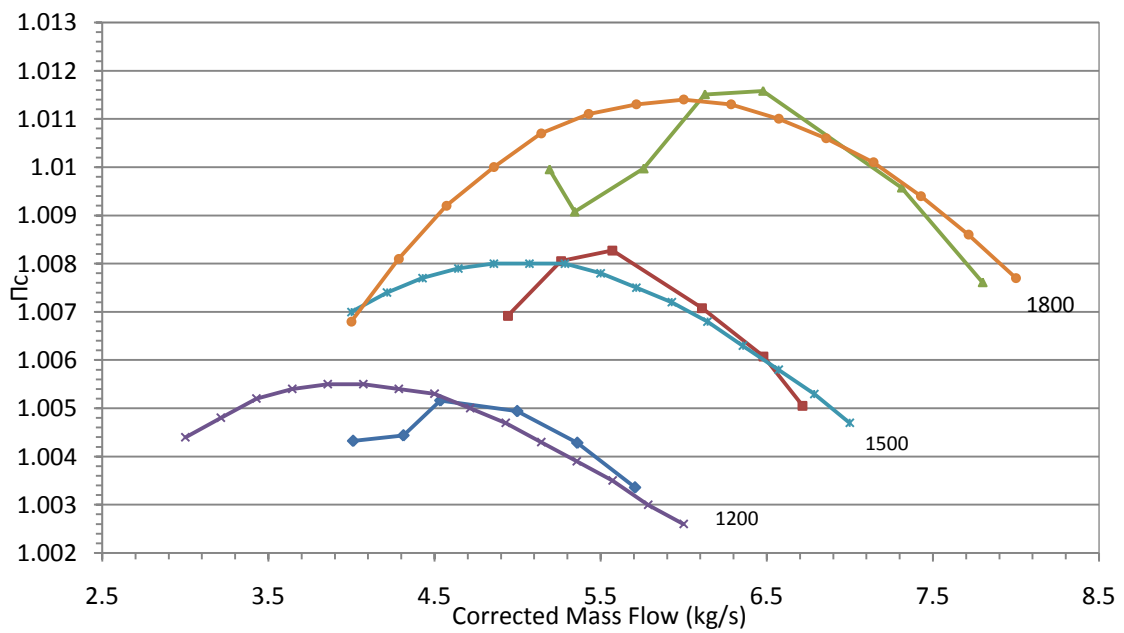


Σχήμα 5.7: Προσαρμογή των αποτελεσμάτων του κώδικα στα πειραματικά. Μετατόπιση καμπύλης 1500 RPM για λόγο στροφών $R_u=1$

Αντίστοιχη αναπροσαρμογή όλων των καμπύλων λόγου πίεσης του δεύτερου ρότορα επιτρέπει πιο πιστή αναπαράσταση του πειραματικού χάρτη όπως φαίνεται στα σχήματα 5.8 & 5.9 για λόγους στροφών $R_u=1$ και $R_u=1.5$ αντίστοιχα. Η βελτίωση που σημειώνεται στην αναπαράσταση του πειραματικού χάρτη είναι εμφανής αν συγκρίνουμε τα σχήματα 5.8 & 5.9 με τις αντίστοιχες αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων του κώδικα χωρίς διόρθωση (Σχήματα 5.3 & 5.4)



Σχήμα 5.8: Προσαρμογή δεδομένων λόγου πίεσης δεύτερου ρότορα για λόγο στροφών $R_{ti}=1$

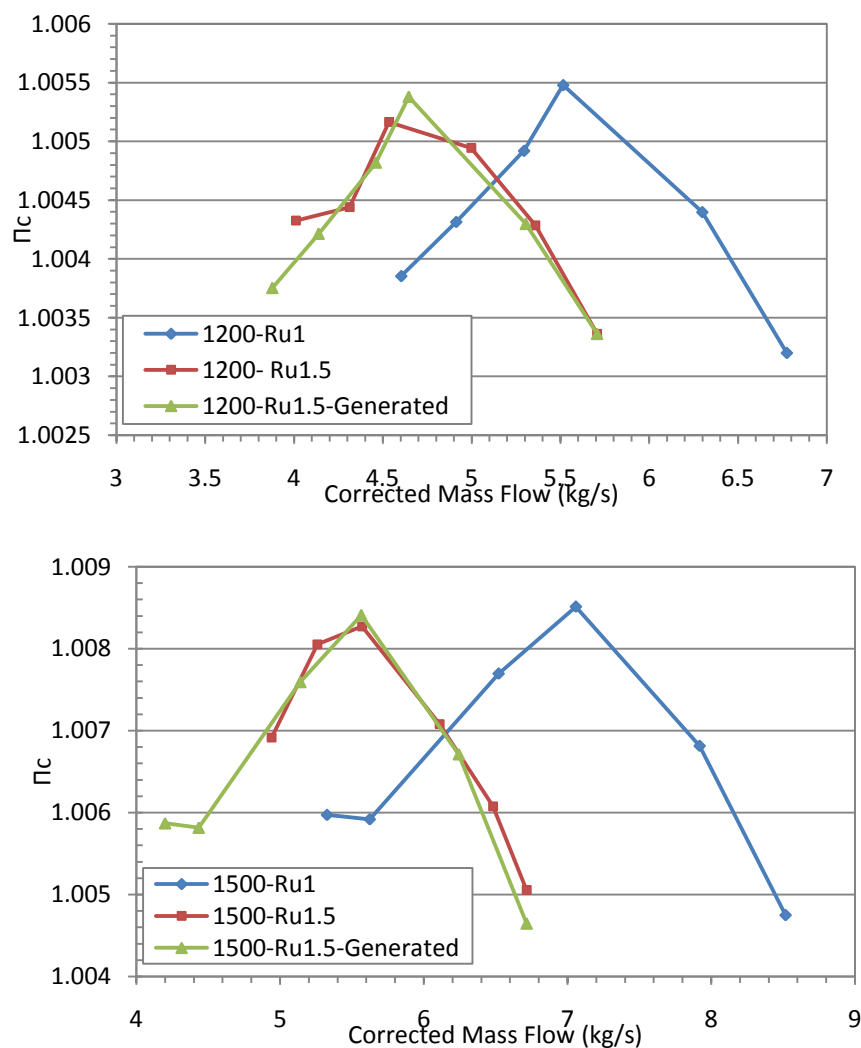


Σχήμα 5.9: Προσαρμογή δεδομένων λόγου πίεσης δεύτερου ρότορα για λόγο στροφών $R_{ti}=1.5$

5.3 Παραγωγή χάρτη δεύτερης πτερωτής με χρήση του κώδικα BLADE

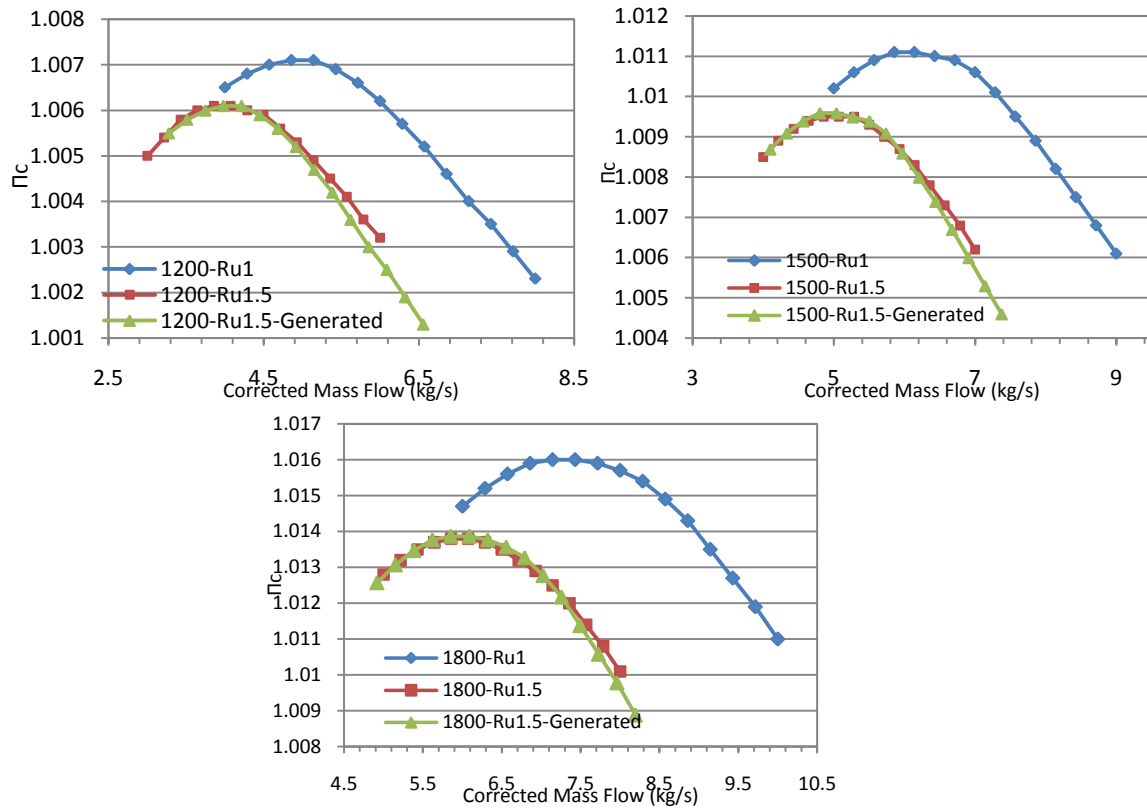
Κατόπιν της ικανοποιητικής προσαρμογής των δεδομένων του κώδικα BLADE στα πειραματικά, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η δυνατότητα παραγωγής χαρτών της δεύτερης πτερωτής για διαφόρους λόγους στροφών αποκλειστικά με τη χρήση του κώδικα. Αρχικά θα υπολογίσουμε τις σχέσεις που εκφράζουν τη μετατόπιση των χαρακτηριστικών μεγεθών (λόγος πίεσης & παροχή) συναρτήσει του λόγου στροφών τόσο για τα πειραματικά όσο και για τα υπολογιστικά δεδομένα. Κατόπιν θα συγκριθούν οι τάσεις μεταβολής των μεγεθών μεταξύ πειράματος και κώδικα και θα αξιολογηθεί η ικανότητα παραγωγής νέου χάρτη αποκλειστικά με τη χρήση του κώδικα.

Ως αναφορά στα πειραματικά δεδομένα, η προσαρμογή των δεδομένων της καμπύλης του λόγου στροφών $R_u=1.5$ με βάση τα δεδομένα του λόγου στροφών $R_u=1$, για 1200 & 1500 RPM φαίνεται στο σχήμα 5.8



Σχήμα 5.8: Προσέγγιση της καμπύλης $R_u=1.5$ με τα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης $R_u=1$ στις 1200 (επάνω) & 1500 RPM (κάτω)

Αντίστοιχη προσέγγιση έγινε και στα δεδομένα του κώδικα BLADE στις 1200 1500 και 1800 RPM όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9: Προσέγγιση της καμπύλης $R_u=1.5$ με τα υπολογιστικά δεδομένα της καμπύλης $R_u=1$ στις 1200(επάνω αριστερά) 1500(επάνω δεξιά) & 1800 RPM (κάτω)

Από τις παραπάνω προσεγγίσεις προέκυψαν οι συντελεστές παροχής (k_m) και λόγου πίεσης (k_p) των σχέσεων προσαρμογής 5.1 & 5.2 όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1

$$\Pi_c^G = k_p \times \Pi_c^{Ru=1} \quad (\text{Σχέση 5.1})$$

$$\dot{m}_G = k_m \times \dot{m}_{Ru=1} \quad (\text{Σχέση 5.2})$$

όπου:

Π_c^G : λόγος πίεσης στον ζητούμενο λόγο στροφών

k_p : συντελεστής διόρθωσης λόγου πίεσης

$\Pi_c^{Ru=1}$: λόγος πίεσης για λόγο στροφών $R_u=1$

\dot{m}_G : παροχή μάζας στον ζητούμενο λόγο στροφών

k_m : συντελεστής διόρθωσης παροχής μάζας

$\dot{m}_{Ru=1}$: παροχή μάζας για λόγο στροφών $R_u=1$

RPM	Experiment		BLADE	
	k_m	k_p	k_m	k_p
1200	0.842268	0.9999	0.819672	0.999007
1500	0.788509	0.9999	0.819672	0.998418
1800	-	-	0.819672	0.997904
Average	0.815388	0.9999	0.819672	0.998443

Πίνακας 5.1: Συντελεστές προσαρμογής παροχής (k_m) και λόγου πίεσης (k_p) για προσέγγιση της καμπύλης λόγου στροφών $R_u=1.5$ βάσει της καμπύλης λόγου στροφών $R_u=1$

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των συντελεστών προσαρμογής είναι παραπλήσιες, αν και για τους λόγους πίεσης που επιτυγχάνονται από την παρούσα διάταξη μεταβολή στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο του συντελεστή προσαρμογής λόγου πίεσης (k_p) είναι ικανή να μετατοπίσει αισθητά την χαρακτηριστική καμπύλη. Αντιθέτως η ευαισθησία του συντελεστή παροχής (k_m) είναι σαφώς μικρότερη από αυτή του συντελεστή λόγου πίεσης.

Αν εντυπήσουμε στην τάση μεταβολής του κάθε συντελεστή, παρατηρούμε ότι ως αναφορά στα πειραματικά δεδομένα, ο **συντελεστής προσαρμογής λόγου πίεσης (k_p)** κυμαίνεται πολύ κοντά στη μονάδα ενώ η τιμή του συντελεστή για τα αποτελέσματα του κώδικα κυμαίνεται σε ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα. Τα πειραματικά δεδομένα, σε αντίθεση με τον κώδικα, δεν υποδεικνύουν κάποια μεταβολή στην ικανότητα αύξησης πίεσης του δεύτερου ρότορα συναρτήσει του λόγου στροφών. Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται τόσο στο περύγιο όσο και στον κώδικα. Αφενός το περύγιο του δεύτερου ρότορα λειτουργεί μακριά από το σημείο σχεδίασης όπου πιθανώς μια μικρή μεταβολή της παροχής δεν επηρεάζει τη λειτουργία του περυγίου, αφετέρου το μοντέλο μονοδιάστατης ανάλυσης που εφαρμόζει ο κώδικας πιθανώς μεταφράζει την αύξηση της παροχής του πρώτου ρότορα ως αλλαγή του σημείου λειτουργίας στην δεύτερης πτερωτής υπερεκτιμώντας την ικανότητα αύξησης πίεσης.

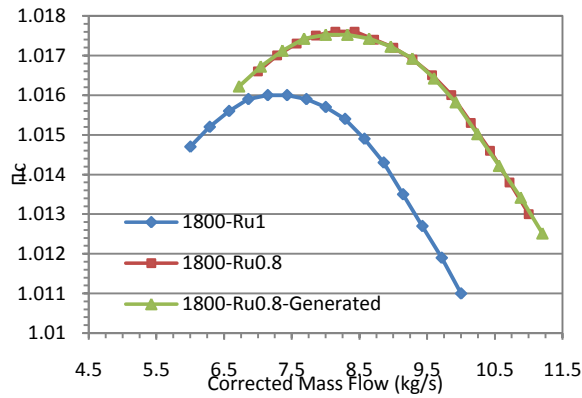
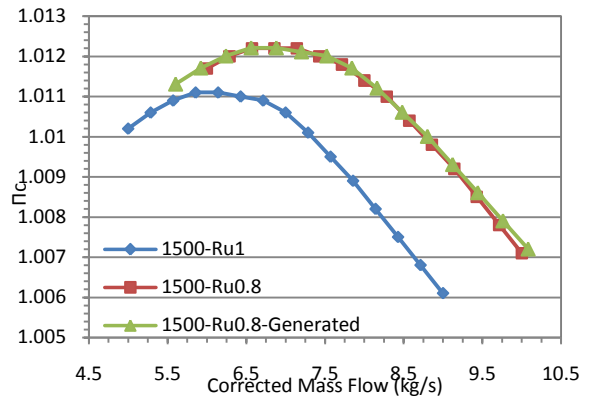
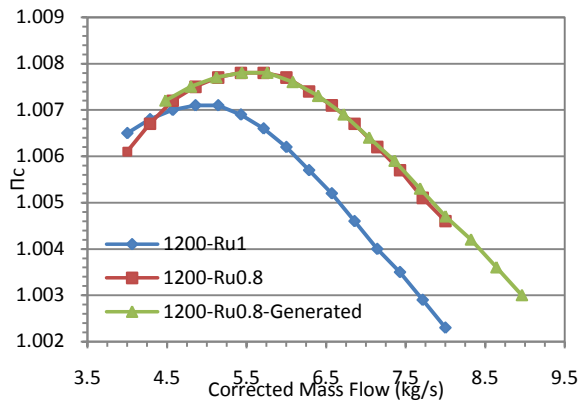
Ως αναφορά στον **συντελεστή προσαρμογής της παροχής (k_m)**, αν και οι τιμές πειράματος και κώδικα κυμαίνονται σε παραπλήσια επίπεδα, παρατηρείται διαφορά στην τάση μεταβολής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής. Σε αντίθεση με τα πειραματικά δεδομένα ο κώδικας δεν υποδεικνύει μεταβολή του συντελεστή διόρθωσης παροχής συναρτήσει των στροφών. Εν αντιθέσει, τα πειραματικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι η κατά παροχή απόσταση των χαρακτηριστικών καμπύλων σταθερών στροφών για διαφορετικούς λόγους στροφών, αυξάνει καθώς βαίνουμε σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής. Η απόκλιση αυτή μεταξύ πειραματικών δεδομένων και κώδικα οφείλεται πιθανότατα στο μονοδιάστατο μοντέλο ανάλυσης της ροής που θεωρεί ο κώδικας.

Κατόπιν της ανάλυσης για λόγο στροφών $R_u=1.5$ θα εξετάσουμε την συσχέτιση των καμπύλων του δεύτερου ρότορα και για λόγους στροφών $R_u=1.25$ & $R_u=0.8$ ώστε να προσδιοριστεί η γραμμικότητα η μη, των συντελεστών προσαρμογής συναρτήσει του λόγου στροφών σε μια περιοχή κοντά στον λόγο στροφών $R_u=1$. Η κατάρτιση μια σχέσης μεταξύ των συντελεστών παροχής και του λόγου στροφών παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής χαρτών λειτουργίας της δεύτερης πτερωτής για διάφορους λόγους στροφών χρησιμοποιώντας μόνο τα δεδομένα του χάρτη για λόγο στροφών $R_u=1$. Κρίθηκε σκόπιμο να διατηρηθούν οι απόλυτες ταχύτητες περιστροφής της δεύτερης πτερωτής (1200,1500 & 1800 RPM) ώστε να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχουσες καμπύλες λόγου στροφών $R_u=1$. Μέσω των επιθυμητών λόγων στροφών καταρτίστηκαν τα κάτωθι ζεύγη στροφών (Πίνακας 5.2).

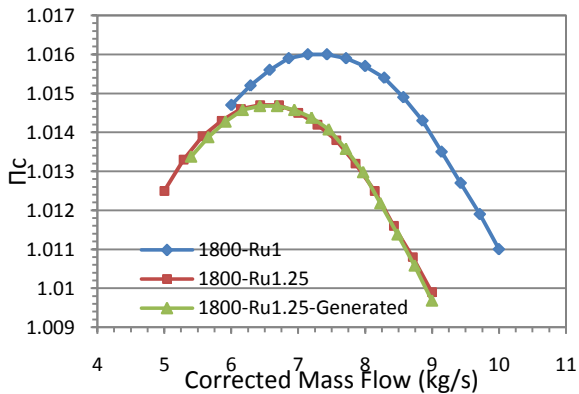
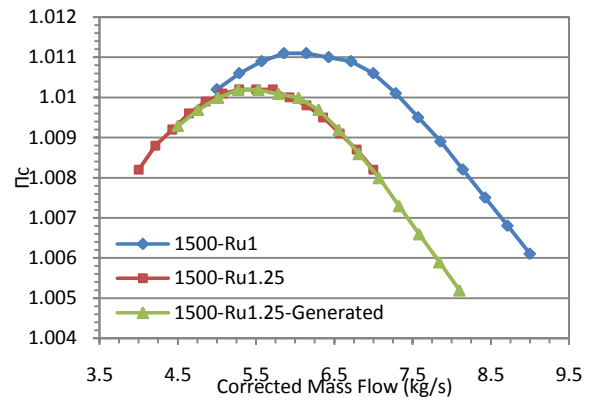
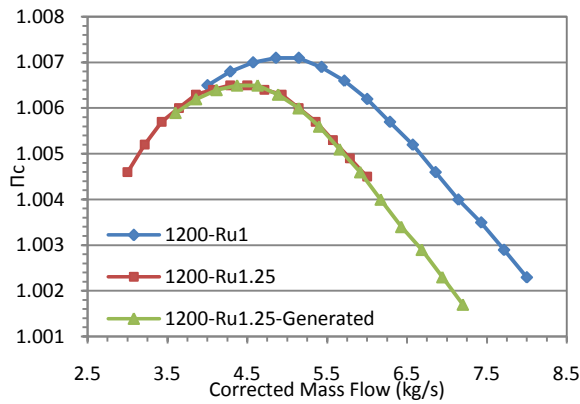
R_u	N_1	N_2
0.8	1500	1200
	1875	1500
	2250	1800
1.25	960	1200
	1200	1500
	1440	1800

Πίνακας 5.2: Ζεύγη στροφών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών προσαρμογής για λόγους στροφών $R_u=0.8$ & 1.25

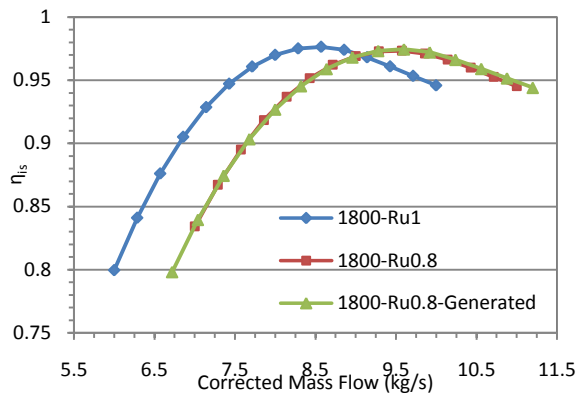
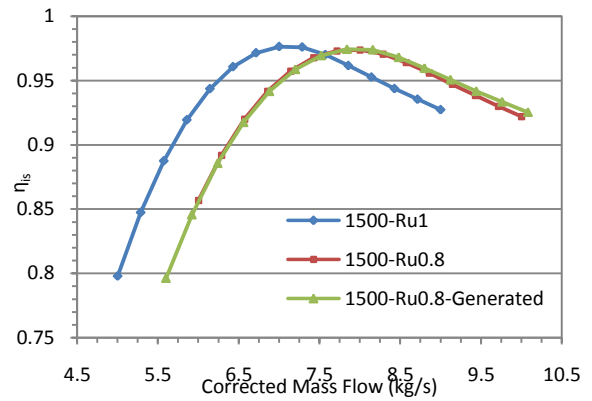
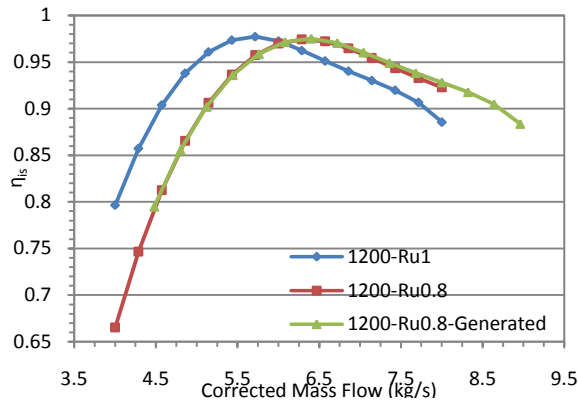
Η προσέγγιση των καμπύλων παροχής – λόγου πίεσης της δεύτερης πτερωτής για λόγο στροφών $R_u=0.8$ και $R_u=1.25$ παρουσιάζονται στα σχήματα 5.10 & 5.11 αντίστοιχα. Στα δεδομένα του κώδικα κρίθηκε σκόπιμο να καταρτιστούν αντίστοιχες σχέσεις και για το βαθμό απόδοσης, μέγεθος καταλυτικό στη μελέτη της λειτουργίας του συμπιεστή. Η απόκλιση των μεγεθών του βαθμού απόδοσης του κώδικα και των πειραματικών μετρήσεων απέτρεψε την κατάρτιση αντίστοιχης προσαρμογής των δεδομένων. Τα διαγράμματα προσαρμογής του βαθμού απόδοσης των δεδομένων του κώδικα φαίνονται στα σχήματα 5.12 5.13 & 5.14 για λόγους στροφών $R_u=0.8$, $R_u=1.25$ & $R_u=1.5$ αντίστοιχα. Τα διαγράμματα προσαρμογής του λόγου πίεσης για λόγο στροφών $R_u=1.5$ έχουν παρουσιαστεί στο σχήμα 5.9.



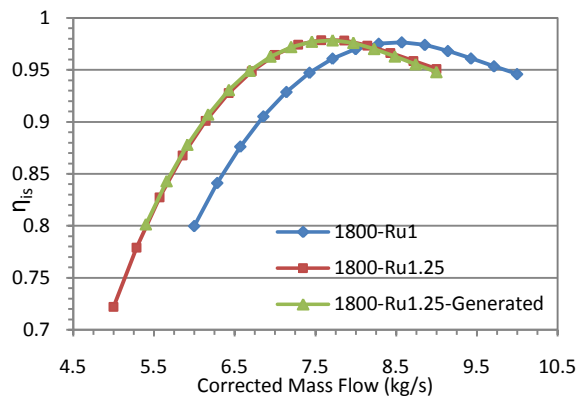
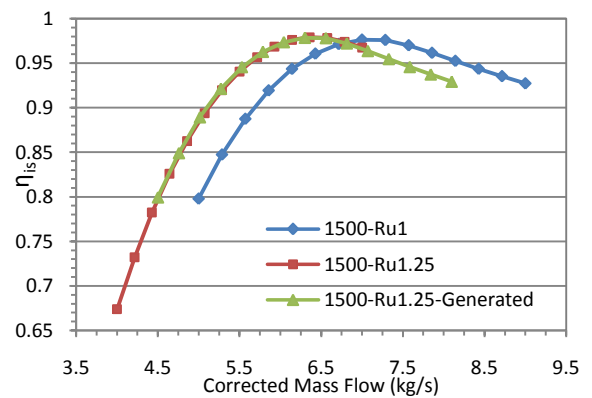
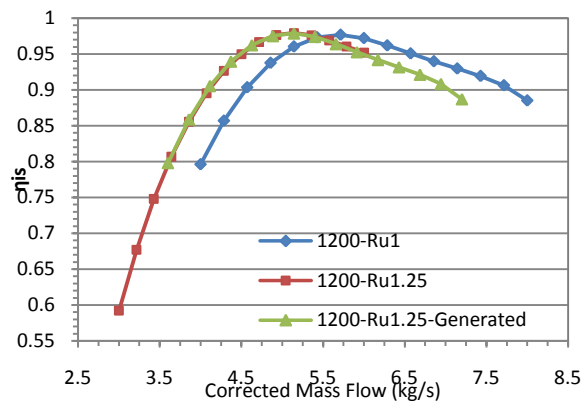
Σχήμα 5.10: Προσέγγιση της καμπύλης λόγου πίεσης $R_u=0.8$ με τα υπολογιστικά δεδομένα της καμπύλης $R_u=1$ στις 1200(επάνω αριστερά) 1500(επάνω δεξιά) & 1800 RPM (κάτω αριστερά)



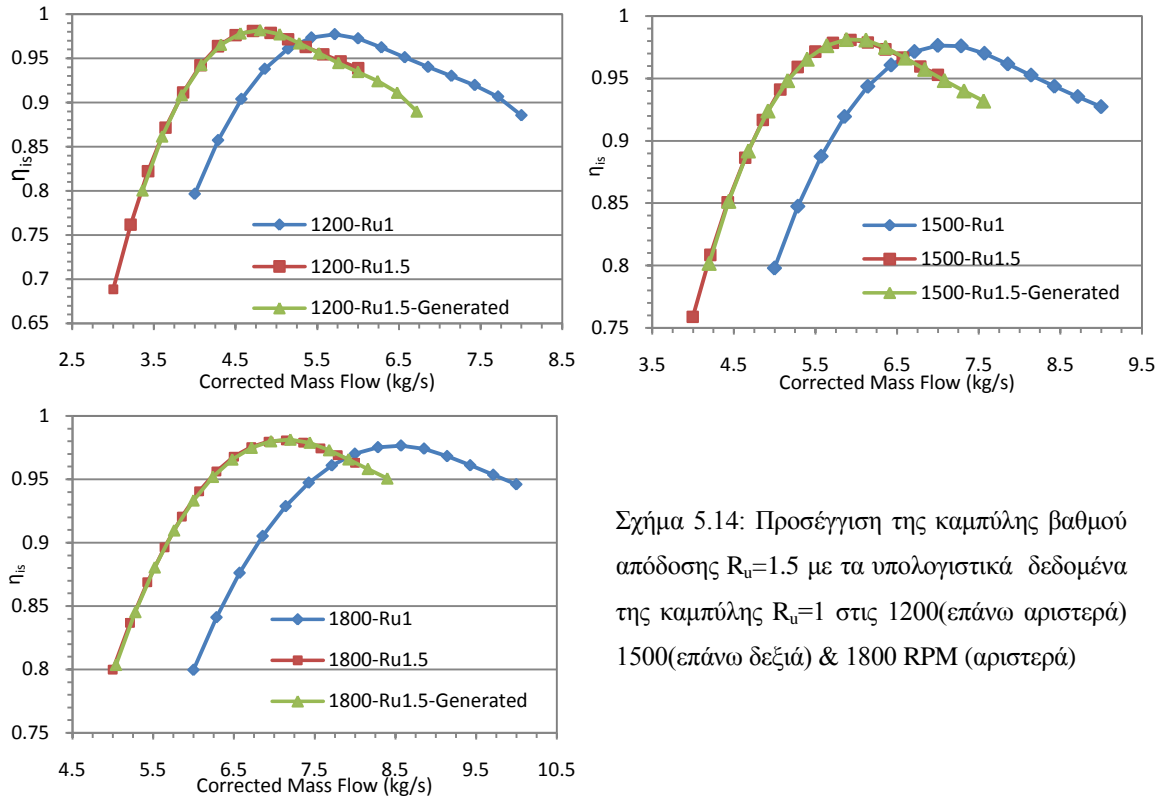
Σχήμα 5.11: Προσέγγιση της καμπύλης λόγου πίεσης $R_u=1.25$ με τα υπολογιστικά δεδομένα της καμπύλης $R_u=1$ στις 1200(επάνω αριστερά) 1500(επάνω δεξιά) & 1800 RPM (κάτω αριστερά)



Σχήμα 5.12: Προσέγγιση της καμπύλης βαθμού απόδοσης $R_u=0.8$ με τα υπολογιστικά δεδομένα της καμπύλης $R_u=1$ στις 1200(επάνω αριστερά) 1500(επάνω δεξιά) & 1800 RPM (αριστερά)



Σχήμα 5.13: Προσέγγιση της καμπύλης βαθμού απόδοσης $R_u=1.25$ με τα υπολογιστικά δεδομένα της καμπύλης $R_u=1$ στις 1200(επάνω αριστερά) 1500(επάνω δεξιά) & 1800 RPM (αριστερά)



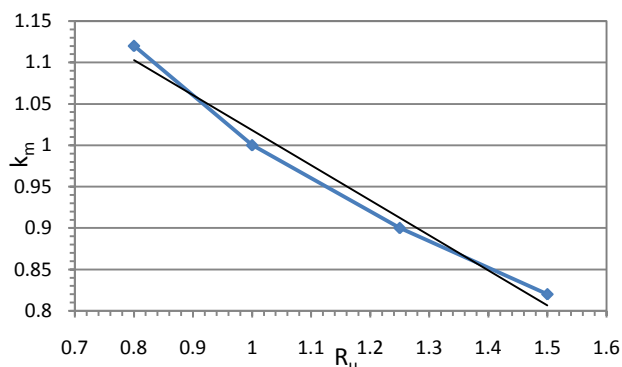
Σχήμα 5.14: Προσέγγιση της καμπύλης βαθμού απόδοσης $R_u=1.5$ με τα υπολογιστικά δεδομένα της καμπύλης $R_u=1$ στις 1200(επάνω αριστερά) 1500(επάνω δεξιά) & 1800 RPM (αριστερά)

Από την προσέγγιση των παραπάνω καμπύλων προέκυψαν οι κάτωθι συντελεστές προσαρμογής (Πίνακας 5.3)

R_u	N_2	K_m	K_p	k_η
0.8	1200	1.12	1.0007	0.998
	1500	1.12	1.0011	0.998
	1800	1.12	1.0015	0.998
1.25	1200	0.9	0.9994	1.002
	1500	0.9	0.9991	1.002
	1800	0.9	0.9987	1.002
1.5	1200	0.82	0.999007	1.005
	1500	0.82	0.998418	1.005
	1800	0.82	0.997904	1.005

Πίνακας 5.3: Συντελεστές προσαρμογής παροχής (k_m) λόγου πίεσης (k_p) και βαθμού απόδοσης (k_η) για προσέγγιση της καμπύλης λόγου στροφών $R_u=0.8$, 1.25 & 1.5 βάσει της καμπύλης λόγου στροφών $R_u=1$

Από τα δεδομένα που προέκυψαν, παρατηρήθηκε ταύτιση του συντελεστή προσαρμογής παροχής μεταξύ των διαγραμμάτων προσαρμογής λόγου πίεσης και βαθμού απόδοσης. Επίσης παρατηρούμε ότι ο συντελεστής αυτός είναι ανεξάρτητος της ταχύτητας περιστροφής για δεδομένο λόγο στροφών. Με την παραδοχή ότι ο συντελεστής παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από τον λόγο στροφών και παρεμβάλλοντας το σημείο ($R_u=1, k_m=1$) στο σχήμα 5.15 απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή προσαρμογής παροχής συναρτήσει του λόγου στροφών.



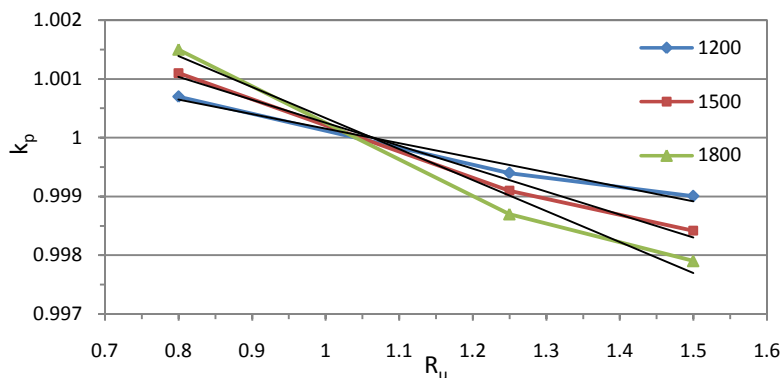
Σχήμα 5.15: Μεταβολή του συντελεστή προσαρμογής παροχής (k_m) συναρτήσει του λόγου στροφών

Ο συντελεστής παροχής δεν παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία και για το λόγο αυτό η παραδοχή της γραμμικής μεταβολής δεν εισφέρει κίνδυνο αυξημένου σφάλματος στους παραγόμενους χάρτες. Επιπλέον, δεδομένου του γεγονότος ότι για αποδοτική λειτουργία της βαθμίδας ο λόγος στροφών πρέπει να κυμαίνεται κοντά στην μονάδα, η διερεύνηση του συγκεκριμένου εύρους λόγου στροφών κρίνεται επαρκής. Καταλήγουμε εν τέλει στην ακόλουθη γραμμική έκφραση του συντελεστή k_m (Σχέση 5.3).

$$k_m = -0.422 \times R_u + 1.440 \quad (\text{Σχέση 5.3})$$

Εν αντιθέσει με τον συντελεστή προσαρμογής παροχής, ο συντελεστής προσαρμογής λόγου πίεσης παρουσιάζει συγκριμένη τάση μεταβολής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής. Η μεταβολή αυτή φαίνεται στο Σχήμα 5.16 και παρουσιάζεται σχεδόν γραμμική. Παρατηρούμε ότι βαίνοντας σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής η κλίση της μεταβολής του συντελεστή προσαρμογής λόγου πίεσης αυξάνει. Είναι δυνατόν να θεωρηθεί μια γραμμική σχέση μεταβολής του συντελεστή συναρτήσει του λόγου στροφών για κάθε ταχύτητα περιστροφής ή αντιστρόφως μια σχέση συναρτήσει της ταχύτητας

περιστροφής για κάθε λόγο στροφών. Δεδομένου ότι στον συντελεστή προσαρμογής λόγου πίεσης απαιτείται μεγάλη ακρίβεια δεν θεωρείται σκόπιμο να ακολουθηθεί μια τέτοια προσέγγιση.

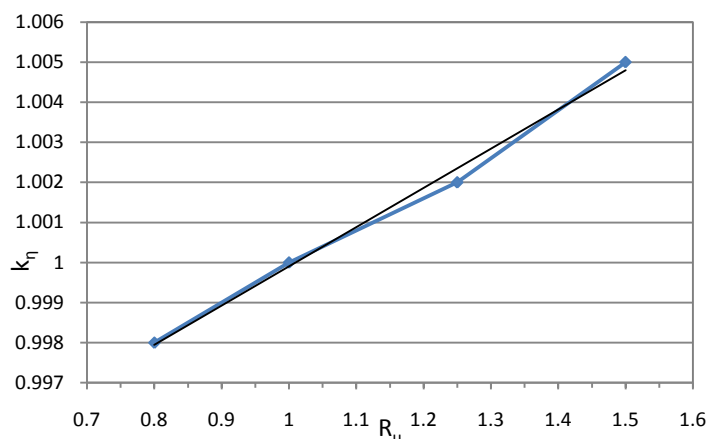


Σχήμα 5.16: Μεταβολή του συντελεστή προσαρμογής λόγου πίεσης (k_p) συναρτήσει του λόγου στροφών

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού καταρτίστηκε μια εξίσωση (Σχέση 5.4) η οποία παράγει την εξίσωση μεταβολής του συντελεστή k_p είτε συναρτήσει του λόγου στροφών ή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής. Για να επετεύχθη αυτό θεωρήσαμε γραμμική μεταβολή του συντελεστή k_p συναρτήσει του λόγου στροφών (Σχήμα 5.12) και καταρτίσαμε μια εξίσωση η οποία παράγει την οικογένεια ευθειών του συντελεστή k_p καθώς η κλίση των ευθειών του Σχήματος 5.12 έχει καθαρά γραμμική συσχέτιση με την ταχύτητα περιστροφής. Η σχέση της κλίσης αυτής με την ταχύτητα περιστροφής εισήχθη στη εξίσωση η οποία μας δίνει την οικογένεια ευθειών. Η τελική εξίσωση του συντελεστή k_p για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής βρίσκεται αφού ο σταθερός όρος υπολογίζεται παρεμβάλλοντας το σημείο ($R_u=1, k_p=1$).

$$k_p = (-3 \times 10^{-6} \times N_2 + 0.0025) \times R_u + 0.9982 + 3 \times 10^{-6} \times N_2 \quad (\text{Σχέση 5.4})$$

Ανάλογη συμπεριφορά με τον συντελεστή παροχής παρουσιάζει ο συντελεστής διόρθωσης του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης (k_η). Δεν παρουσιάζεται κάποια μεταβολή του συντελεστή συναρτήσει των στροφών για σταθερό λόγο στροφών και ενώ η εξάρτησή του από το λόγο στροφών παρουσιάζεται γραμμική, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Μεταβολή του συντελεστή προσαρμογής βαθμού απόδοσης (k_η) συναρτήσει του λόγου στροφών

Σε συμφωνία με τις παραδοχές που θέσαμε για τον συντελεστή διόρθωσης παροχής, καταρτίστηκε η ακόλουθη γραμμική έκφραση του συντελεστή διόρθωσης του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του λόγου στροφών.

$$k_\eta = 0.009 \times R_u + 0.990 \quad (\text{Σχέση 5.5})$$

Μέσω των σχέσεων 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 & 5.5 μπορούμε να παράγουμε χάρτες της δεύτερης πτερωτής για διάφορους λόγους στροφών χρησιμοποιώντας μόνο τα δεδομένα του χάρτη για λόγο στροφών $R_u=1$. Η ακρίβεια των χαρτών αυτών είναι αμφισβητήσιμη τόσο λόγω της μονοδιάστατης ανάλυσης του κώδικα που παρέχει τα δεδομένα στα οποία βασίζονται οι σχέσεις 5.3, 5.4 & 5.5 όσο και λόγω των παραδοχών γραμμικής εξάρτησης των συντελεστών διόρθωσης από το λόγο στροφών. Παρά την ενδεχόμενη απόκλιση των παραγόμενων χαρτών, η παραπάνω ανάλυση παραμένει ένα χρήσιμο εργαλείο το οποίο παράγει μια πρώτη εκτίμηση παρακάμπτοντας την εκτέλεση ενός σημαντικού πλήθους επαναλήψεων του κώδικα.

6

Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη ανασκόπηση της πειραματικής εργασίας που έγινε στη διάταξη στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, θα αναφερθούν τα όποια συμπεράσματα εξήχθησαν και θα καταρτιστούν κάποιες προτάσεις μελλοντικής εργασίας στην διάταξη.

6.1 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας ολοκληρώνεται το δεύτερο στάδιο παραμετρικής μελέτης της εγκατάστασης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών. Η έρευνα σε διατάξεις αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών που είναι διαθέσιμη σε ανοιχτή βιβλιογραφία είναι περιορισμένη. Η εργασία αυτή αποτελεί τμήμα της προσπάθειας του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών για εμπλουτισμό της υπάρχουσας ανοιχτής βιβλιογραφίας.

Κατά την εκκίνηση της εργασίας αυτής είχε ολοκληρωθεί το πρώτο σκέλος παραμετρικής μελέτης στη διάταξη. Το πρώτο σκέλος αφορούσε την διερεύνηση της επίδρασης του λόγου στροφών και των γωνιών stagger στην λειτουργία της βαθμίδας και κατέδειξε το βέλτιστο συνδυασμό γωνιών stagger και τους λόγους στροφών στους οποίους έπρεπε να επικεντρωθεί η περαιτέρω μελέτη. Ωστόσο η παραμετρική αυτή μελέτη αποτέλεσε την πρώτη πειραματική εργασία στην διάταξη και με το πέρας της υπήρχε πλήθος χαρακτηριστικών της εγκατάστασης που ήταν αναγκαίο να διερευνηθούν.

Εφόσον γνωρίζαμε την κατεύθυνση στην οποία έπρεπε να κινηθεί η παρούσα παραμετρική μελέτη, το πρώτο στάδιο της εργασίας ήταν η επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας και επιμέρους εργασίες για προσπάθεια εξομάλυνσης της ροής. Στην επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας περιλαμβάνεται η κατάρτιση κώδικα υπολογισμού του περιθωρίου σφάλματος των μετρήσεων και η διερεύνηση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Στην προσπάθεια εξομάλυνσης της ροής περιλαμβάνεται η πλήρωση των οπών στη βάση των πτερυγίων του πρώτου ρότορα και η διερεύνηση της περιφερειακής ανομοιομορφίας της ροής. Επιπλέον έγινε αντιπαραβολή της ακρίβειας των αποτελεσμάτων με 12 έναντι 26 ακτινικών μετρήσεων ανά σάρωση του καναλιού ροής ενώ επίσης έγινε προσπάθεια υπολογισμού του βαθμού απόδοσης μέσω της κατανάλωσης ισχύος της εγκατάστασης. Κατόπιν έγινε προσπάθεια υπολογισμού του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης όσο το

δυνατόν πιο απαλλαγμένου από τις μετρήσεις των μεγεθών της ροής προς αντιπαραβολή με τα αποτελέσματα του κώδικα.

Εφόσον ολοκληρώθηκαν οι προκαταρκτικές μετρήσεις που καθόρισαν τις βέλτιστες επιμέρους παραμέτρους, περάσαμε στο δεύτερο στάδιο της εργασίας. Το δεύτερο στάδιο αφορά τη μελέτη της λειτουργίας της βαθμίδας με παράμετρο το αξονικό διάκενο και τον λόγο στροφών των δύο πτερωτών. Το αξονικό διάκενο και ο λόγος στροφών είναι δύο από τις τρεις βασικές παραμέτρους στις οποίες επικεντρώνεται η έρευνα στις βαθμίδες αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών, μαζί με τις γωνίες stagger. Η παραμετρική μελέτη έγινε βασιζόμενη στα συμπεράσματα των προηγούμενων εργασιών τόσο για τις γωνίες stagger που επιλέχθηκαν όσο και για τους λόγους στροφών που διερευνήθηκαν. Η ιδέα για πραγματοποίηση μετρήσεων σε μεγαλύτερες στροφές εγκαταλείφτηκε λόγω των αυξημένων κραδασμών.

Η περιμετρική μελέτη κατέδειξε τάση βελτίωσης της λειτουργίας της πρώτης πτερωτής με μείωση του αξονικού διακένου καθώς επίσης και την ύπαρξη βέλτιστης απόστασης πέραν της οποίας περαιτέρω προσέγγιση των πτερωτών αναιρεί την εν λόγω βελτίωση. Σημαντική βελτίωση του εύρους λειτουργίας της πρώτης πτερωτής παρατηρείται για 50% ταχύτερη περιστροφή της δεύτερης πτερωτής. Ως αναφορά τη δεύτερη πτερωτή συγκεκριμένες μετρήσεις κατέδειξαν ύπαρξη συνδυασμών των παραμέτρων λειτουργίας οι οποίοι επιτρέπουν βελτιωμένη λειτουργία, χωρίς όμως να υποδεικνύεται κάποια συγκεκριμένη τάση. Ωστόσο παρατηρήθηκε ελαφρά διεύρυνση της περιοχής λειτουργίας της δεύτερης πτερωτής για λόγο στροφών $R_u=1$ για τις μικρότερες τιμές αξονικού διακένου. Ανάλογη τάση δεν παρατηρήθηκε για λόγο στροφών $R_u=1.5$.

Με το πέρας των μετρήσεων έγινε σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τον κώδικα μονοδιάστατης ανάλυσης ροής σε διατάξεις ρότορα - ρότορα (R-R) και υπολογίσθηκαν οι σχέσεις εκείνες οι οποίες επιτρέπουν την προσαρμογή των δεδομένων του κώδικα στα πειραματικά για καλύτερη πρόβλεψη των χαρακτηριστικών λειτουργίας της παρούσας διάταξης.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας έχουμε μια ολοκληρωμένη παραμετρική μελέτη της βαθμίδας αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών.

6.2 Προτάσεις

Από την εργασία στην εγκατάσταση προέκυψαν οι εξής ιδέες για μελλοντικές μετρήσεις και αλλαγές στη διάταξη ενώ κάποιες παραμένουν ως προτάσεις από προηγούμενες εργασίες:

1. Τροποποίηση της διαδικασίας λήψης μετρήσεων και αυτοματισμός των μετακινήσεων των σωλήνων πίεσης για ταχύτερη εκτέλεση των πειραμάτων.
2. Διερεύνηση της συμπεριφοράς των πτερυγώσεων στην κορυφή της χαρακτηριστικής με περισσότερα σημεία λειτουργίας. Αυτή η μελέτη μπορεί να διαλευκάνει την προβληματική λειτουργία του πρώτου ρότορα και να καθορίσει τις ακριβείς τιμές Φ_{stall} για τον δεύτερο.
3. Μέτρηση ηχητικών εκπομπών και παραμετρική μελέτη συναρτήσει λόγου στροφών και αξονικού διακένου.
4. Διερεύνηση επίδρασης του εισερχόμενου επιπέδου τύρβης. Καταρχήν, πρέπει πρώτα να γίνει έλεγχος του επιπέδου τύρβης της εισερχόμενης ροής (θέση 1) και έπειτα η δοκιμή με αυξημένο επίπεδο τύρβης που μπορεί να επιτευχθεί με αφαίρεση του honeycomb.
5. Διερεύνηση για λόγο στροφών $R_u = N_2/N_1 < 1$, δηλαδή τον 1^ο ρότορα να στρέφεται γρηγορότερα από τον 2^ο ώστε ο 2^{ος} να βλέπει μικρότερες σχετικές γωνίες εισόδου και κατ' επέκταση θα πρέπει να μειωθεί η γωνία κλίσης του. Έτσι, θα μειωθεί ο σχετικός Mach εισόδου του 2^{ου} ρότορα αυξάνοντας το περιθώριο λειτουργίας χωρίς κρουστικά κύματα στο ακροπτερύγιο σε έναν πραγματικό κινητήρα turbofan.
6. Αλλαγή των πτερυγίων της διάταξης. Οι μέχρι τώρα μετρήσεις έχουν καταδείξει προβληματική συμπεριφορά των πτερυγίων. Αποτέλεσμα λογικό αν αναλογιστούμε ότι τα υπάρχοντα πτερύγια προέρχονται από βαθμίδες στάτορα κινητήρα GE J-79 του εργαστηρίου και δεν σχεδιάστηκαν για C-R λειτουργία.
7. Κατάρτιση σχέσεων εκτίμησης των συνολικών επιδόσεων της βαθμίδας από μετρήσεις στη μέση ακτίνα. Για μέγιστη ακρίβεια, η κατάρτιση των σχέσεων αυτών θα πρέπει να γίνει σε ροή απαλλαγμένη από τις διαταραχές που εμφανίζει η παρούσα διάταξη.

7 Βιβλιογραφία

[1] Χ.Αμπάτης. 2010. “Σχεδιασμός και κατασκευή συνιστωσών, θέση σε λειτουργία και μετρήσεις σε διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.

[2] Γ. Κατσίκης, 2008. “Σχεδιασμός και Κατασκευή Διάταξης Δοκιμών Αντίρροπα Στρεφόμενων Πτερωτών”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.

[3] Κ.Δ. Παπαηλιού, Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου. “Εισαγωγή Στις Θερμικές Στροβιλομηχανές”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2000.

[4] Κ.Μ. Μαθιουδάκης. “Εισαγωγή Στους Αεροπορικούς Κινητήρες - Στροβιλοαντιδραστήρες”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003.

[5] Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Ι. Αναγνωστόπουλος, Γ. Μπεργελές. “Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003, 3η Έκδοση.

[6] Σ.Ε. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΥ, “Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1989.

[7] Sharma, P.B., 1986, «Development of a Contra-Rotating Axial Flow Compressor», Research Report No IITD/ME – 86001, IIT Delphi, New Delhi

[8]. Sharma, P.B., Jain, Y.P., Jha, N.K. and Khanna, B.B. 1985, «Stalling Behaviour of a Contra-Rotating Stage», 7th International Symposium on Air Breathing Engines, paper No. 85-7087.

[9]. Sharma, P.B., Jain, Y.P., Jha, N.K. and Pundhir, D.S., 1988, «A study of some factors affecting the performance of a Contra-Rotating Axial Compressor Stage», Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 202, No. A1

[10]. Sharma, P.B. and Pundhir, D.S., 1989, «A study of flow structure in a Contra-Rotating Axial Compressor Stage», International Symposium on Air Breathing Engines Athens paper No, 8907023

[11] D.S. Pundhir and P.B. Sharma «A Study of Aerodynamic Performance of a Contra-Rotating Axial Compressor Stage» , Def. Sci. J., Vol. 42, No. 3, 1992
Desidoc

[12] Rao P.S., 1988, «Development and Testing of Contra-Rotating Axial Flow Fan», M. Tech Dissertation, Aerospace Dept. IIT Bombay

[13] Ravibabu K., Srinivasa Rao P, & Roy B; 1988, «Performance Analysis of a matched Contra-Rotating Axial Flow Unit»; National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, Kanpur, India

[14] Roy Bhaskar; Rao P. Srinivasa, 1989: «Ducted Contra-Rotating Axial Flow Fan Performance Studies», ASME COGEN TURBO III, Nice France, pp. 469-

474

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π1

Αρχεία κώδικα σφαλμάτων

Ο κώδικας υπολογισμού σφάλματος περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.2. Στο παράρτημα αυτό παραθέτονται τα αρχεία εισόδου και εξόδου με κάποια τυπικά μεγέθη καθώς και η περιγραφή του κώδικα για λόγους πληρότητας

Ο κώδικας είναι γραμμένος σε FORTRAN και χρησιμοποιεί μια ελαφρώς τροποποιημένη έκδοση του κώδικα CRCALC που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Χ. Αμπάτη ^[1] ως υποπρόγραμμα. Το πρόγραμμα αποτελείται από έναν manager ο οποίος καλεί 4 υποπρογράμματα:

5. Αρχικά καλείται το υποπρόγραμμα RmeasDif το οποίο τροποποιεί τις τιμές του αρχείου εισόδου του CRCALCmod. Χρησιμοποιεί ως αρχείο εισόδου το CRCALC.inp παράγει ως αρχείο εξόδου το RMEASD.dat
6. Καλείται το υποπρόγραμμα CRCALCmod το οποίο υπολογίζει τα μεγέθη της ροής από το τροποποιημένο αρχείο εισόδου.
7. Καλείται το υποπρόγραμμα ParDeriv το οποίο υπολογίζει τις μερικές παραγώγους των μεγεθών (παραγώγους ευαισθησίας) των μεγεθών της ροής. Αρχεία εισόδου είναι τα RCALCUNSORTED.dat & RCALCMOD.dat τα οποία παράγονται από το υποπρόγραμμα CRCALCmod. Ως αρχείο εξόδου παράγεται το PARDERIV.DAT το οποίο περιέχει τις παραγώγους ευαισθησίας των μεγεθών.
8. Τέλος καλείται το υποπρόγραμμα ErrorCalc το οποίο υπολογίζει το σφάλμα των μετρήσεων συνδυάζοντας τα δεδομένα των προηγούμενων υποπρογραμμάτων. Το υποπρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί, πλὴν των προαναφερθέντων, και το αρχείο εισόδου SIGMA.inp το οποίο περιέχει τα εκάστοτε σφάλματα των μετρούμενων μεγεθών.

SIGMA.inp

```
|R2 R3 a01 a02 a03 1_P0-P1 1_P1-P2 2_P2-P4 2_P3-P1
3_P2-P4 2_P0-P2 2_P0-P3 3_P0-P2 3_P0-P3 3_P3-P1 1_P0-Pat
2_P0-Pat 3_P0-Pat Speed1 Speed2 dum Pat-Pst1 Pst2-Pst1 Pst3-Pst2
Pamb Tamb RH PotSupply R1 Current1 Voltage1 OperationPoint
0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.038 0.036 0.042 0.035 0.041 0.064 0.064
0.062 0.056 0.060 0.022 0.034 0.066 1 6 0 0.016
0.016 0.014 0.5 0.3 0.025 0 0.5 0 0 0
```


CRCALC.inp

|Calibration Files|

calib.3hole

9550101calib.5hole

9550103calib.5hole

|Stagger angle of 1st (small base) & 2nd rotor (big base) at Rm|

43.0 43.0

|Bellmouth mass flow function. Order:a/b, Qflow=a.x+b|

1.7593 1.5046

|camber line Ymax/c radial distribution function coefficients.

Order:(n)/a1/a2/a3/..., f(x)= a1.x^n+a2.x^(n-1)+... |

3 4.54775076e-009 -1.791017484e-006 0.000163422322

0.06865367094

|Number of Rows|

130

|R2 R3 a01 a02 a03 1_P0-P1 1_P1-P2 2_P2-

P4 2_P3-P1 3_P2-P4 2_P0-P2 2_P0-P3

3_P0-P2 3_P0-P3 3_P3-P1 1_P0-Pat 2_P0-Pat

3_P0-Pat Speed1 Speed2 dum Pat-Pst1

Pst2-Pst1 Pst3-Pst2 Pamb Tamb RH

PotSupply R1 Current1 Voltage1 OperationPoint

272.5 272.5 0 10 -30 3.106485 0.6234918 -3.446539

0.2205688 -0.5879904 1.921857 1.965482 8.003738

8.051353 -0.4860519 -0.3517928 -1.370599 7.794484

1202.522 1808.771 5.052808 5.682399 6.01918

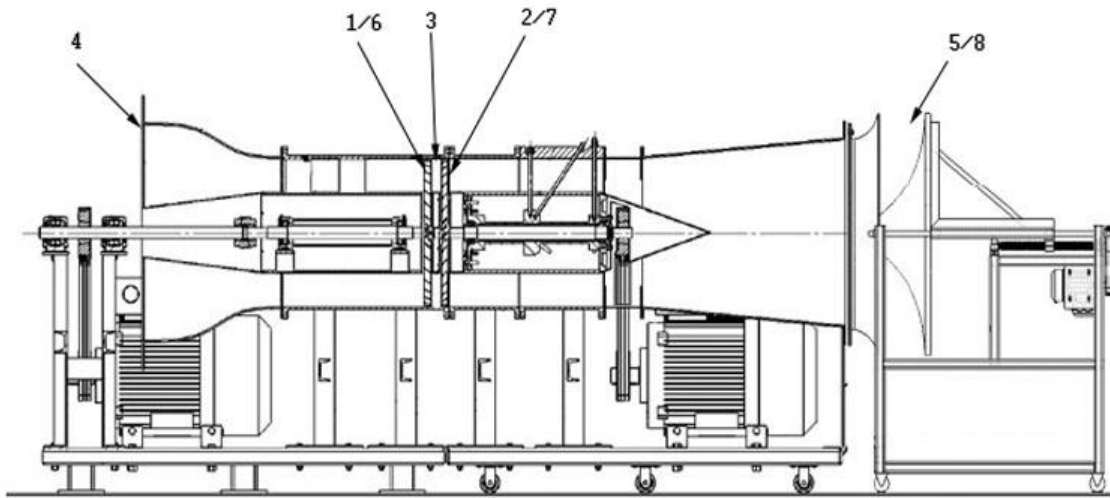
7.256493 987.486 20.80855 39.99874 7.994031

122.5 28.6021 186.7642 1

Π2

Έντυπο αρχειοθέτησης & οδηγίες χρήσης διάταξης

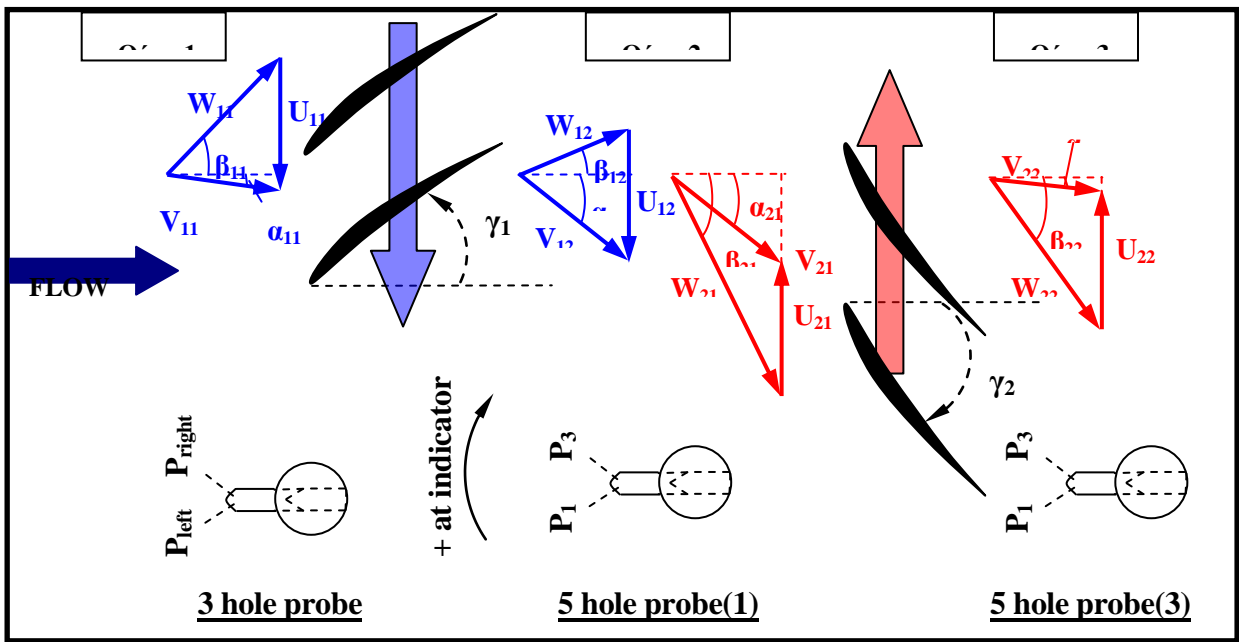
Ημερομηνία	:
Συμμετέχοντες	:
Κωδ. Μέτρησης	:



1	Γωνία σφήνωσης πτερυγίων (γ_1) 1ης Πτερωτής. (Αναφορά στη μέση ακτίνα)	degrees	
2	Γωνία σφήνωσης πτερυγίων (γ_2) 2ης Πτερωτής. (Αναφορά στη μέση ακτίνα)	degrees	
3	Αξονική απόσταση πτερωτών	chords	
4	Χρήση Bellmouth	NAI	OXI
5	Χρήση χείλους αγωγού εξόδου	NAI	OXI
6	Στροφές 1ης Πτερωτής N1	rpm	
7	Στροφές 2ης Πτερωτής N2	rpm	
8	Θέση κώνου στραγγαλισμού L (αναφορά όπως στην φωτογραφία)	mm	

Εργασία	Έναρξη	Τέλος	Παρατηρήσεις

Εργασία	Τέλος	Έναρξη	Παρατηρήσεις



**ΕΜΠ****ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ****ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ CONTRA ROTATING ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ****Τροφοδοσίες Ρεύματος****Τροφοδοσία Κινητήρων**

Οι διακόπτες των κινητήρων βρίσκονται στον τριφασικό πίνακα που βρίσκεται δίπλα στην εγκατάσταση. Ανεβάζουμε τους διακόπτες του Inverter και του DC πρώτα και μετά τον γενικό.

Τροφοδοσία Μετρητικής αλυσίδας

Ο διακόπτης της μετρητικής αλυσίδας βρίσκεται στο πάνω αριστερά μέρος της κονσόλας που στεγάζει τον υπολογιστή. Εκεί στεγάζονται επίσης οι μεταλάκτες πίεσης και οι ενισχυτές της μετρητικής αλυσίδας. Η τροφοδοσία της κονσόλας είναι ανεξάρτητη του τριφασικού δικτύου που τροφοδοτεί τους κινητήρες και δεν χρειάζεται να ανεβάσουμε τον γενικό για να λειτουργήσει ο υπολογιστής και η μετρητική αλυσίδα. Η τροφοδοσία του υπολογιστή είναι ανεξάρτητη της μετρητικής αλυσίδας. Δεν χρειάζεται να σηκώσουμε τον διακόπτη της μετρητικής αλυσίδας για να λειτουργήσει ο υπολογιστής. Ο ενισχυτής των αισθητήρων ταχείας απόκρισης βρίσκεται στο δωμάτιο ελέγχου, στο αριστερό μέρος της κεντρικής κονσόλας και πρέπει να ενεργοποιηθεί ξεχωριστά.

Προθέρμανση της Εγκατάστασης**Μετρητική Αλυσίδα**

Τα όργανα της μετρητικής αλυσίδας χρειάζονται προθέρμανση ώστε να φτάσουν τη θερμοκρασία λειτουργίας και να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ακριβείς μετρήσεις. Γι'αυτό το λόγο πρέπει να τα ανοίγουμε τουλάχιστον μισή ώρα πριν τη λήψη μετρήσεων.

Μηχανικές Συνιστώσες της Εγκατάστασης

Μέχρι να φτάσουν σε συνθήκες λειτουργίας οι μηχανικές συνιστώσες (εδράσεις, μάντες κλπ) οι περωτές πρέπει να περιστρέφονται σε χαμηλή ταχύτητα για λίγα λεπτά.

Εκκίνηση και Έλεγχος Εγκατάστασης**1^η Πτερωτή (εμπρός)**

Η 1^η περωτή κινείται από τον 3Φ κινητήρα ο οποίος ελέγχεται μέσω του inverter που είναι τοποθετημένο στην είσοδο δίπλα στη σκάλα. Η ταχύτητα και η φορά περιστροφής ελέγχεται από το χειριστήριο που βρίσκεται στο δωμάτιο ελέγχου. Προσέχουμε η μεταβολή των στροφών να γίνεται ομαλά και όχι απότομα. Αυτό ισχύει τόσο για την επιτάχυνση όσο και για την επιβράδυνση της περωτής. Επίσης λαμβάνουμε υπ'οψιν την καθυστέρηση μεταβολής των στροφών της περωτής που προκαλεί ο μάντας. Για να

εκκινήσουμε την πτερωτή επιλέγουμε την επιθυμητή φορά περιστροφής και πιέζουμε το πράσινο κουμπί. Σε περίπτωση ανάγκης άμεσης ακινητοποίησης της πτερωτής πιέζουμε το κόκκινο κουμπί. Για τον τερματισμό λειτουργίας κατεβάζουμε σταδιακά τις στροφές μέχρι να ακινητοποιηθεί η πτερωτή και πατάμε το πράσινο κουμπί για να σβήσει.

2^η Πτερωτή(πίσω)

Η 2^η πτερωτή κινείται απο τον DC κινητήρα ο οποίος ελέγχεται απο τη γέφυρα θυρίστορ που στεγάζεται στην κονσόλα δίπλα στον inverter, στο πίσω μέρος της εγκατάστασης. Η ταχύτητα περιστροφής ελέγχεται απο το χειριστήριο που βρίσκεται στο δωμάτιο ελέγχου. Για εκκινήσουμε την πτερωτή πατάμε το πράσινο κουμπί, και αφού ακούσουμε τον χαρακτηριστικό ήχο ρυθμίζουμε τις στροφές. Η δεύτερη πτερωτή ενδέχεται να έχει μεγαλύτερη καθυστέρηση στη μεταβολή των στροφών αφού λόγω κατασκευής ο ιμάντας είναι λιγότερο τανυσμένος και ενδέχεται να ολισθαίνει σε καταστάσεις μεταβατικής λειτουργίας. Σε περίπτωση ανάγκης άμεσης ακινητοποίησης της πτερωτής πιέζουμε το κόκκινο κουμπί. Για τον τερματισμό λειτουργίας κατεβάζουμε σταδιακά τις στροφές μέχρι να ακινητοποιηθεί η πτερωτή και πατάμε το κόκκινο κουμπί.

Βαλβίδα στραγγαλισμού

Η βαλβίδα στραγγαλισμού κινείται απο εναν 3Φ κινητήρα ο οποίος ελέγχεται απο ένα inverter που είναι τοποθετημένο πάνω στη βάση της διάταξης και ελέγχεται απο το χειριστήριο στο δωμάτιο ελέγχου. Για να μετατοπίσουμε τη βαλβίδα επιλέγουμε με τον διακόπτη την κατεύθυνση (OPEN/CLOSE) και κατόπιν την ταχύτητα με την οποία θέλουμε να μετακινηθεί η βαλβίδα (3 διαθέσιμες ρυθμισεις ταύτητας) και πατάμε το κουμπί. Η βαλβίδα μετακινείται όσο κρατάμε το κουμπί πατημένο. Όσο πιο κλειστή είναι η βαλβίδα τόσο μεγαλύτερη δύναμη δέχεται απο τη ροή. Αυτό πρέπει να το λαμβάνουμε υπ'οψιν όταν επιλέγουμε την ταχύτητα μετακίνησης της πτερωτής. Όταν η βαλβίδα φτάσει στα οριακά σημεία λειτουργίας ενα σερ διακοπών διακόπτει αυτόματα την εντολή μετακίνησης και ενα κόκκινο λαμπάκι ανάβει στο χειριστήριο στο δωμάτιο ελέγχου. Στο τέλος κάθε σειράς μετρήσεων καλό είναι η βαλβίδα να επανέρχεται στην αρχική της θέση, πλήρως ανοικτή.

Έλεγχος των σωλήνων 5 οπών

Οι σωλήνες 5 οπών βρίσκονται στις θέσεις 2 και 3. Στη θέση 1 έχουμε τον σωλήνα 3 οπών ο οποίος δεν περιστρέφεται. Ο έλεγχος των σωλήνων 5 οπών γίνεται απο τα χειριστήρια στο δωμάτιο ελέγχου. Στο δωμάτιο ελέγχου βρίσκονται και οι controllers των σωλήνων οι οποίοι ενεργοποιούνται απο τον διακόπτη στο αριστερό μέρος του κάθε ενός. Οι controllers έχουν 2 οθόνες. Στην αριστερη οθόνη αναγράφεται η ακτινική θέση του probe και στην αριστερή η γωνία που σχηματίζει με τον άξονα της μηχανής. Το αριστερό χειριστήριο ρυθμίζει τον probe που βρίσκεται στη θέση 2 και το δεξί αυτόν στη θέση 3. Το πάνω κουμπί μετατοπίζει τον probe προς τα πάνω (προς το tip του πτερυγίου) και το κάτω προς τα κάτω (προς το hub). Το δεξί κουμπί περιστρέφει τον probe προς τις θετικές γωνίες και το αριστερο προς αρνητικές.

Λήψη δεδομένων

Όλα τα δεδομένα από τη μετρητική αλυσίδα καταλήγουν στον υπολογιστή που βρίσκεται στην κονσόλα με τους ενισχυτές και τους μεταλλάκτες πίεσης, δίπλα στην εγκατάσταση. Για να έχουμε πρόσβαση στα δεδομένα από το δωμάτιο ελέγχου, συνδεόμαστε στον υπολογιστή με remote desktop. Για να μπούμε στο δίκτυο που βρίσκεται ο υπολογιστής της κονσόλας συνδεόμαστε με το UTP καλώδιο που βρίσκεται στο δωμάτιο ελέγχου.

Αφού συνδεθούμε τρέχουμε την εφαρμογή Data Acquisition NI. Δημιουργούμε νέο φάκελο και τον ονομάζουμε YYYYMMDD (Y=έτος, M=μήνας, D=ημέρα). Μέσα σε αυτόν τον φάκελο πρέπει να βρίσκεται το αρχείο εισόδου του προγράμματος που έχει κατάληξη .set και μπορεί να βρεθεί στους φακέλους παλαιότερων μετρήσεων καθώς και τα αρχεία βαθμονόμησης των σωλήνων πίεσης 5holecalib 9550101.inp 5holecalib 9550103.inp και 3holecalib.inp τα οποία επίσης βρίσκονται στους φακέλους των προηγούμενων μετρήσεων.

Κατά τη διάρκεια λήψης

Τερματισμός Εργασιών

Όταν ολοκληρώσουμε τις μετρήσεις και αφού ακολουθήσουμε τις διαδικασίες τερματισμού της κάθε συνιστώσας φροντίζουμε να αφήσουμε τους probes κοντά στο tip και η βαλβίδα στραγγαλισμού τελείως ανοιχτή (maximum παροχή). Αυτό το κάνουμε κυρίως για να διευκολυνθούμε σε τυχόν εργασίες στην εγκατάσταση (πχ. αφαίρεση μιας πτερωτής).

