



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Σχεδιασμός και κατασκευή συνιστωσών, θέση
σε λειτουργία και μετρήσεις σε διάταξη
δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Χρήστου Αμπάτη

Επίβλεψη:
Καθηγητής Κ. Μαθιουδάκης
Λέκτορας Ν. Αρετάκης

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

**Αφιερώνεται στους γονείς μου
Σταύρο και Κατερίνα**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη θέση αυτή αισθάνομαι το χρέος και την επιθυμία να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά και στην κατεύθυνση προς τη δικιά μου, προσωπική ολοκλήρωση.

Πρώτα, τον καθηγητή Δρα. Κ. Μαθιουδάκη για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα αυτό, καθώς και για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας. Επίσης, τον λέκτορα Δρα. Ν. Αρετάκη για την επίβλεψη, την αμέριστη βοήθεια και την ενεργή συμμετοχή του σε όλα τα στάδια της εργασίας. Ακόμη, τους Δρες. Γιάννη Ρουμελιώτη και Αλέξιο Αλεξίου για τις συμβουλές τους και την υποστήριξή τους σε διάφορα στάδια της εργασίας και πέραν αυτής. Τον Δρα. Αντρέα Κυριαζή για την υποστήριξη και το ενδιαφέρον που έδειξε. Τον φίλο και συνάδελφο Γιώργο Κατσίκη για την βοήθειά του ειδικά στην αρχή και το τέλος στο εργασίας αυτής η οποία είναι συνέχεια της δικιάς του διπλωματικής εργασίας. Τον φίλο και τεχνίτη Σωτήρη Μαυράκη για τις ιδέες και τη βοήθειά του στις κατασκευές, αλλά και για την εκμάθηση της εφαρμογής ορισμένων κατεργασιών. Τον τεχνικό Βασίλη Ζαφειράκη για την βοήθειά του στις ηλεκτρικές-ηλεκτρονικές κατασκευές της διάταξης. Τον τεχνίτη Μπάμπη Μαυράκη για τις ιδέες του και ειδικότερα για το ξεκαλούπωμα του αγωγού εισόδου. Το υπόλοιπο προσωπικό του εργαστηρίου. Όλους του παραπάνω για την προθυμία και το ενδιαφέρον που έδειξαν, αλλά και για το ευχάριστο και επικοινωνιακό κλίμα της συνεργασίας μας.

Τους συναδέλφους. Σπύρο Μπέλλιο και Δημήτρη Πετρίδη για τη βοήθειά τους στη διαδικασία ευθυγράμμισης των ατράκτων. Τον αγαπητό φίλο Μάρκο Γεράκη για τις υποδείξεις του στις κατασκευές των καλουπιών και των πολυεστερικών αντικειμένων της διάταξης, καθώς και για όλες τις γνώσεις επί των κατασκευών που μου έχει μεταδώσει όλα αυτά τα χρόνια της φιλίας μας. Τον Τάσο Αποστολόπουλου για τις υποδείξεις του στο φινίρισμα των καλουπιών.

Τους συναδέλφους και αγαπητούς φίλους Νατάσα Ανδρή, Γιώργο Κανακάρη και Παναγιώτη Σαμαρτζή για τη βοήθειά τους σε κάποια στάδια των κατασκευών, αλλά και για την παρέα τους σε κάποιες από τις πολλές και μοναχικές ώρες των μετρήσεων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και τα αδέρφια μου, που στήριξαν με κάθε τρόπο τις επιλογές μου όλα αυτά τα χρόνια των έως τώρα σπουδών μου και που με απάλλαξαν από αρκετές υποχρεώσεις, ειδικότερα την περίοδο εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Χρήστος Σ. Αμπάτης

Ιούλιος 2010

“Σχεδιασμός και κατασκευή συνιστώσων, θέση σε λειτουργία και μετρήσεις σε διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών”
Χρήστος Σ. Αμπάτης

Περίληψη

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, η υπάρχουσα διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών (C-R) που είχε σχεδιασθεί και κατασκευαστεί στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας, συμπληρώνεται με επιπλέον συνιστώσες και τροποποιήσεις, μετρητικό εξοπλισμό, τίθεται σε λειτουργία και μέσω των πρώτων μετρήσεων που εκπονούνται, πιστοποιείται η δυνατότητα επιτυχούς εκτέλεσης πειραμάτων, και διαπιστώνονται οι ιδιαιτερότητες της διάταξης. Μια αρχική παραμετρική μελέτη δίνει την πρώτη εικόνα του πεδίου ροής και των επιδόσεων μιας βαθμίδας συμπίεστη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από πολυεστέρα-υαλούφασμα ο συγκλίνων αγωγός εισόδου (Bellmouth) και το χείλος εξόδου του διαχύτη. Η κατασκευή του καλουπιού του χείλους εξόδου επετεύχθη με το σχεδιασμό και κατασκευή ενός βραχίονα 2-βαθμών ελευθερίας για τη διαμόρφωση σωμάτων εκ περιστροφής από φελιζόλ. Ο έλεγχος των ηλεκτροκινητήρων της διάταξης από το δωμάτιο ελέγχου επετεύχθη με το σχεδιασμό και κατασκευή των αντίστοιχων τηλεχειριστηρίων.

Η τροποποίηση των πτερυγίων για ρύθμιση του ακτινικού διακένου, ο έλεγχος αζυγοσταθμίας των πτερωτών, ο έλεγχος ακτινικής ταλάντωσης των πτερυγίων, η τάνυση των ιμάντων κίνησης, η ευθυγράμμιση των ατράκτων και των τροχαλιών, και ο υπολογισμός της προέντασης των κοχλιοσυνδέσεων στις περιστρεφόμενες συνιστώσες της διάταξης, αποτέλεσαν τις διαδικασίες που εξασφαλίζουν την ομαλή και ασφαλή λειτουργία, αλλά και που πρέπει να επιβλέπονται προσεκτικά κατά την εποπτεία και συντήρηση της διάταξης.

Η ανάγκη για δυνατότητα εύρεσης των γωνιών μετάλλου καθ' ύψος των πτερυγίων, αλλά και ο μελλοντικό υπολογισμός της ροής του C-R με λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), οδήγησε στη ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των πτερυγίων, η οποία έγινε μέσω ψηφιοποίησης των αεροτομών σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος των πτερυγίων και την ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα σε Fortran.

Μετά την ολοκλήρωση της διάταξης, πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση του μετρητικού εξοπλισμού, ο οποίος περιλαμβάνει 1^{ov}) μεταλλάκτες πίεσης που συνδέονται οπές στο κέλυφος για μέτρηση στατικών πιέσεων, καθώς και με σωλήνες πίεσης τριών και πέντε οπών για μέτρηση της πίεσης και ταχύτητας ανάντι και κατάντι κάθε πτερωτής, 2^{ov}) αισθητήρες προσέγγισης για μέτρηση των στροφών των πτερωτών, καθώς και επιταχυνσιόμετρα για μέτρηση των κραδασμών. Για όλα τα παραπάνω όργανα, διεξήχθη η βαθμονόμησή τους και ο υπολογισμός των σφαλμάτων τους. Η σύνδεση των οργάνων σε κάρτα ψηφιοαναλογικής μετατροπής (ADC) και η ταυτόχρονη λήψη και επίβλεψη των μετρήσεων με χρήση λογισμικού πρόσκτησης δεδομένων του Ε.Θ.Σ., δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της πειραματικής διαδικασίας από το δωμάτιο ελέγχου της εγκατάστασης.

Με δεδομένα πλέον τα μεγέθη μέτρησης από τους αισθητήρες, αναπτύχθηκε κώδικας σε Fortran για τον υπολογισμό των μεγεθών της ροής. Επίσης, αναπτύχθηκε κώδικας σε VBA για την άμεση παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων υπό

μορφή διαγραμμάτων ακτινικής διανομής των μεγεθών της ροής και των συνολικών επιδόσεων του κάθε ρότορα αλλά και όλου του συμπιεστή.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η διεξαγωγή των εξής μετρήσεων : 1^{ον}) Δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί χρήσης ή μη αγωγού εισόδου (bellmouth), εξομαλυντή ροής (honeycomb) και φίλτρου. Επελέγη η χρήση honeycomb στη μεγάλη διάμετρο του bellmouth, καθώς έδωσε τα πιο ομοιόμορφα προφίλ ταχύτητας, γωνίας και πίεσης. 2^{ον}) Διεξήχθη μια πρώτη παραμετρική μελέτη του C-R με παραμέτρους το λόγο στροφών των πτερωτών και τις γωνίες κλίσης (stagger) των πτερυγίων τους. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης έδειξαν αύξηση του περιθωρίου λειτουργίας σε υψηλούς λόγους πίεσης με μείωση των γωνιών κλίσης των πτερυγίων. Παράλληλα, με την αύξηση των στροφών των πτερωτών παρατηρήθηκε μετατόπιση των χαρακτηριστικών του 1^{ον} και 2^{ον} ρότορα και όλου του συμπιεστή προς μεγαλύτερες παροχές και λόγους πίεσης. Επίσης, η χαρακτηριστική του 1^{ον} ρότορα παραμένει αναλλοίωτη ανεξαρτήτως των στροφών του 2^{ον} για σταθερή γεωμετρία. Αντίθετα, η χαρακτηριστική του 2^{ον} ρότορα εξαρτάται κυρίως από το λόγο στροφών.

“Components design and construction, first operation and measurements on counter rotating blade rows test rig” Christos S. Ampatis

Abstract

In this diploma thesis, the existing contra rotating blade rows test rig (C-R) that had been designed and developed in a previous diploma thesis, is supplemented with additional components, modifications and experimental equipment. After the first operation, the first measurements were accomplished and the capability of successful implementation of experiments is certified. An initial parametric analysis shows the first picture of the flow field and the performance of a contra rotating compressor stage.

Specifically, the bellmouth and the transition duct were designed and constructed using fibreglass. The transition ducts mold construction was achieved through the design and construction of a 2-d.o.f. arm, which is capable to shape foam bodies. The control of electric motors of the rig was achieved through the design and construction of the corresponding remote controls.

The modification of the blades for tip clearance regulation, the inspection of rotors unbalance, the inspection of radial oscillation of blades, the motors belt tension, the alignment of shafts and pulleys, and the calculation of bolts preload assembled on rotating components of the rig, constituted the processes that ensure the smooth and safe operation of the rig, but also these that should be inspected carefully at the monitoring and maintenance of the rig.

The need of knowledge of blades metal angles, but also the future calculation of flow of C-R with a CFD software, led to the digitisation of blades geometry, which succeeded through digitisation of their aerofoils and later through a code which programmed in Fortran.

Afterwards, it has been accomplished the installation of experimental equipment which includes: 1st) pressure transducers that are connected to the duct for static pressures measurement, as well as to 3 and 5-hole probes for radial distribution of pressure and velocity measurements, upstream and downstream each rotor, 2nd) proximity sensors for measurement of rotors RPM, as well as accelerometers for vibration measurements. For all the above sensors, calibration and error analysis was carried out. The connection of sensors in a ADC card and the use of a data acquisition program designed from L.T.T. N.T.U.A., made possible the control of experimental process from the control room.

Additional, a FORTRAN code was developed which calculates the flow quantities using the measurement data. Also, a VBA code was developed for the direct presentation of results of measurements under form of charts of radial distribution of flow quantities, and performance characteristic curves of each rotor and compressor.

Finally, the following measurements were accomplished: 1st) several combinations of use or not of bellmouth, honeycomb and filter were tested. We decided to use honeycomb in the big diameter of bellmouth, because this case provides the most uniform radial distribution of velocity, flow angle and pressure. 2nd) a first parametric analysis of C-R was carried out. The parameters were the blades stagger angles and the RPM of the rotors. The results of parametric analysis showed an increase of compressors operation margin to higher pressure ratios by

reduction of blade stagger angles. A shift to higher pressure ratios and mass flow is determined by increasing rotors speed, both for rotors and the whole compressor. Also, the characteristic curve of 1st rotor remains inalterable, independent of 2nd rotors RPM for constant stagger angles. In contrast, the characteristic curve of 2nd rotor depends mainly on rotors RPM ratio.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Εισαγωγή στις διατάξεις αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.....	1
1.2	Επισκόπηση της προηγούμενης εργασίας πάνω στην παρούσα διάταξη.....	3
1.3	Η Παρούσα εργασία – Σκοπός – Δομή.....	4
2	Παρούσα διάταξη – Προσθήκες και τροποποιήσεις	6
2.1	Υπάρχουσα διάταξη.....	6
2.2	Σχεδιασμός και κατασκευή συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth).	7
2.2.1	Μείωση της ανομοιομορφίας λόγω του συγκλίνοντος αγωγού.	7
2.2.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γενέτειρας του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου.	8
2.2.3	Μορφοποιημένη είσοδος (χείλος εισόδου συγκλίνοντος αγωγού).	11
2.2.4	Σχεδιασμός και κατασκευή του 3Δ συγκλίνοντος αγωγού εισόδου και του καλουπιού του.....	12
2.2.5	Προθάλαμος αγωγού εισόδου – Εξομάλυνση ροής (Honeycomb).....	17
2.3	Σχεδιασμός και κατασκευή χείλους εξόδου του αποκλίνοντος αγωγού εξόδου. 18	
2.3.1	Ακτινική έξοδος ροής – Έλεγχος διακινούμενης παροχής.....	18
2.3.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χείλους εξόδου.....	20
2.3.3	Σχεδιασμός και κατασκευή του 3Δ χείλους εξόδου και του καλουπιού του. .	20
2.3.4	Σχεδιασμός και κατασκευή βραχίονα συγκράτησης τροχού 2 βαθμών ελευθερίας, για διαμόρφωση-κοπή φελιζόλ.....	25
2.4	Διαμόρφωση και τοποθέτηση των πτερυγίων.....	30
2.4.1	Διαμόρφωση πτερυγίων για ρύθμιση ακτινικού διακένου.....	30
2.4.2	Τοποθέτηση πτερυγίων στους δίσκους συγκράτησης.....	32
2.5	Σχεδιασμός και κατασκευή χειριστηρίων ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων διάταξης.....	37
2.5.1	Χειριστήριο ελέγχου AC 3Φ κινητήρα πρώτης πτερωτής.....	37
2.5.2	Χειριστήριο ελέγχου DC κινητήρα δεύτερης πτερωτής.....	38
2.5.3	Χειριστήριο ελέγχου AC 3Φ κινητήρα διάταξης στραγγαλισμού της ροής. .	39
2.6	Τροποποιήσεις, ρυθμίσεις και τελική μορφή διάταξης.....	41

2.6.1	Τροποποιήσεις και διαμορφώσεις επί της διάταξης.....	42
2.6.2	Βασικές ρυθμίσεις και εποπτεία συνιστωσών για ομαλή λειτουργία διάταξης. 42	
2.6.3	Παρουσίαση διάταξης – Επισήμανση συνιστωσών.....	43
3	Μετρητική αλυσίδα – Πειραματικός εξοπλισμός – Διαδικασία μετρήσεων.....	44
3.1	Παρουσίαση μετρητικής εγκατάστασης.....	44
3.1.1	Θέσεις μέτρησης – Όργανα μέτρησης.....	45
3.2	Αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας και πίεσης ρευστού.....	50
3.2.1	Σωλήνας πίεσης τριών οπών (3 hole Probe).....	50
3.2.2	Βαθμονόμηση σωλήνα τριών οπών – Καμπύλες βαθμονόμησης.....	53
3.2.3	Σωλήνας πέντε οπών (5 hole Probe).....	55
3.2.4	Βαθμονόμηση σωλήνα πέντε οπών – Καμπύλες βαθμονόμησης.....	58
3.2.5	Μέτρηση στατικής πίεσης από οπές στο κέλυφος της διάταξης (Walltaps)...	65
3.3	Όργανα μέτρησης πίεσης.....	67
3.3.1	Μεταλλάκτες πίεσης (Pressure Transducers).....	67
3.3.2	Βαθμονόμηση μεταλλακτών – Καμπύλες βαθμονόμησης.....	68
3.4	Μέτρηση συνθηκών περιβάλλοντος.....	75
3.5	Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής πτερωτών.....	76
3.5.1	Αισθητήρες προσέγγισης (Proximity Sensors).....	77
3.5.2	Μετατροπέας συχνότητας σήματος σε τάση (frequency – voltage converter).....	78
3.5.3	Βαθμονόμηση μετατροπέα συχνότητας παλμού σε τάση.....	79
3.6	Μέτρηση θέσης και γωνίας σωλήνων τριών και πέντε οπών.....	82
3.6.1	Μέτρηση θέσης με γραμμικό ποτενσιόμετρο.....	83
3.6.2	Βαθμονόμηση γραμμικού ποτενσιόμετρου.....	84
3.6.3	Μέτρηση θέσης και γωνίας με περιστροφικούς κωδικοποιητές (Rotary encoders).....	85
3.7	Μέτρηση κραδασμών.....	88
3.8	Μέτρηση ισχύος κινητήρα 1^{ης} Πτερωτής.....	91
3.9	Αναλογοψηφιακός μετατροπέας (Analog to digital converter – ADC).....	92
3.10	Πρόσκτηση δεδομένων από μετρήσεις (Data Acquisition).....	93
3.10.1	Περιβάλλον – Λογισμικό λήψης δεδομένων μετρήσεων.....	95

3.10.2	Τρόπος εκτέλεσης μετρήσεων.	99
4	Μετρήσεις και υπολογισμός επιδόσεων της διάταξης.	101
4.1	Μετρούμενα μεγέθη – θέσεις μέτρησης.	101
4.2	Σύμβαση προσήμανσης γωνιών ροής και γωνιών Probes.	102
4.3	Αναγωγή των αποτελεσμάτων.	109
4.3.1	Υπολογισμός τοπικών μεγεθών.	109
4.3.2	Υπολογισμός ολικών επιδόσεων.	119
4.3.3	Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας συμπίεστή.	122
4.3.4	Χαρακτηριστικές καμπύλες πτερύγωσης βαθμίδας συμπίεστή.	125
4.3.5	Ανάπτυξη κώδικα υπολογισμού μεγεθών (CRCALC).	126
4.3.6	Ανάπτυξη κώδικα παρουσίασης των αποτελεσμάτων (CRCHART).	126
4.4	Διεξαγωγή των μετρήσεων.	128
4.4.1	Εξομάλυνση ροής εισόδου 1 ^{ης} πτερωτής.	130
4.4.2	Παραμετρική μελέτη συμπίεστή.	131
4.5	Αποτελέσματα μετρήσεων - Σχολιασμός.	135
4.5.1	Αποτελέσματα εξομάλυνσης ροής εισόδου 1 ^{ης} πτερωτής.	135
4.5.2	Χαρτογράφηση του πεδίου ροής σε σ.α.λ. 1200-1200 και γ : 43-53.	143
4.5.3	Επίδραση γωνιών stagger γ , $N_1=N_2=1200\text{rpm}$	184
4.5.4	Επίδραση λόγου στροφών $R_U = N_2/N_1$ για $N_1=1200\text{rpm}$	199
4.5.5	Επίδραση λόγου στροφών $R_U = N_2/N_1$ για $N_2=1200\text{rpm}$	212
4.5.6	Επίδραση στροφών για λόγο στροφών $R_U = N_2/N_1 = 1.5$	223
4.5.7	Σύγκριση ολικών μεγεθών με μεγέθη στη μέση ακτίνα R_m	232
4.5.8	Συγκρίσεις με αποτελέσματα κώδικα BLADE.	235
4.5.9	Συνολικά συμπεράσματα επάνω στην παραμετρική μελέτη.	236
5	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις.	238
5.1	Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα.	238
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις στην παρούσα εγκατάσταση.	241
6	Βιβλιογραφία.	243
Π1	Συναρμολόγηση – Εποπτεία – Συντήρηση κινούμενων εξαρτημάτων της διάταξης.	247

Π1.1	Ευθυγράμμιση αξόνων κίνησης πρώτης πτερωτής	247
Π1.2	Ευθυγράμμιση τροχαλιών – Τάνυση μιάτων κίνησης.....	258
Π1.3	Ροπή προέντασης βασικών κοχλιοσυνδέσεων.....	265
Π1.4	Έλεγχος αζυγοσταθμίας πτερωτών και ακτινικής ταλάντωσης πτερυγίων. 287	
Π1.4.1	Έλεγχος αζυγοσταθμίας πτερωτών.....	287
Π1.4.2	Έλεγχος ακτινικής ταλάντωσης πτερυγίων.....	288
Π2	Ψηφιοποίηση γεωμετρίας πτερυγίων.....	295
Π2.1	Ανάγκη για ψηφιοποίηση γεωμετρίας πτερυγίων.....	295
Π2.2	Επιλογή τρόπου ψηφιοποίησης των πτερυγίων.....	295
Π2.3	Ψηφιοποίηση των αεροτομών.....	296
Π2.3.1	Μέθοδος ψηφιοποίησης.....	296
Π2.3.2	Σφάλμα από την ψηφιοποίηση.....	298
Π2.3.3	Διερεύνηση της διανομής πάχους των αεροτομών.....	299
Π2.3.4	Διερεύνηση της μέσης γραμμής κυρτότητας των αεροτομών.....	301
Π2.3.5	Υπολογισμός της καθ' ύψος διανομής των γωνιών μετάλλου των πτερυγίων. 303	
Π2.4	Ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα.....	307
Π2.4.1	Προσθήκη επιπλέον σημείων στις ψηφιοποιημένες αεροτομές.....	307
Π2.4.2	Δημιουργία επιπλέον αεροτομών (3Δ πτερύγιο).....	309
Π2.4.3	Διάγραμμα ροής υπολογιστικού κώδικα CR3DBlade.....	311
Π2.4.4	Εκτελέσεις κώδικα – Αποτελέσματα.....	312
Π2.5	Προτάσεις για βελτίωση μεθόδου αποτύπωσης γεωμετρίας πτερυγίων.....	317
Π3	Προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων μετρήσεων και παρουσίασης αποτελεσμάτων	318
Π3.1	Πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων μετρήσεων CRCALC.....	318
Π3.1.1	Αρχεία εισόδου – εξόδου.....	318
Π3.1.2	Διάγραμμα ροής CRCALC.....	319
Π3.2	Πρόγραμμα παρουσίασης αποτελεσμάτων μετρήσεων CRCHART.....	324
Π3.2.1	Δεδομένα εισόδου CRCHART.....	324
Π3.2.2	Διάγραμμα ροής CRCHART.....	324

Π4	Διαδικασία κατασκευής πολυεστερικών αντικειμένων διάταξης ..	326
Π4.1	Γενικά στοιχεία κατασκευής πολυεστερικών αντικειμένων.....	326
Π4.2	Κατασκευή συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth).....	330
Π4.3	Κατασκευή χείλους εξόδου αποκλίνοντος αγωγού εξόδου.	336
Π5	Τεχνικά χαρακτηριστικά μετρητικών οργάνων – μηχανολογικού – ηλεκτρονικού εξοπλισμού.....	339
Π6	Μηχανολογικά – Ηλεκτρολογικά Σχέδια συνιστωσών της διάταξης	364
Π6.1	Τροποποιημένο πτερύγιο J-79 και θέσεις ψηφιοποίησης αεροτομών.....	365
Π6.2	Αναβαθμισμένη διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.....	366
Π6.3	Διάταξη στραγγαλισμού παροχής.....	368
Π6.4	Αποστάτης διάταξης στραγγαλισμού παροχής.....	369
Π6.5	Συγκλίνων αγωγός εισόδου (Bellmouth).	370
Π6.6	Καλούπι συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth Mold).....	372
Π6.7	Χείλος εξόδου διαχύτη (Transition).	373
Π6.8	Καλούπι χείλους εξόδου διαχύτη (Transition Mold).	375
Π6.9	Βραχίονας τροχού κοπής φελιζόλ.	377
Π6.10	Χειριστήριο ελέγχου AC 3Φ Κινητήρα 1^{ης} πτερωτής.....	387
Π6.11	Χειριστήριο ελέγχου AC 3Φ Κινητήρα διάταξης στραγγαλισμού παροχής.	388

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο αυτό κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στις διατάξεις αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών και στη συνέχεια μια επισκόπηση της προηγούμενης διπλωματικής εργασίας πάνω στη παρούσα διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών του Ε.Θ.Σ.. Τέλος, θα αναλυθεί ο σκοπός και η δομή της παρούσας εργασίας.

1.1 Εισαγωγή στις διατάξεις αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

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 :

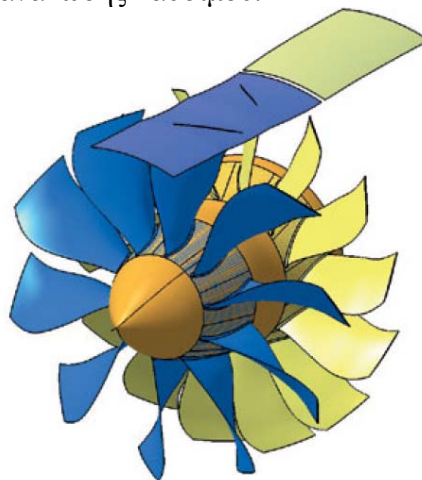
- Η αλληλουχία R-R αυξάνει την παραγόμενη αύξηση πίεσης ανά μονάδα μήκους του συμπίεστή για σταθερή μετωπική επιφάνεια. Ο λόγος είναι ότι ο στάτορας αποτελεί ένα άεργο τμήμα της μηχανής το οποίο αφαιρεί τη συστροφή της ροής που δημιουργεί ο ρότορας, επιβραδύνοντας έτσι τη ροή και άρα ανακτώντας τη στατική πίεση στην έξοδο της βαθμίδας. Εάν αντί για στάτορα έχουμε ένα 2^ο ρότορα με αντίθετη φορά περιστροφής από τον 1^ο, τότε ο 2^{ος} 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 1^{ον}) απαιτεί περιστρεφόμενο εξωτερικό κέλυφος σε περίπτωση πολλαπλών βαθμίδων C-R, και 2^{ον}) 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 2^{ος} ρότορας "βλέπει" της γωνίες εξόδου ροής του 1^{ου} ρότορα, οι οποίες μεταβάλλονται συναρτήσει των στροφών των περωτών 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. Μια ιδέα τέτοιας εφαρμογής φαίνεται στο Σχήμα 1.1. 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 ακροπτερύγιο, ενώ παράλληλα μπορεί να αυξηθεί ο λόγος παράκαμψης με αποτέλεσμα την μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.



Σχήμα 1.1: Διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων ανεμιστήρων σε κινητήρα turbofan.

1.2 Επισκόπηση της προηγούμενης εργασίας πάνω στην παρούσα 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^[20].

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 2^{ου} ρότορα, με αποτέλεσμα μια πρώτη εκτίμηση για τις γωνίες κλίσης (stagger) που πρέπει να έχουν τα πτερούγια 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 3^{ης} 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.

1.3 Η Παρούσα εργασία – Σκοπός – Δομή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ξεκίνησε την περίοδο που η διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών του Ε.Θ.Σ. βρισκόταν στο αρχικό στάδιο συναρμολόγησής της.

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι : 1^ο) ο σχεδιασμός και κατασκευή επιμέρους συνιστωσών της διάταξης, 2^ο) η τροποποίηση και ρύθμιση ορισμένων περιστρεφόμενων συνιστωσών που καθορίζουν την ομαλή λειτουργία, 3^ο) η επιλογή των απαραίτητων αισθητηρίων και οργάνων μέτρησης και η εγκατάστασή τους επάνω στη διάταξη, 4^ο) οι μετρήσεις επάνω στη διάταξη για την πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας της πειραματικής διάταξης, καθώς και για μια πρώτη παραμετρική μελέτη.

Το παρόν **κεφάλαιο 1** αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας.

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η διάταξη την περίοδο που ξεκίνησε η εργασία αυτή, ο σχεδιασμός και η κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών που προστέθηκαν, καθώς και οι τροποποιήσεις και ρυθμίσεις που έγιναν ώστε να φτάσει η διάταξη στη τελική της μορφή με εξασφαλισμένη την ομαλή και ασφαλή λειτουργία της.

Στο **κεφάλαιο 3** γίνεται η περιγραφή της μετρητικής αλυσίδας που εγκαταστήσαμε στη διάταξη και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τύποι και τα χαρακτηριστικά των οργάνων, ο τρόπος χειρισμού τους, η διαδικασία και οι καμπύλες βαθμονόμησής τους, οι θέσεις που τοποθετούνται και τα μεγέθη που μετράμε με αυτές. Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος που τα όργανα συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν τη μετρητική αλυσίδα που χρησιμοποιούμε, και τέλος περιγράφονται τα βασικά στοιχεία εκτέλεσης μιας μέτρησης.

Στο **κεφάλαιο 4** αναφέρονται αρχικά τα μεγέθη που μετράμε και ο ορισμός των πρόσημων των μεγεθών που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται οι εξισώσεις και η χρήση τους μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων που δημιουργήθηκαν, ώστε να προκύψουν τα μεγέθη αυτά. Έπειτα, αναλύεται ο τρόπος και το είδος των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός τους, καθώς και τις συγκρίσεις τους με το υπολογιστικό μοντέλο ροής (Κώδικας BLADE).

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής, καθώς και κάποιες προτάσεις που ενισχύουν τη μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα επάνω στη διάταξη.

Στο **παράρτημα III** δίνονται οδηγίες για τη συναρμολόγηση, εοπτεία και συντήρηση των βασικών περιστρεφόμενων συνιστωσών της διάταξης, που είναι η ευθυγράμμιση των ατράκτων κίνησης των πτερωτών, η τάνυση ιμάντων κίνησης των ατράκτων, ο υπολογισμός της ροπής προέντασης των κοχλιοσυνδέσεων και ο έλεγχος αζυγοσταθμίας των πτερωτών και ακτινικής ταλάντωσης των πτερυγίων.

Στο **παράρτημα Π2** αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των πτερυγίων της διάταξης. Προγραμματίζεται υπολογιστικός κώδικας που εξάγει τη γεωμετρία κάθε αεροτομής καθ' ύψος των πτερυγίων συνθέτοντας έτσι το 3Δ πτερύγιο. Γίνονται συγκρίσεις των υπολογισμών με τις ψηφιοποιήσεις και με τυποποιημένες αεροτομές, και καθορίζονται τα περιθώρια και ο τρόπος βελτίωσης της ψηφιοποίησης.

Στο **παράρτημα Π3** παρουσιάζονται τα αρχεία εισόδου – εξόδου, καθώς και τα διαγράμματα ροής των προγραμμάτων που δημιουργήθηκαν 1^{ov}) για τον υπολογισμό των μεγεθών της ροής από τα δεδομένα των μετρήσεων, και 2^{ov}) για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων υπό μορφή διαγραμμάτων.

Στο **παράρτημα Π4** παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής των πολυεστερικών συνιστωσών που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν για τη διάταξη, καθώς και κάποιες οδηγίες εμπειρικών τεχνικών για την κατασκευή πολυεστερικών αντικειμένων.

Στο **παράρτημα Π5** παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μηχανολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση.

Στο **παράρτημα Π6** παρουσιάζονται τα μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά σχέδια της διάταξης και των συνιστωσών που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν.

2

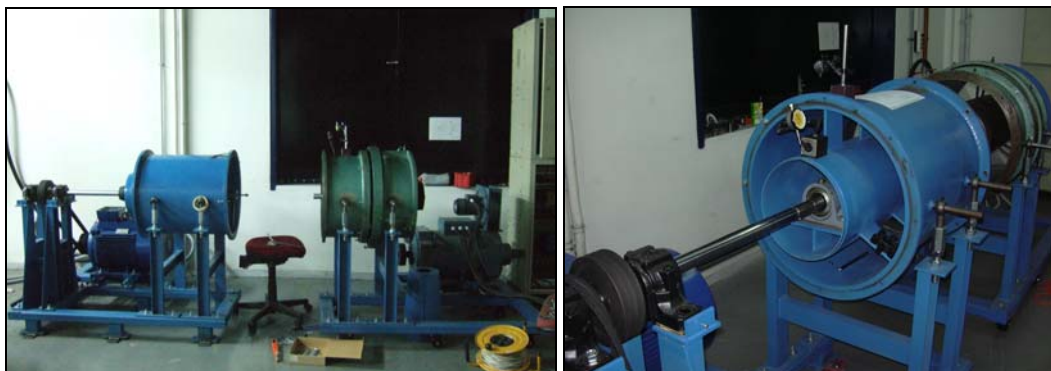
Παρούσα διάταξη – Προσθήκες και τροποποιήσεις.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιασθεί η μορφή της διάταξης την περίοδο που ξεκίνησε η εργασία αυτή. Στη συνέχεια, θα παρουσιασθούν και θα αναλυθούν οι συνιστώσες που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν, καθώς και οι τροποποιήσεις που έγιναν, ώστε να φτάσει η εγκατάσταση στην τωρινή της μορφή.

2.1 Υπάρχουσα διάταξη.

Την περίοδο που ξεκίνησε η διπλωματική αυτή εργασία, η διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων περωτών (C-R) ήταν στο στάδιο συναρμολόγησής της σύμφωνα με τα σχέδια της προηγούμενης διπλωματικής εργασίας^[20] που αφορούσε στο σχεδιασμό της. Είχε δε, τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Διακρίνουμε στις φωτογραφίες το (μπλε) κέλυφος και τον ηλεκτρικό κινητήρα (Η/Κ) της 1^{ης} περωτής στα αριστερά, καθώς και το (πράσινο) κέλυφος και τον Η/Κ της 2^{ης} περωτής στα δεξιά. Αναμενόταν η παραλαβή του αγωγού εξόδου (διαχύτη) και η κατασκευή της διάταξης στραγγαλισμού παροχής.

Οι υπόλοιπες συνιστώσες που συμπληρώνουν τη διάταξη, προστέθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Οι συνιστώσες αυτές είναι ο αγωγός εισόδου, το χείλος εξόδου του αγωγού εξόδου (διαχύτη), η διάταξη στραγγαλισμού παροχής και τα χειριστήρια ελέγχου των ηλεκτροκινητήρων της διάταξης. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των συνιστωσών αυτών αναλύονται στις επόμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 2.1: Υπάρχουσα διάταξη.

2.2 Σχεδιασμός και κατασκευή συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth).

Επειδή ο συμπίεστης αναρροφά αέρα από έναν ανοικτό αγωγό, οι ανομοιομορφίες της εισερχόμενης ροής είναι σημαντικές, όπως επίσης και το επίπεδο τύρβης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διάφορες αστάθειες στις μετρήσεις. Έτσι λοιπόν, κρίνεται απαραίτητη η βελτίωση της ροής εισόδου στον συμπίεστη.

Η βελτίωση – εξομαλυνση της ροής εισόδου επιτυγχάνεται μέσω ενός συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth) και του εξομαλυντή ροής (Honeycomb) ο οποίος μειώνει τους εισερχόμενους στροβιλισμούς και τοποθετείται στη μεγάλη διατομή ενός συγκλίνοντος αγωγού εισόδου.

2.2.1 Μείωση της ανομοιομορφίας λόγω του συγκλίνοντος αγωγού.

Ο συγκλίνων αγωγός εισόδου επιτελεί τους εξής σκοπούς :

1. Την ομαλή επιτάχυνση της χαμηλής ταχύτητας του αέρα εισόδου, στην ταχύτητα που απαιτείται στο τμήμα δοκιμών.
2. Τη μείωση της ανομοιομορφίας της ταχύτητας εισόδου, που επιτυγχάνεται μέσω της σταδιακής μείωσης της διατομής του αγωγού.

Αν θεωρήσουμε με δείκτη 2 τη διατομή εισόδου του αγωγού με διάμετρο D_2 και με δείκτη 1 τη διατομή στο τμήμα ελάχιστης διαμέτρου D_1 του αγωγού εισόδου, και υποθέσουμε ότι ισχύει ο νόμος του Bernoulli τόσο για τις μέσες ταχύτητες V_1 , V_2 (ομοιόμορφες κατανομές), όσο και για τις ανομοιόμορφες κατανομές V_1' , V_2' , τότε έχουμε :

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (2.1)$$

$$P_1 + \frac{\rho V_1'^2}{2} = P_2 + \frac{\rho V_2'^2}{2} \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_1 = \rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 = \dot{m}_2 \Rightarrow K^2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 = \frac{A_2}{A_1} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.3)$$

$$(2.1), (2.2) \Rightarrow \frac{V_2^2 - V_2'^2}{V_2^2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \frac{V_1^2 - V_1'^2}{V_1^2} \quad (2.4)$$

$$(2.3), (2.4) \Rightarrow \frac{V_1^2 - V_1'^2}{V_1^2} = \frac{1}{K^4} \frac{V_2^2 - V_2'^2}{V_2^2} \quad (2.5)$$

όπου A_1, A_2 είναι το εμβαδόν του αγωγού εισόδου στις διατομές 1 και 2 αντίστοιχα.

Από τη σχέση (2.5) παρατηρούμε ότι η σχετική ανομοιομορφία μειώνεται σημαντικά αυξανόμενης της στένωσης, δηλαδή αυξανόμενου του λόγου διατομής εισόδου προς διατομή εξόδου^{[27],[4]}.

Είναι προφανές ότι ο λόγος K δεν μπορεί να αυξηθεί απεριόριστα λόγω των γεωμετρικών – κατασκευαστικών περιορισμών μιας διάταξης. Το ίδιο ισχύει και για τη δεύτερη παράμετρο που καθορίζει τον αγωγό εισόδου και η οποία είναι το μήκος του αγωγού L .

Να σημειώσουμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος L του αγωγού, τόσο περισσότερο χρόνο έχει η ροή να αποκατασταθεί πλήρως στην είσοδο του συμπιεστή.

2.2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γενέτειρας του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου.

Όπως αναλύσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, για τον επιτυχή σχεδιασμό του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth) πρέπει να έχουμε μεγάλο λόγο διατομής εισόδου προς διατομή εξόδου (συντελεστής K) και μεγάλο μήκος αγωγού L . Βέβαια, η σχέση του μήκους L με την διάμετρο εισόδου D_2 πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κάποια όρια, διότι εάν για παράδειγμα έχουμε υψηλό K και μεγάλη διάμετρο εισόδου D_2 σε σχέση με το μήκος του αγωγού L , τότε η σύγκλιση της διατομής θα είναι πολύ απότομη με κίνδυνο την αποκόλληση της ροής.

Η σύνδεση των κυρίων διαστάσεων του αγωγού εισόδου γίνεται μέσω του συντελεστή K και του συντελεστή f ως εξής :

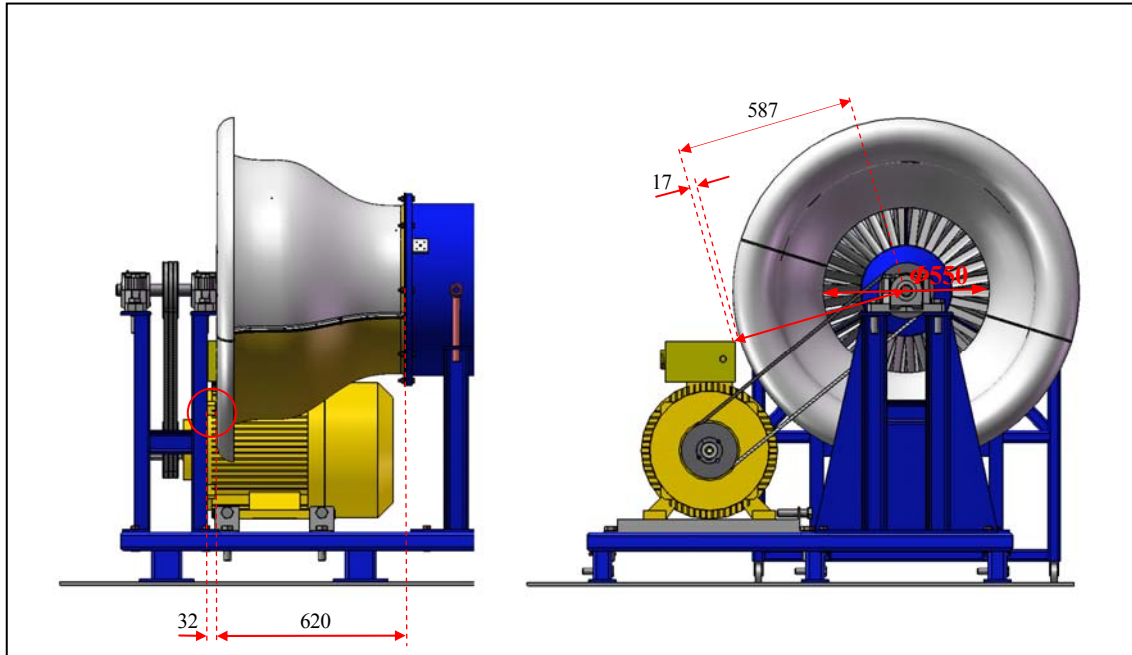
$$K = \frac{D_2}{D_1}, f = \frac{L}{D_2}$$

Τυπικές τιμές των συντελεστών αυτών είναι : $K=1.5\div 2$ και $f=0.7\div 1$.

Στη διάταξή μας, οι συντελεστές αυτοί θα καθοριστούν από τους γεωμετρικούς περιορισμούς που θέτει η μορφή της διάταξης, και οι οποίοι είναι η μέγιστη δυνατή διάμετρος αγωγού εισόδου και το μέγιστο μήκος του. Στο Σχήμα 2.2 παρακάτω παρουσιάζεται το σχέδιο CAD με εγκατεστημένο το Bellmouth ώστε να διακρίνουμε τους γεωμετρικούς περιορισμούς της διάταξης.

Το μέγιστο μήκος που μπορεί να έχει ο αγωγός, καθορίζεται από την απόσταση της φλάντζας στην είσοδο του (μπλε) κελύφους του 1^{ου} ρότορα από την έδραση της ατράκτου του 1^{ου} ρότορα. Η απόσταση αυτή είναι 652mm. Επιλέξαμε να αφήσουμε ένα αξονικό διάκενο 32mm μεταξύ bellmouth και έδρασης ώστε να επιτρέπουμε την άνετη αναρρόφηση του αέρα από το κάτω μέρος του αγωγού. Έτσι, το συνολικό μήκος του Bellmouth ανέρχεται στα $L_{\max}=620\text{mm}$.

Η μέγιστη διάμετρος του αγωγού καθορίζεται από την απόσταση της ατράκτου του 1^{ου} ρότορα από το κουτί ηλεκτρονικών του AC Η/Κ του 1^{ου} ρότορα. Η απόσταση αυτή είναι 587mm. Επιλέξαμε να αφήσουμε ένα ακτινικό διάκενο 17mm ώστε να έχουμε περιθώριο για λύσιμο των ιμάντων κίνησης, αλλά και ικανή απόσταση ώστε να μην έχουμε επαφή λόγω των κραδασμών. Έτσι, η μέγιστη διάμετρος του αγωγού εισόδου ανέρχεται στα $D_{\max}=570\text{mm}$.



Σχήμα 2.2: Γεωμετρικοί περιορισμοί συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι η μέγιστη διάμετρος D_{\max} του bellmouth δεν είναι ίση με την D_2 που αναφέραμε πριν. Το ίδιο ισχύει και για το μήκος L και L_{\max} . Οι διαφορές των μεγεθών αυτών οφείλονται στο ότι ο αγωγός εισόδου αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι η μορφοποιημένη είσοδος (χειλός εισόδου) του Bellmouth και το δεύτερο (κυρίως) τμήμα είναι ο υπόλοιπος αγωγός μήκους L ο οποίος ξεκινά από διάμετρο D_2 και καταλήγει μέσω σύγκλισης στην διάμετρο D_1 η οποία είναι και η διάμετρος του καναλιού ροής. Η γεωμετρία της μορφοποιημένης εισόδου αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Η γεωμετρία του κυρίως τμήματος του αγωγού εισόδου οφείλει να υπακούει σε έναν αεροδυναμικό σχεδιασμό ο οποίος θα προσδίδει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στη ροή τα οποία θα καθορίσουν τη ροή εισόδου στον συμπιεστή. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η διατήρηση μικρών επιβραδύνσεων της ταχύτητας στο τοίχωμά του, ομοιόμορφη αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος ώστε να αποφευχθεί η αποκόλληση, και τέλος ένα ομοιόμορφο προφίλ των πιέσεων και της ταχύτητας στην έξοδο του αγωγού.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες καμπύλες για τη γεωμετρία του κυρίως τμήματος του αγωγού εισόδου. Στη διάταξή μας όμως χρησιμοποιήσαμε τη καμπύλη της σχέσης (2.6) η οποία βάση προηγούμενης διπλωματικής εργασίας^[21] τηρεί τις παραπάνω

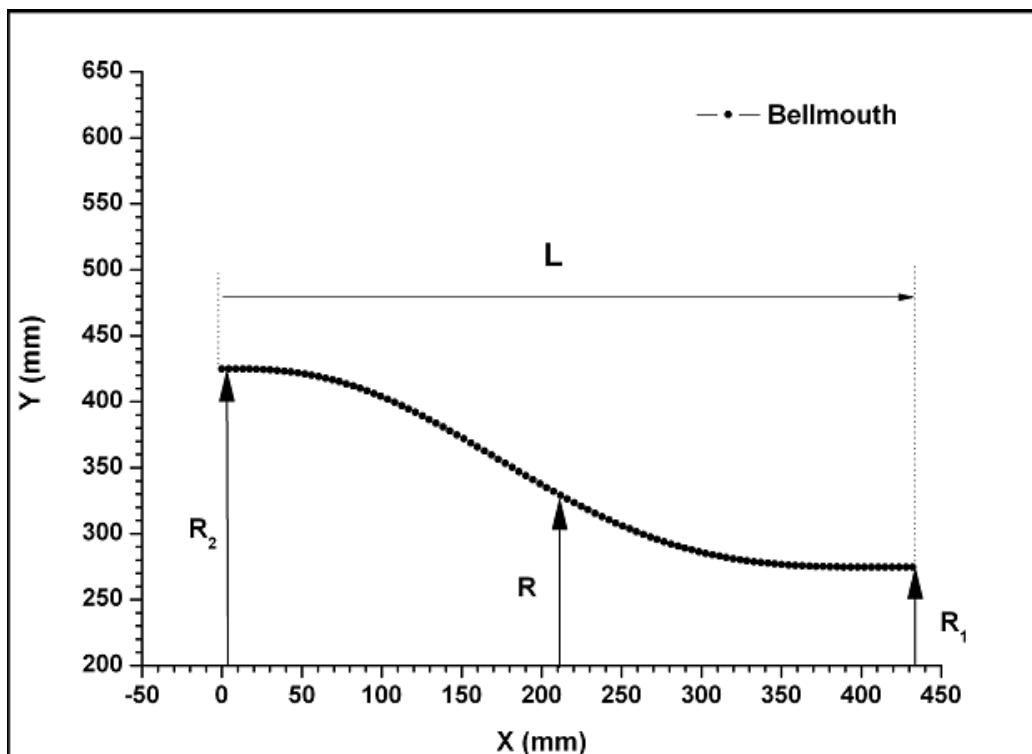
απαιτήσεις για την ποιότητα της ροής. Μάλιστα, η καμπύλη αυτή χρησιμοποιείται ήδη σε αγωγό εισόδου διάταξης συμπίεστη στο Ε.Θ.Σ. του Ε.Μ.Π., και όπως θα φανεί και στο κεφάλαιο 4.5.1 από τις μετρήσεις, προσδίδει και στη διάταξή μας πολύ ικανοποιητική ροή στην είσοδο του συμπίεστη.

$$R(x) = R_1 + (R_2 - R_1) \left(\frac{x}{L} \right)^4 \left[15 - 24 \left(\frac{x}{L} \right) + 10 \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right], \quad x = 0 \div L \quad (2.6)$$

Στη σχέση (2.6) τα R_1 , R_2 είναι οι ακτίνες των διαμέτρων D_1 , D_2 αντίστοιχα, και L είναι το μήκος του κυρίως αγωγού. Έτσι, σε κάθε αξονική θέση x βρίσκουμε την αντίστοιχη ακτίνα $R(x)$.

Οι γεωμετρικοί περιορισμοί καθόρισαν το ολικό μήκος του αγωγού να είναι $L_{\max} = 620 \text{ mm}$ και την ολική διάμετρο $D_{\max} = 570 \text{ mm}$ όπως αναφέραμε παραπάνω. Όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, το μήκος του χείλους εισόδου είναι 187 mm και το ύψος του είναι $\Delta R = 145 \text{ mm}$, άρα το μήκος του κυρίως τμήματος του αγωγού εισόδου προκύπτει $L = 432.3 \text{ mm}$ και η μεγάλη διάμετρος του προκύπτει $D_2 = 425 \text{ mm}$. Η διάμετρος D_1 είναι η διάμετρος του αγωγού του συμπίεστη η οποία είναι $D_1 = 549 \text{ mm}$. Συνεπώς, για τον συντελεστή K έχουμε ότι $K = 1.55$ και για τον f έχουμε $f = 1$.

Παρακάτω στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται με τις πραγματικές διαστάσεις η καμπύλη που προέκυψε βάση της σχέσης (2.6), στην οποία διακρίνουμε τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη της.

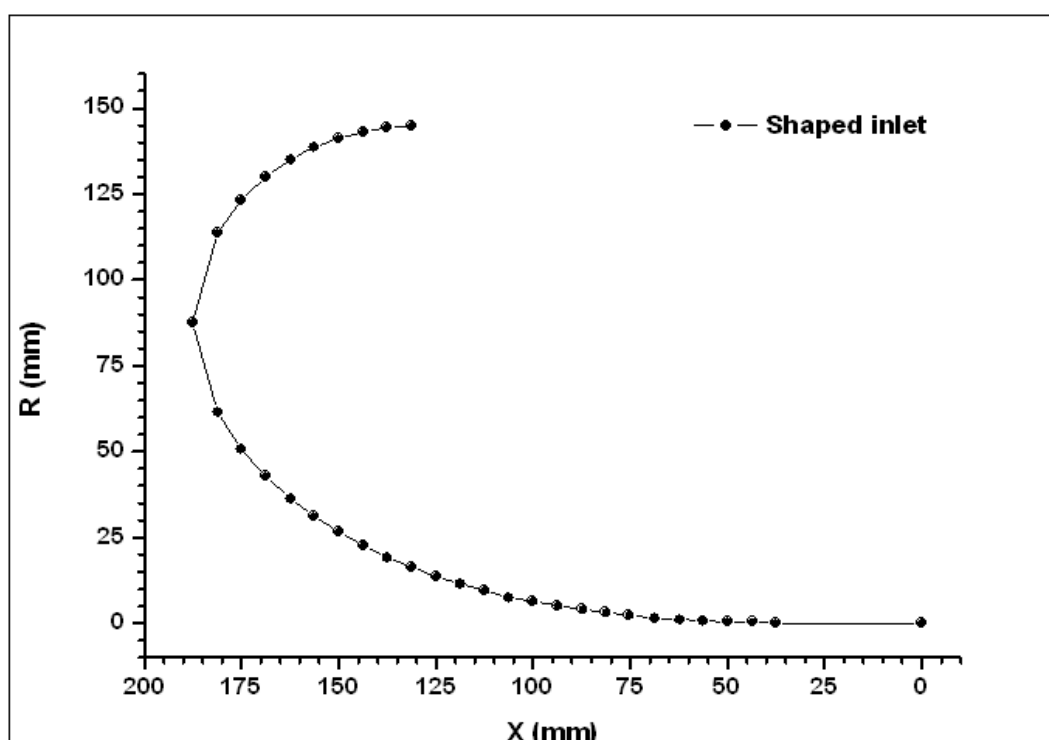


Σχήμα 2.3: Κυρίως τμήμα του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth).

2.2.3 Μορφοποιημένη είσοδος (χείλος εισόδου συγκλίνοντος αγωγού).

Η μορφοποιημένη είσοδος ή αλλιώς το χείλος εισόδου του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου είναι το πρώτο τμήμα του αγωγού εισόδου που συναντά ο αέρας που εισέρχεται στον αγωγό. Μάλιστα, η διαμόρφωση αυτή του αγωγού εξασφαλίζει την αναρρόφηση αέρα χωρίς τη δημιουργία ανομοιομορφίας στην είσοδο. Αν δεν υπήρχε, τότε ο αγωγός εισόδου δεν θα είχε στρογγυλεμένο χείλος αλλά ακμές, με αποτέλεσμα να αποκολλάται η ροή για ένα μεγάλο τμήμα του καναλιού ροής κοντά στο tip στην είσοδο του αγωγού, κι αυτό επειδή η αναρρόφηση του αέρα δεν γίνεται μόνο αξονικά, αλλά και εγκάρσια. Έτσι, το αποτέλεσμα θα ήταν αυξημένες απώλειες και ανομοιομορφία στην είσοδο του συμπιεστή.

Η γεωμετρία της μορφοποιημένης εισόδου που χρησιμοποιήσαμε για τον αγωγό εισόδου της διάταξής μας φαίνεται στις πραγματικές διαστάσεις στο Σχήμα 2.4.. Η καμπύλη αυτή προτείνεται από τη βιβλιογραφία^{[12],[21]} και χρησιμοποιείται ήδη σε αγωγό εισόδου διάταξης συμπιεστή στο Ε.Θ.Σ. του Ε.Μ.Π.. Η καμπύλη αυτή δεν προκύπτει από κάποια συνάρτηση αλλά από συντεταγμένες σημείων οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1).



Σχήμα 2.4: Μορφοποιημένη είσοδος αγωγού εισόδου (χείλος εισόδου).

Στο Σχήμα 2.4 το σημείο με συντεταγμένες (0,0) είναι το σημείο που συνδέεται με το κυρίως τμήμα του αγωγού εισόδου όπου έχουμε τη διάμετρο D_2 .

X(mm)	R(mm)	X(mm)	R(mm)	X(mm)	R(mm)	X(mm)	R(mm)	X(mm)	R(mm)
0	0	75.2	2.4	118.8	11.6	162.4	36.4	168.8	130
37.6	0	81.2	3.2	124.8	13.6	168.8	42.8	162.4	135.2
43.6	0.4	87.2	4	131.2	16.4	175.2	50.8	156.4	138.8
50	0.4	93.6	5.2	137.6	19.2	181.2	61.6	150	141.2
56.4	0.8	100	6.4	143.6	22.8	187.6	87.6	143.6	143.2
62.4	1.2	106.4	7.6	150	26.8	181.2	113.6	137.6	144.4
68.8	1.6	112.4	9.6	156.4	31.2	175.2	123.2	131.2	144.8

Πίνακας 2.1: Συντεταγμένες μορφοποιημένης εισόδου (χειλούς εισόδου).

2.2.4 Σχεδιασμός και κατασκευή του 3Δ συγκλίνοντος αγωγού εισόδου και του καλουπιού του.

Για τον σχεδιασμό του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth) θέσαμε τους παρακάτω στόχους :

1. Επιλογή τέτοιου υλικού που να προσδίδει υψηλή αντοχή και παράλληλα χαμηλό βάρος, και επιπροσθέτως να είναι εύκολα διαμορφώσιμο και κατεργάσιμο.
2. Καλή ακρίβεια της κατεργασίας ώστε οι αποκλίσεις των διαστάσεων του σχεδίου από τις πραγματικές να είναι μέσα σε αποδεκτά όρια.
3. Ο σχεδιασμός του να ναι τέτοιος ώστε να μπορεί 1^{ov}) να συναρμολογείται εύκολα επάνω στην υπόλοιπη διάταξη, 2^{ov}) να παρουσιάζει πρακτικά ικανοποιητική δυσκαμψία και ταυτόχρονα μειωμένο βάρος, 3^{ov}) να εξασφαλίζει όσο το δυνατόν χαμηλό συνολικό κόστος κατασκευής.

Οι λύσεις που επιλέξαμε ώστε να επιτύχουμε τους παραπάνω στόχους είναι εξής :

1. Το υλικό του να είναι σύνθετο αποτελούμενο από επάλληλες στρώσεις πολυεστέρα (ρητίνη) και ίνες γυαλιού (υαλοπίλημα ή υαλούφασμα). Ως γνωστόν από τη θεωρία των υλικών, τα σύνθετα υλικά προσδίδουν στην κατασκευή υψηλή αντοχή και ελαστικότητα ενώ το βάρος παραμένει χαμηλό. Μάλιστα, το υλικό αυτό εΐθισται να χρησιμοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις. Βέβαια, η κατασκευή του αγωγού από αυτό το υλικό προϋποθέτει την ύπαρξη του αντίστοιχου καλουπιού το οποίο πρέπει επίσης να σχεδιαστεί και κατασκευαστεί. Η αντιγραφή όμως του καλουπιού είναι μια απλή διαδικασία που μπορεί να γίνει μέσα στο εργαστήριο.
2. Λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας του αγωγού (πολλές αλλαγές στην καμπυλότητα), η κατεργασία κατασκευής του καλουπιού του αγωγού πρέπει να γίνει από CNC ώστε να επιτύχουμε καλή ακρίβεια. Έτσι, έπειτα από έρευνα αγοράς επιλέξαμε την ανάθεση της κατασκευής του καλουπιού στην εταιρεία

Costas Chronis S.A.^[36] η οποία διαθέτει μηχανήμα CNC 5-αξόνων για την κατασκευή καλουπιών για αντικείμενα από σύνθετα υλικά. Η ακρίβεια του CNC αυτού είναι $\pm 0.2\text{mm}$ η οποία είναι πολύ ικανοποιητική για την εφαρμογή μας.

3. Η λύση που επιτυγχάνει ταυτόχρονα και τους τρεις στόχους του σχεδιασμού του αγωγού είναι : Ο αγωγός να αποτελείται από δύο ολόδια τμήματα (μισός αγωγός) που θα ενώνονται μεταξύ τους με φλάντζες σχηματίζοντας έτσι ολόκληρο τον αγωγό. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνουμε 1^{ov}) την εύκολη συναρμολόγηση του bellmouth επάνω στη διάταξη αφού δεν θα χρειάζεται να αφαιρούμε την άτρακτο του 1^{ov} ρότορα, επειδή θα συνδέουμε πάνω στη διάταξη πρώτα το ένα μισό του bellmouth και ύστερα το άλλο μισό, 2^{ov}) οι φλάντζες για την ένωση των δύο κομματιών του αγωγού λειτουργούν ως νεύρα αυξάνοντας έτσι τη δυσκαμψία του αγωγού επιτρέποντάς μας να χρησιμοποιήσουμε λιγότερες στρώσεις πολυεστέρα-ινών γυαλιού, 3^{ov}) ελαττώνουμε σχεδόν στο μισό το κόστος κατασκευής του καλουπιού, αφού πλέον χρειαζόμαστε ένα καλούπι για τον μισό αγωγό εισόδου, από το οποίο θα παραχθούν δύο αντίτυπα τα οποία αποτελούν τα δύο μισά του αγωγού.

Έτσι λοιπόν, το βάρος δίνεται ουσιαστικά στο **σχεδιασμό του καλουπιού**, ο οποίος πρέπει να πετυχαίνει τους παρακάτω στόχους :

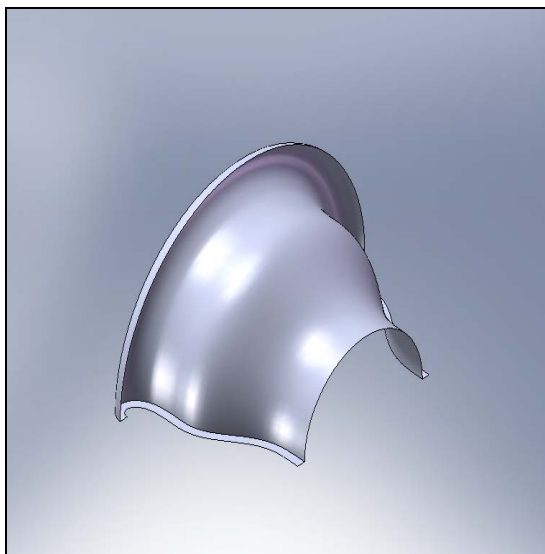
1. Η γεωμετρία του καλουπιού να μην έχει πουθενά "αρνητικές κλίσεις" όπως λέμε στη καθομιλουμένη του χώρου, ώστε να μπορεί να αποκολληθεί το αντίτυπο.
2. Το υλικό του καλουπιού να είναι αρκετά σκληρό ώστε να αντέξει τουλάχιστον δύο αποτυπώσεις αυτού, εφ' όσον χρειαζόμαστε δύο αντίτυπα.

Ο 1^{ος} στόχος επιτυγχάνεται από την ίδια τη γεωμετρία της γενέτειρας του αγωγού εισόδου, η οποία είναι τέτοια ώστε $R(x_i) \leq R(x_{i+1})$ όπου $i=1,2,\dots,N$ και N ο αριθμός των σημείων της γενέτειρας ξεκινώντας από το σημείο $i=1$ στο οποίο αντιστοιχεί η R_1 . Έτσι, δεν υπάρχει πουθενά αρνητική κλίση ως προς τη φορά ξεκαλουπώματος η οποία έχει τη φορά του διανύσματος της ταχύτητας εισόδου. Βέβαια, ο αγωγός εισόδου χρειάζεται να έχει φλάντζα στη θέση που συνδέεται με τον υπόλοιπο συμπίεστη. Η διαμόρφωση της φλάντζας αυτής στο καλούπι είναι μη αποδεκτή λύση καθώς με αυτόν τον τρόπο έχουμε αρνητική κλίση σε όλη τη φλάντζα, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ξεκαλουπωθεί το αντίτυπο από το καλούπι. Έτσι, η λύση είναι να αποτελείται το καλούπι από μια πρόσθετη ξύλινη φλάντζα η οποία θα βιδώνεται στο καλούπι, έπειτα θα γίνεται η αντιγραφή του καλουπιού μαζί με τη φλάντζα, στη συνέχεια θα αφαιρείται η φλάντζα και τέλος θα ξεκαλουπώνεται το αντίτυπο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει η επιφάνεια του καλουπιού στη διατομή D_1 να είναι πλήρως εγκάρσια με τον άξονα συμμετρίας του αγωγού, αλλά και συμπαγής ώστε να μπορέσουν να δημιουργηθούν σπειρώματα επάνω της για την σφικτή σύνδεση της φλάντζας, αλλά και την εύκολη αποσυναρμολόγησης της.

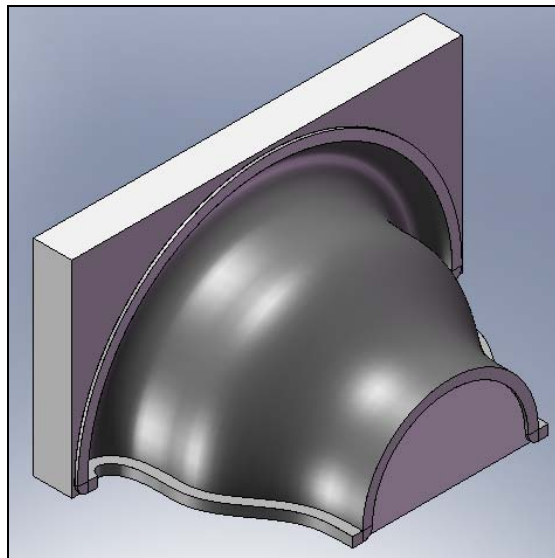
Ο 2^{ος} στόχος επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικού του καλουπιού ικανής αντοχής ώστε να αντέξει σε τουλάχιστον δύο ξεκαλουπώματα. Η εταιρεία που κατασκεύασε το

καλούπι (Costas Chronis S.A.) είχε διάφορες επιλογές για το υλικό του καλουπιού. Προτιμήσαμε την επιλογή υλικού εποξειδική ρητίνη με φελιζόλ. Ουσιαστικά, το καλούπι αποτελείται από φελιζόλ υψηλής πυκνότητας και μόνο στις επιφάνειες που αντιγράφονται υπάρχει μια στρώση από εποξειδική ρητίνη πάχους 10mm. Το πάχος της στρώσης και το υλικό προσδίδουν υψηλή αντοχή και καλή τραχύτητα επιφάνειας η οποία μάλιστα μπορεί εύκολα να βελτιωθεί με απλό τρίψιμο με ψιλό γυαλόχαρτο.

Αποτέλεσμα λοιπόν του παραπάνω συλλογισμού – σχεδιασμού είναι το σχέδιο CAD της εσωτερικής επιφάνειας του μισού αγωγού εισόδου που φαίνεται στο Σχήμα 2.5, αλλά και το σχέδιο CAD του καλουπιού που φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Τα πλήρη σχέδια με τις διαστάσεις παρουσιάζονται στο παράρτημα Π6 και είναι τα σχέδια ΑΓΩ-01 1/2 και ΚΑΛ-01 1/1 αντίστοιχα..



Σχήμα 2.5: Σχέδιο CAD της εσωτερικής επιφάνειας του μισού αγωγού εισόδου.



Σχήμα 2.6: Σχέδιο CAD του καλουπιού του μισού αγωγού εισόδου από εποξειδική ρητίνη και φελιζόλ.

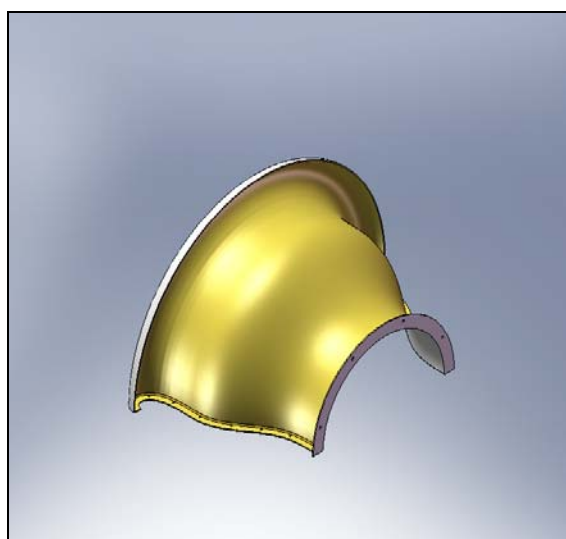
Αφού λοιπόν καταλήξαμε στη μορφή του καλουπιού του αγωγού εισόδου, αυτό που μένει για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του αγωγού εισόδου είναι η **επιλογή του πάχους** του, του πάχους δηλαδή των στρώσεων πολυεστέρα-υαλοϋφάσματος. Το πάχος αυτό είναι παράγοντας που επηρεάζει το βάρος, την ελαστικότητα και τη δυσκαμψία του αγωγού. Για την επιλογή του πάχους του αγωγού ανατρέξαμε σε προηγούμενες παρόμοιες και εν λειτουργία κατασκευές αγωγών εισόδων του Ε.Θ.Σ. και διαπιστώσαμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το πάχος δεν ξεπερνούσε τα 5mm. Παράλληλα, από προτροπές ειδικών στις κατασκευές πολυεστερικών αντικειμένων πληροφορηθήκαμε για μια εμπειρική σχέση σύμφωνα με την οποία έχουμε αύξηση του πάχους των στρώσεων 1 mm ανά μέτρο μήκους του αντικειμένου. Αυτό βέβαια, αναφέρεται περισσότερο στις πολυεστερικές γάστρες των φουσκωτών σκαφών. Ένας άλλος παράγοντας που λήφθηκε υπ' όψιν είναι ότι το πάχος πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί ο μισός αγωγός

εισόδου να παραμορφώνεται ελαστικά ώστε να είναι επιτρεπτή η αποκόλληση του χωρίς ζημιές στο καλούπι αλλά ούτε και στο αντικείμενο. **Το πάχος που επιλέξαμε είναι $t=4\text{mm}$.** Η επιλογή αυτή βασίστηκε στις παραπάνω αναφορές και στις απαιτήσεις, και παράλληλα προσδίδει στο αντικείμενο μια καλή σχέση στιβαρότητας – ελαστικότητας.

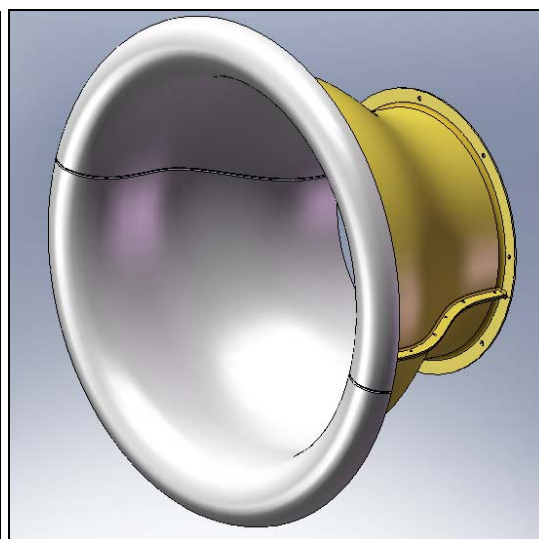
Να αναφέρουμε ότι θα μπορούσε να γίνει και κάποια ανάλυση της κατασκευής υπολογιστικά, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά κρίναμε ότι κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο, αφού το μόνιμο φορτίο που θα επιδέχεται ο αγωγός εισόδου είναι το βάρος του, και το φορτίο κοπώσεως που προκύπτει είναι μικρό αφού προέρχεται από τους έτσι κι αλλιώς μικρούς κραδασμούς όλης της διάταξης κατά τη λειτουργία.

Να τονίσουμε όμως ότι το σημείο που συγκεντρώνονται οι μεγαλύτερες τάσεις βρίσκεται στη φλάντζα του αγωγού με την οποία συνδέεται με τον συμπιεστή. Για το λόγο αυτόν λοιπόν, φροντίσαμε να δώσουμε στη φλάντζα αλλά και σε μια περιοχή περί τα 100mm γύρω της, το πάχος των 6mm. Παράλληλα φροντίσαμε να δημιουργήσουμε στην ακμή της φλάντζας αυτής ένα ράδιο των 10mm το οποίο έγινε με χρήση πολυεστέρα-υαλούφασμα.

Παρακάτω στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το σχέδιο CAD του μισού αγωγού εισόδου και στο Σχήμα 2.8 το σχέδιο CAD ολόκληρου του αγωγού εισόδου, συναρμολογημένου. Το πλήρες σχέδιο με τις διαστάσεις παρατίθεται στο παράρτημα Π6 και είναι το σχέδιο ΑΓΩ-01 2/2.



Σχήμα 2.7: Σχέδιο CAD του μισού αγωγού εισόδου.



Σχήμα 2.8: Σχέδιο CAD του αγωγού εισόδου.

Η κατασκευή του αγωγού εισόδου έγινε στο Ε.Θ.Σ. του ΕΜΠ. Για την κατασκευή του αναγκαία ήταν η επιφανειακή προετοιμασία του καλουπιού η οποία περιελάμβανε την λείανση της επιφάνειάς του με ψιλό γυαλόχαρτο, και έπειτα το κέρωμα της επιφάνειας με ειδικό κερί για επιτυχή αποκόλληση του αντιτύπου από το καλούπι. Στη συνέχεια το καλούπι "περάστηκε" 2 χέρια λευκό gelcoat για την προστασία

και σωστή ποιότητα της επιφάνειας του αγωγού. Έπειτα, χρησιμοποιήσαμε 4 στρώσεις πολυεστέρα με υαλούφασμα τύπου υαλοπίλημα και βάρους $300\text{gr}/\text{m}^2$. Τέλος, έγινε η αποκόλληση του αντιτύπου του οποίου λειάναμε την εσωτερική επιφάνεια με ένα απαλό τρίψιμο με ψιλό γυαλόχαρτο. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για την παραγωγή του άλλου μισού του αγωγού εισόδου.

Παρακάτω στο Σχήμα 2.9 διακρίνουμε το καλούπι κερωμένο και έτοιμο για χρήση. Στο Σχήμα 2.10 διακρίνουμε τον μισό αγωγό εισόδου μετά το ξεκαλούπωμα.



Σχήμα 2.9: Καλούπι του μισού αγωγού εισόδου από εποξειδική ρητίνη και φελιζόλ.

Σχήμα 2.10: Μισός αγωγός εισόδου από πολυεστέρα (ρητίνη) και υαλούφασμα.

Τέλος, το μόνο που έμεινε να γίνει είναι να ανοιχτούν οι οπές στις φλάντζες ώστε να μπορεί να συναρμολογηθεί ο αγωγός εισόδου με χρήση κοχλιών. Αφού έγινε και αυτό, η κατασκευή του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth) ολοκληρώθηκε και διακρίνεται τοποθετημένος στη διάταξη στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2.11 και Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.11: Πλάγια όψη τοποθετημένου αγωγού εισόδου.

Σχήμα 2.12: Πρόσωση τοποθετημένου αγωγού εισόδου.

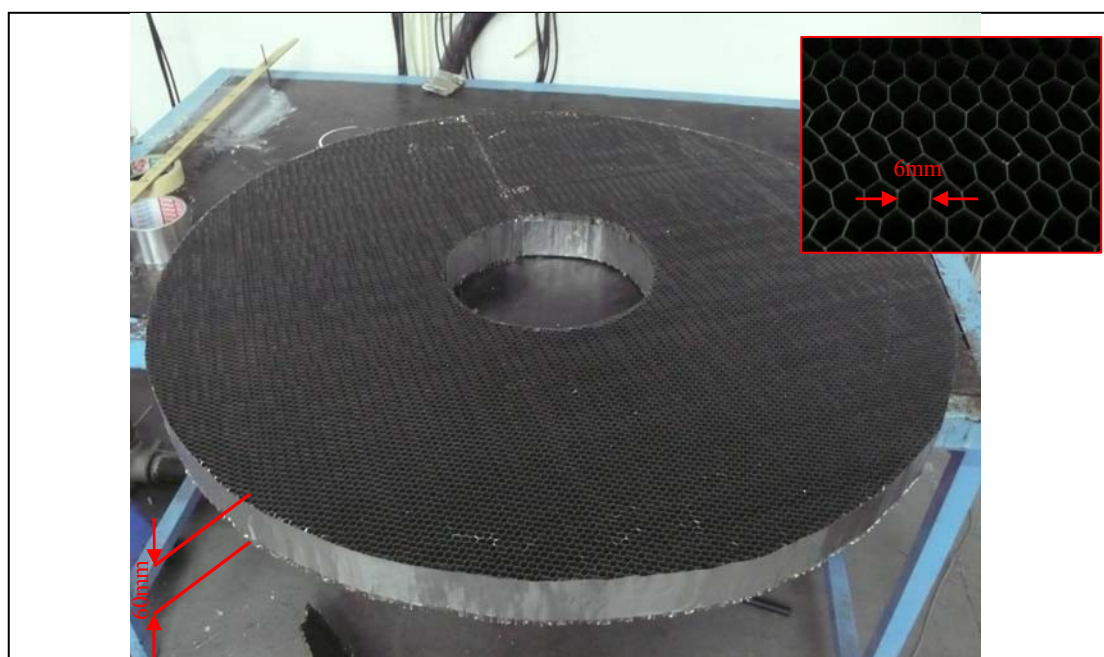
2.2.5 Προθάλαμος αγωγού εισόδου – Εξομαλυνση ροής (Honeycomb).

Στον προθάλαμο του αγωγού εισόδου ομαλοποιείται η ροή και μειώνεται η τύρβη. Για τη μείωση της τύρβης και την ευθυγράμμιση της ροής τοποθετείται εκεί εξομαλυντής ροής (Honeycomb) όπως ήδη αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου. Ο εξομαλυντής αποτελείται στην απλούστερη περίπτωση από σωλήνες κυκλικής διατομής τον έναν δίπλα στον άλλον. Άλλοι τύποι διατομών των κυψελών είναι οι τετραγωνικές και οι εξαγωνικές.

Το B.S.I. (British Standards Institution) συνιστά τετραγωνικής διατομής κυψέλες πλευράς περί το 7-15% της διαμέτρου του αγωγού και με σχέση $L/D_h=3$. Το N.E.L. (National Engineering Laboratory) χρησιμοποιεί εξομαλυντές ροής που αποτελούνται από εξαγωνικής διατομής κυψέλες πλευράς 9.5mm και αξονικού μήκους 76mm ανεξάρτητα της διαμέτρου του αγωγού^[21].

Ανεξάρτητα τη μορφή του εξομαλυντή, η σημαντικότερη παράμετρος είναι ο λόγος L/D_h όπου L είναι το αξονικό μήκος του εξομαλυντή και D_h η υδραυλική διάμετρος της διατομής της κυψέλης. Ο λόγος αυτός πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, γεγονός που επιτυγχάνεται με την αύξηση του L και με τη μείωση του D_h . Επίσης, το πάχος των τοιχωμάτων των κυψελών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο και πρέπει να καθορίζεται με μοναδικό κριτήριο την αντοχή της κατασκευής^[12].

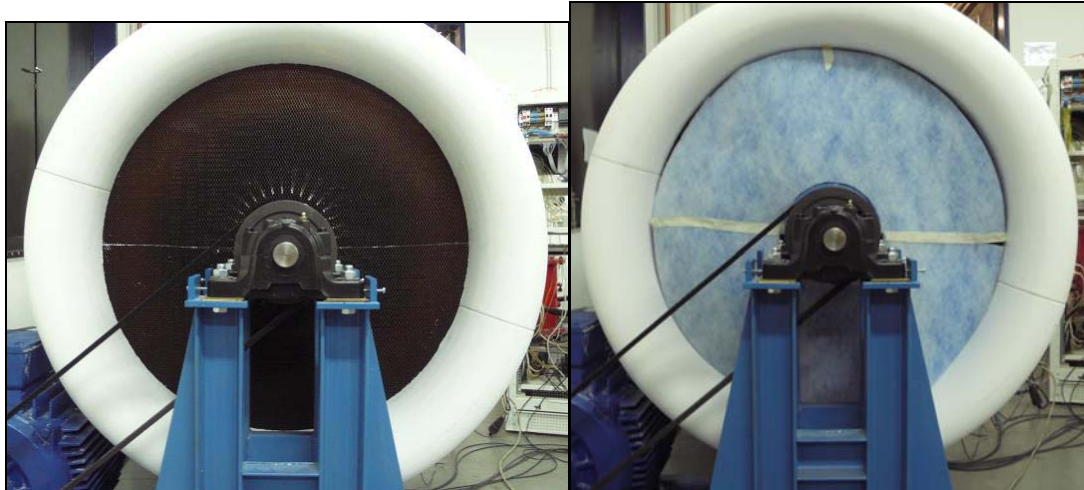
Στη διάταξή μας χρησιμοποιήσαμε αλουμινένιο εξομαλυντή ροής (Honeycomb) εξαγωνικής διατομής 6mm και μήκους L 60mm με σχέση $L/D_h \approx 10$. Η επιλογή αυτή έγινε επειδή αυτός ο τύπος υπήρχε ήδη στο απόθεμα του Ε.Θ.Σ., ενώ ταυτόχρονα ο λόγος L/D_h που παρέχει είναι υψηλός και η κοπή του στο επιθυμητό σχήμα είναι εύκολη.



Σχήμα 2.13: Εξομαλυντής ροής (Honeycomb) εξαγωνικής διατομής από αλουμίνιο .

Στο Σχήμα 2.13 διακρίνουμε τον εξομαλυντή (Honeycomb) που χρησιμοποιούμε στη διάταξη. Παρακάτω στο Σχήμα 2.14 διακρίνουμε τον εξομαλυντή τοποθετημένο στον αγωγό εισόδου στη διάμετρο D_2 . Παρατηρούμε ότι ο εξομαλυντής είναι σε δύο κομμάτια ώστε να επιτυγχάνεται η εύκολη τοποθέτησή του.

Ένας άλλος τρόπος που επηρεάζεται τη ροή στην είσοδο είναι το φίλτρο που τοποθετείται επάνω στον εξομαλυντή. Η χρήση του φίλτρου αποσκοπεί στην διατήρηση της καθαριότητας στο εσωτερικό του συμπιεστή και παράλληλα στην αποφυγή επικαθίσεων στα πτερύγια και στις οπές των σωλήνων πίεσης που προκαλούν το βούλωμά τους με αποτέλεσμα την αδυναμία λήψης μετρήσεων. Ο τρόπος που το φίλτρο επηρεάζει τη ροή εισόδου είναι τις περισσότερες φορές ουδέτερος. Στη διάταξή μας όμως η χρήση του επηρεάζει αρνητικά την ομοιομορφία στην είσοδο της 1^{ης} πτερωτής όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 4.5.1, γι' αυτό και η χρήση του απορρίφθηκε. Στο Σχήμα 2.15 διακρίνουμε το φίλτρο τοποθετημένο στον αγωγό εισόδου.



Σχήμα 2.14: Εξομαλυντής ροής (Honeycomb) τοποθετημένος στον αγωγό εισόδου.

Σχήμα 2.15: Φίλτρο αέρα τοποθετημένο στον αγωγό εισόδου μπροστά από το Honeycomb.

2.3 Σχεδιασμός και κατασκευή χείλους εξόδου του αποκλίνοντος αγωγού εξόδου.

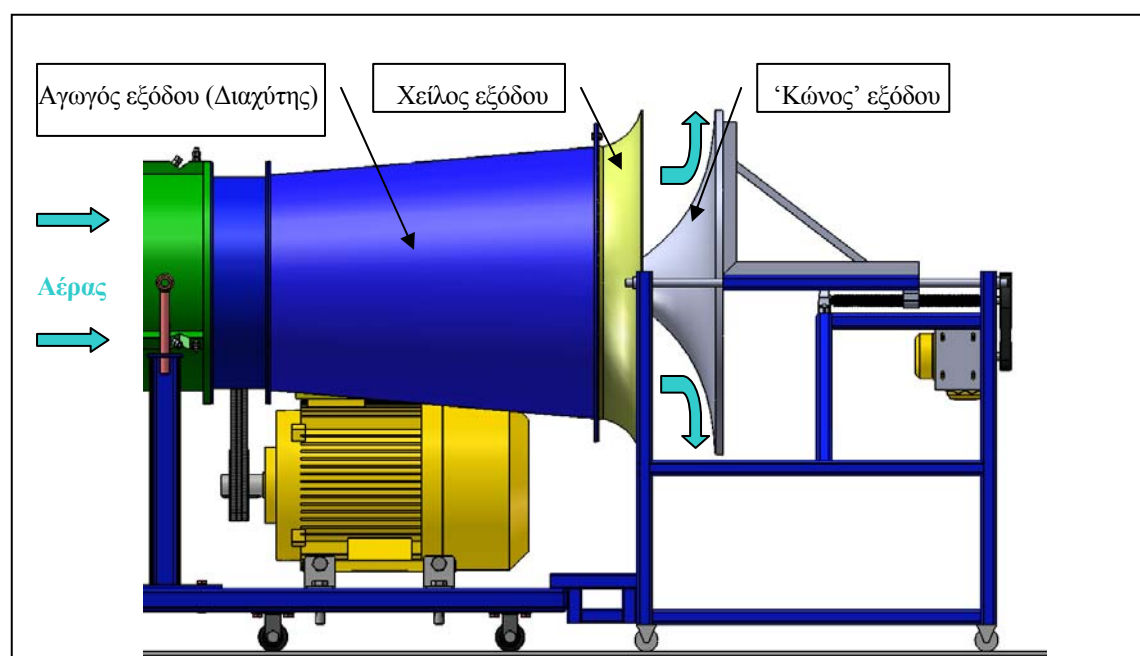
2.3.1 Ακτινική έξοδος ροής – Έλεγχος διακινούμενης παροχής.

Ο έλεγχος της διακινούμενης παροχής του συμπιεστή στη διάταξή μας, επιτυγχάνεται με τη χρήση της διάταξης στραγγαλισμού της ροής (Σχήμα 2.16). Πρόκειται ουσιαστικά για μια ρυθμιστική βάνα η οποία με το κλείσιμό της αυξάνει τις απώλειες δικτύου ελαττώνοντας έτσι την παροχή. Αποτελείται δε από έναν κώνο που έχει τη δυνατότητα να πλησιάζει ή να απομακρύνεται από τον αγωγό εξόδου (διαχύτη)

μειώνοντας ή αυξάνοντας αντίστοιχα το εμβαδόν εξόδου της ροής, ρυθμίζοντας έτσι την παροχή. Ο κώνος καταφέρει να οδηγεί ομαλά τη ροή από την αξονική στην ακτινική κατεύθυνση. Απαραίτητη λοιπόν είναι και η χρήση ενός στρογγυλεμένου χείλους στην έξοδο του αγωγού εξόδου ώστε να κατευθύνεται ομαλά η ροή.

Η ομαλή αυτή μετάβαση είναι απαραίτητη ώστε να μην αποκολλάται η ροή στην έξοδο. Εάν δεν υπήρχε το χείλος εξόδου, καθώς θα κλείναμε την βάνα η ροή θα αποκολλούταν στην έξοδο του αγωγού εξόδου με αποτέλεσμα να προκαλεί περαιτέρω απώλειες στο δίκτυο και παράλληλα να μη προσδίδει μονιμότητα στο πεδίο ροής σε περίπτωση που έχουμε συνεχείς αποκολλήσεις και επανακολλήσεις.

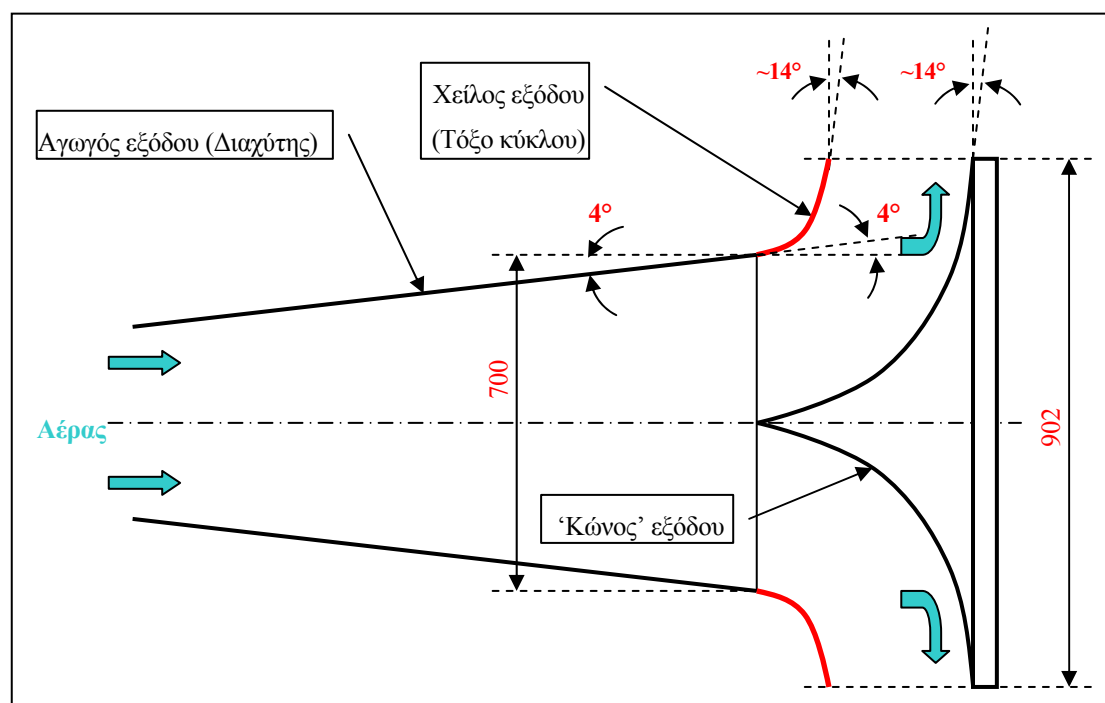
Στο Σχήμα 2.16 διακρίνουμε το σχέδιο CAD της διάταξης στραγγαλισμού της παροχής, η οποία αποτελείται από τον κώνο εξόδου και τη βάση-φορείο του. Το φορείο του κώνου παίρνει κίνηση από 3Φ Η/Κ μέσω κοχλία κινήσεως. Ο έλεγχος του κινητήρα γίνεται μέσω inverter το οποίο ελέγχεται από τηλεχειριστήριο μέσα από το δωμάτιο ελέγχου. Το πλήρες σχέδιο της διάταξης στραγγαλισμού παρουσιάζεται στο παράρτημα Π6 και είναι το σχέδιο ΣΤΡ-01 1/1. Η κατασκευή του κώνου έγινε στο Ε.Θ.Σ. και το υλικό του είναι φελιζόλ με γύψινη επικάλυψη. Η κατασκευή της υπόλοιπης διάταξης στραγγαλισμού έγινε από τους Διπλ. Μηχανολόγους Ε.Μ.Π. Σπύρο Μπέλλιο και Δημήτρη Πετρίδη. Ο αποστάτης της διάταξης στραγγαλισμού από την υπόλοιπη διάταξη σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, λόγω της απλότητάς του, δεν αναφέρουμε κανένα στοιχείο για το σχεδιασμό του, παρά μόνο το σχέδιο του (ΑΠΟ-01 1/1) που παρατίθεται στο παράρτημα Π6.



Σχήμα 2.16: Σχέδιο CAD διάταξης στραγγαλισμού παροχής (έλεγχος διακινούμενης παροχής).

2.3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χείλους εξόδου.

Ο σχεδιασμός του χείλους εξόδου δεν έχει κάποια ιδιαίτερη απαίτηση για αεροδυναμική συμπεριφορά, καθώς βρίσκεται στη έξοδο της ροής μακριά από τις πτερωτές με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει άμεσα τη ροή που περνά από αυτές. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να αποτελείται από μια γενέτειρα η οποία είναι ομαλή καμπύλη και τηρεί τους γεωμετρικούς περιορισμούς που φαίνονται στο Σχήμα 2.17. Οι γεωμετρικοί αυτοί περιορισμοί είναι η εσωτερική και εξωτερική διάμετρος, η γωνία εισόδου που ισούται με την ημιγωνία του διαχύτη, καθώς και η γωνία εξόδου που ισούται με τη γωνία του κώνου στη εξωτερική διάμετρο. Η πιο απλή κατασκευαστικά γεωμετρία της γενέτειρας είναι ένα τόξο κύκλου, το οποίο με τους παραπάνω περιορισμούς είναι πλήρως καθορισμένο.



Σχήμα 2.17: Γεωμετρικοί περιορισμοί χείλους εξόδου αγωγού εξόδου.

2.3.3 Σχεδιασμός και κατασκευή του 3D χείλους εξόδου και του καλουπιού του.

Οι στόχοι που θέλουμε να επιτύχουμε με τον σχεδιασμό του χείλους εξόδου είναι οι ίδιοι με αυτούς που αναλύσαμε για το σχεδιασμό του αγωγού εισόδου (κεφάλαιο 2.2). Άρα, και εδώ το χείλος εισόδου επιλέξαμε να κατασκευαστεί από σύνθετο υλικό (πολυεστέρας-υαλούφασμα) και προφανώς για την κατασκευή αυτή απαιτείται η κατασκευή του καλουπιού του χείλους εισόδου.

Η αρχική ιδέα ήταν να κατασκευαστεί το χείλος εξόδου όπως και ο αγωγός εισόδου, δηλαδή να κατασκευαστεί πρώτα το καλούπι από την εταιρεία Costas Chronis S.A.^[36] και έπειτα μέσω αντιγραφής του καλουπιού να κατασκευάσουμε το χείλος εξόδου από πολυεστέρα και υαλούφασμα. Η κατασκευή όμως του καλουπιού από την εταιρεία θα αύξανε επιπλέον το κόστος, ενώ η κατασκευή του στο Ε.Θ.Σ. ήταν εφικτή λόγω της απλότητας της γεωμετρίας του.

Επιλέξαμε όπως ήδη αναφέραμε, η καμπύλη της γενέτειρας του χείλους εξόδου να είναι ένα τόξο κύκλου ώστε να μπορέσουμε εύκολα να κατασκευάσουμε το καλούπι το οποίο θα είναι ένα στερεό εκ περιστροφής.

Για τον **σχεδιασμό του καλουπιού** του χείλους εισόδου θέσαμε τους παρακάτω **στόχους** :

1. Η γεωμετρία του καλουπιού να μην έχει αρνητικές κλίσεις ώστε να μπορέσει με ευκολία να αποκολληθεί το αντίτυπο χωρίς την καταστροφή του καλουπιού ή του αντιτύπου.
2. Η κατεργασία για την κατασκευή του καλουπιού να είναι τέτοια ώστε οι αποκλίσεις των πραγματικών διαστάσεων από αυτές του σχεδίου να βρίσκονται σε αποδεκτά όρια ($\pm 0.5\text{mm}$), ενώ παράλληλα το υλικό του καλουπιού να είναι τέτοιο ώστε να κατεργάζεται και να διαμορφώνεται εύκολα.
3. Το υλικό της επιφάνειας του καλουπιού προς αντιγραφή να είναι από υλικό που μπορεί εύκολα να λειανθεί ώστε να αποκτήσει μικρή τραχύτητα, χωρίς να καταστραφεί. Να σημειώσουμε ότι δε μας ενδιαφέρει τόσο η αντοχή του υλικού του καλουπιού, αφού μας ενδιαφέρει η παραγωγή ενός μόνο αντιτύπου.

Ο 1^{ος} **στόχος** επιτυγχάνεται από την ίδια τη γεωμετρία της γενέτειρας του χείλους εξόδου, η οποία είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει πουθενά αρνητική κλίση ως προς τη φορά ξεκαλουπώματος η οποία έχει την αντίθετη φορά του διανύσματος της ταχύτητας εξόδου. Βέβαια, το χείλος εξόδου χρειάζεται να έχει φλάντζα στη θέση που συνδέεται με τον διαχύτη. Η διαμόρφωση της φλάντζας αυτής στο καλούπι είναι μη αποδεκτή λύση καθώς με αυτόν τον τρόπο έχουμε αρνητική κλίση σε όλη τη φλάντζα, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ξεκαλουπωθεί το αντίτυπο από το καλούπι. Έτσι, η λύση είναι να αποτελείται το καλούπι από μια πρόσθετη ξύλινη φλάντζα η οποία θα βιδώνεται στο καλούπι, έπειτα θα γίνεται η αντιγραφή του καλουπιού μαζί με τη φλάντζα, στη συνέχεια θα αφαιρείται η φλάντζα και τέλος θα ξεκαλουπώνεται το αντίτυπο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει η επιφάνεια του καλουπιού στη ελάχιστη διατομή να είναι πλήρως εγκάρσια με τον άξονα συμμετρίας του αγωγού, αλλά και συμπαγής ώστε να μπορέσουν να δημιουργηθούν σπειρώματα επάνω της για την σφικτή σύνδεση της φλάντζας, αλλά και την εύκολη αποσυναρμολόγησή της. Βέβαια, επειδή το υλικό του καλουπιού είναι φελιζόλ όπως θα δούμε παρακάτω, δεν μπορούν να ανοιχτούν σπειρώματα. Έτσι, η λύση είναι η κόλληση ξύλινου δακτυλίου στην επιφάνεια αυτή, έτσι ώστε τα σπειρώματα να ανοιχτούν σε ξύλο.

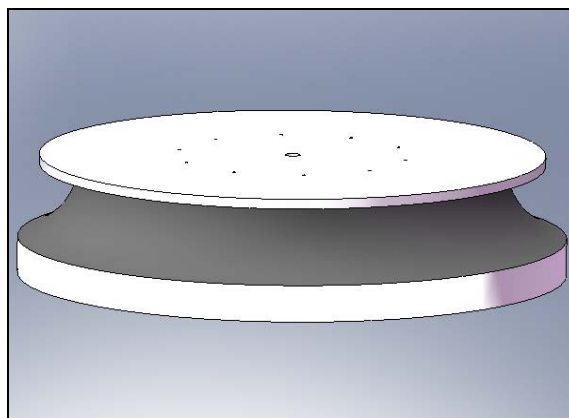
Ο 2^{ος} στόχος επιτυγχάνεται με τη χρήση φελιζόλ για το υλικό του καλουπιού. Το φελιζόλ είναι φθηνό και πολύ εύκολα κατεργάσιμο. Η επιτυχής διαμόρφωσή του ώστε να είναι ένα εκ περιστροφής σώμα με γενέτειρα τόξο κύκλου, έγινε με τη χρήση ενός ειδικής κατασκευής κατακόρυφου τόννου που υπήρχε ήδη στο Ε.Θ.Σ., και με έναν βραχίονα κοπής φελιζόλ ο οποίος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Ε.Θ.Σ. στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Ο βραχίονας αυτός έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί σώματα εκ περιστροφής από μαλακό υλικό (π.χ. φελιζόλ) με γενέτειρα τόξο κύκλου επιθυμητής ακτίνας. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του βραχίονα αναλύονται στο κεφάλαιο 2.3.4. Η κατεργασία με αυτόν τον τρόπο, εάν γίνει από έμπειρο χειριστή δίνει ακρίβεια στις διαστάσεις $\pm 0.5\text{mm}$ η οποία προφανώς ελέγχθηκε εκ του αποτελέσματος, αλλά παράλληλα είναι και αναμενόμενη αν αναλογιστούμε ότι η ρύθμιση των αποστάσεων και της ακτίνας στο βραχίονα έγινε με κανόνα ο οποίος έχει ακρίβεια $\pm 0.5\text{mm}$.

Ο 3^{ος} στόχος επιτυγχάνεται με τη χρήση εποξειδικής ρητίνης και πολυεστερικού στόκου. Η ιδέα εφαρμογής των υλικών αυτών έχει ως εξής : Αφού έχουμε διαμορφώσει το καλούπι το οποίο έως τώρα είναι μόνο φελιζόλ και κολλημένο τον εσωτερικό δακτύλιο συγκράτησης της φλάντζας, απλώνουμε σε όλο το καλούπι την εποξειδική ρητίνη σε δύο στρώσεις. Η εποξειδική ρητίνη δρα ουσιαστικά σαν προστατευτικό του φελιζόλ από τον πολυεστερικό στόκο. Στη συνέχεια απλώνουμε τον πολυεστερικό στόκο στις επιφάνειες αντιγραφής σε τέτοια ποσότητα ώστε να αποκτήσει το επιθυμητό πάχος (περίπου 2mm). Τέλος, λειαίνουμε με γυαλόχαρτο την επιφάνεια αντιγραφής.

Αποτέλεσμα λοιπόν του παραπάνω συλλογισμού – σχεδιασμού είναι το σχέδιο CAD της εσωτερικής επιφάνειας χείλους εξόδου που φαίνεται στο Σχήμα 2.18, αλλά και το σχέδιο CAD του καλουπιού που φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Τα πλήρη σχέδια με τις διαστάσεις παρουσιάζονται στο παράρτημα Π6 και είναι τα σχέδια ΑΓΩ-02 1/2 και ΚΑΛ-02 1/2, 2/2 αντίστοιχα..



Σχήμα 2.18: Σχέδιο CAD της εσωτερικής επιφάνειας του χείλους εξόδου.

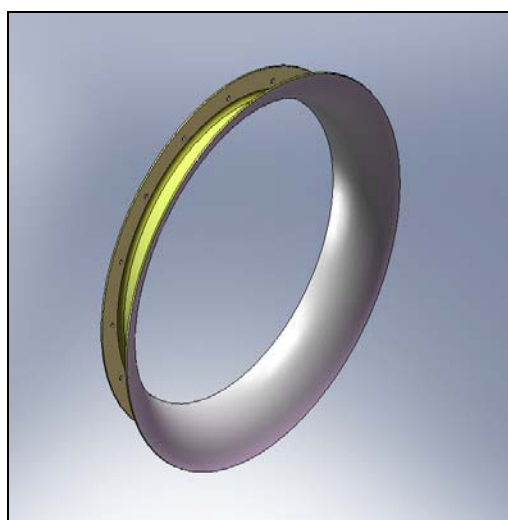


Σχήμα 2.19: Σχέδιο CAD του καλουπιού του χείλους εξόδου.

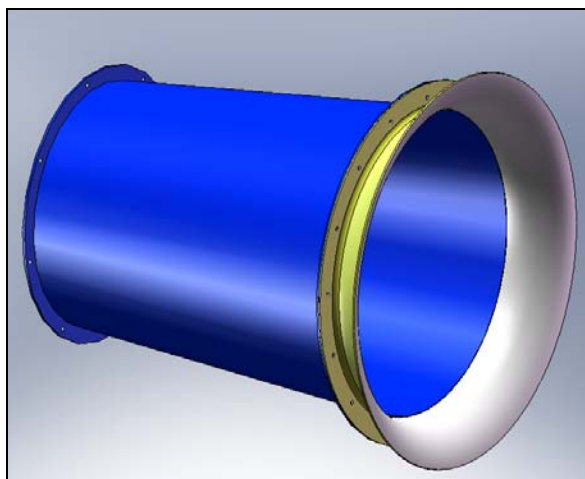
Αφού λοιπόν καταλήξαμε στη μορφή του καλουπιού του χείλους εξόδου, αυτό που μένει για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του χείλους εξόδου είναι η **επιλογή του πάχους** του, του πάχους δηλαδή των στρώσεων πολυεστέρα-υαλοϋφάσματος. Σύμφωνα με όλα όσα αναφέραμε για το πάχος του αγωγού εισόδου σε προηγούμενη παράγραφο, μπορούμε και εδώ να επιλέξουμε το **πάχος των 4mm** για το χείλος εξόδου.

Να τονίσουμε όμως ότι το σημείο που συγκεντρώνονται οι μεγαλύτερες τάσεις βρίσκεται στη φλάντζα του χείλους εξόδου με την οποία συνδέεται με τον συμπιεστή. Για το λόγο αυτόν λοιπόν, φροντίσαμε να δημιουργήσουμε στην ακμή της φλάντζας αυτής ένα ράδιο των 10mm το οποίο έγινε με χρήση πολυεστέρα-υαλοϋφάσματος. Παράλληλα, για να διευκολύνουμε την κατεργασία του αντιτύπου μετά το ξεκαλούπωμα προσθέσαμε στο καλούπι μια επιπλέον φλάντζα στη εξωτερική (μέγιστη) διάμετρο. Η φλάντζα αυτή είναι από πλεξιγκλάς και αλουμινοταινία και αφαιρείται από το καλούπι πριν το ξεκαλούπωμα. Μάλιστα, δημιουργεί και ένα νεύρο στη μεγάλη διάμετρο του χείλους εξόδου αυξάνοντας έτσι τη δυσκαμψία του.

Παρακάτω στο Σχήμα 2.20 παρουσιάζεται το σχέδιο CAD του χείλους εξόδου και στο Σχήμα 2.21 το σχέδιο CAD χείλους εξόδου τοποθετημένο στον διαχύτη. Το πλήρες σχέδιο με τις διαστάσεις παρατίθεται στο παράρτημα Π6 και είναι το σχέδιο ΑΓΩ-02 2/2.



Σχήμα 2.20: Σχέδιο CAD του χείλους εξόδου .



Σχήμα 2.21: Σχέδιο CAD του χείλους εξόδου τοποθετημένο στον αγωγό εξόδου.

Η κατασκευή του χείλους εξόδου και του καλουπιού του έγινε στο Ε.Θ.Σ. του ΕΜΠ. Για την κατασκευή του χείλους εξόδου αναγκαία ήταν η επιφανειακή προετοιμασία του καλουπιού η οποία περιελάμβανε την λείανση της επιφάνειάς του με ψιλό γυαλόχαρτο, και έπειτα το κέρωμα της επιφάνειας με ειδικό κερί για επιτυχή αποκόλληση του αντιτύπου από το καλούπι. Στη συνέχεια το καλούπι "περάστηκε" 2 χέρια λευκό gelcoat για την προστασία και σωστή ποιότητα της επιφάνειας του αγωγού.

Έπειτα, χρησιμοποιήσαμε 4 στρώσεις πολυεστέρα με υαλούφασμα τύπου υαλοπίλημα και βάρους $300\text{gr}/\text{m}^2$. Τέλος, έγινε η αποκόλληση του αντύπου του οποίου λειάναμε την εσωτερική επιφάνεια με ένα απαλό τρίψιμο με ψιλό γυαλόχαρτο.

Παρακάτω στο Σχήμα 2.22 διακρίνουμε το καλούπι κερωμένο και έτοιμο για χρήση. Στο Σχήμα 2.23 διακρίνουμε το χείλος εξόδου μετά το ξεκαλούπωμα.



Σχήμα 2.22: Καλούπι του χείλους εξόδου από εποξειδική ρητίνη, πολυεστερικό στόκο, φελιζόλ και μελαμίνη .

Σχήμα 2.23: Χείλος εξόδου από πολυεστέρα (ρητίνη) και υαλούφασμα .

Τέλος, το μόνο που έμεινε να γίνει είναι να ανοιχτούν οι οπές στις φλάντζες ώστε να μπορεί να συναρμολογηθεί το χείλος εξόδου με χρήση κοχλιών. Αφού έγινε και αυτό, η κατασκευή του χείλους εξόδου ολοκληρώθηκε και διακρίνεται τοποθετημένο στη διάταξη στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2.24 και Σχήμα 2.25).



Σχήμα 2.24: Πλάγια όψη τοποθετημένου χείλους εξόδου .

Σχήμα 2.25: Προοπτική όψη τοποθετημένου χείλους εξόδου .

2.3.4 Σχεδιασμός και κατασκευή βραχίονα συγκράτησης τροχού 2 βαθμών ελευθερίας, για διαμόρφωση-κοπή φελιζόλ.

Όπως ήδη αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, για την κατασκευή του καλουπιού του χείλους εξόδου ήταν αναγκαία ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός βραχίονα στο Ε.Θ.Σ. ο οποίος να μπορεί να μέσω ενός εργαλείου κοπής στο άκρο του να δημιουργεί σώματα εκ περιστροφής από μαλακό υλικό (π.χ. φελιζόλ) με γενέτειρα τόξο κύκλου επιθυμητής ακτίνας. Η ιδέα είναι ότι ο βραχίονας θα μένει σταθερός στο ένα του άκρο, και μέσω μιας άρθρωσης στο άλλο άκρο του στην οποία είναι συνδεδεμένο το φορείο του κοπτικού, θα επιτρέπει στο κοπτικό να διαμορφώνει τόξο κύκλου στο σώμα εκ περιστροφής που είναι τοποθετημένο επάνω σε έναν κατακόρυφο τόρνο ειδικής κατασκευής που υπήρχε ήδη στο Ε.Θ.Σ..

Το κοπτικό που επιλέχθηκε για τη λειτουργία αυτή είναι ένας τροχός λείανσης ισχύος 600W. Ο λόγος που επιλέξαμε τροχό λείανσης προήλθε από δοκιμαστική διαμόρφωση επάνω σε φελιζόλ, μετά από απόρριψη και άλλων κοπτικών. Διαπιστώσαμε ότι ο τροχός λείανσης διαμορφώνει το φελιζόλ με μεγάλη ευκολία, δηλαδή με πολύ μικρή αντίσταση για μια λογική ταχύτητα πρόωσης, και μάλιστα η επιφάνεια που δημιουργεί μετά την κατεργασία είναι πολύ καλής ποιότητας. Αυτό οφείλεται στο ότι ο δίσκος του τροχού είναι έχει μεγάλη σκληρότητα και τραχύτητα και το πιο σημαντικό είναι ότι περιστρέφεται με πολλές στροφές (περίπου 10000rpm), με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει ταχύτερη αποβολή υλικού από το φελιζόλ που είναι πολύ μαλακό υλικό. Μάλιστα, ο λόγος για την καλή ποιότητα της επιφάνειας που δημιουργεί, πηγάζει και από τη μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται τοπικά στο σημείο κοπής με αποτέλεσμα την τοπική τήξη του φελιζόλ σε εκείνο το σημείο.

Για τον σχεδιασμό του βραχίονα διαμόρφωσης φελιζόλ θέσαμε τους παρακάτω **στόχους** :

1. Το κόστος των υλικών καθώς και το κόστος και ο χρόνος κατασκευής να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερα.
2. Η μία άκρη του βραχίονα να πακτώνεται σε σταθερή βάση η οποία να έχει τη δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της κατακόρυφης θέσης της.
3. Το φορείο του κοπτικού να έχει τη δυνατότητα ακριβούς ρυθμίσεως της ακτίνας κοπής, αλλά και αρκετό εύρος ρυθμίσεως της ακτίνας ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή και του κώνου εξόδου του διαχύτη.
4. Το φορείο του κοπτικού να έχει τη δυνατότητα υποδοχής διαφορετικού τύπου κοπτικού ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μηχάνημα αυτό και σε άλλη εφαρμογή για διαφορετικό υλικό τεμαχίου προς επεξεργασία.
5. Ο βραχίονας, αλλά και όλη η διάταξη συνολικά να είναι αρκετά στιβαρή ώστε να μην έχουμε ταλαντώσεις κατά τη λειτουργία.
6. Να έχουμε ακρίβεια κατά την κατεργασία.

Οι λύσεις που επιλέξαμε ώστε να επιτύχουμε τους παραπάνω στόχους είναι εξής :

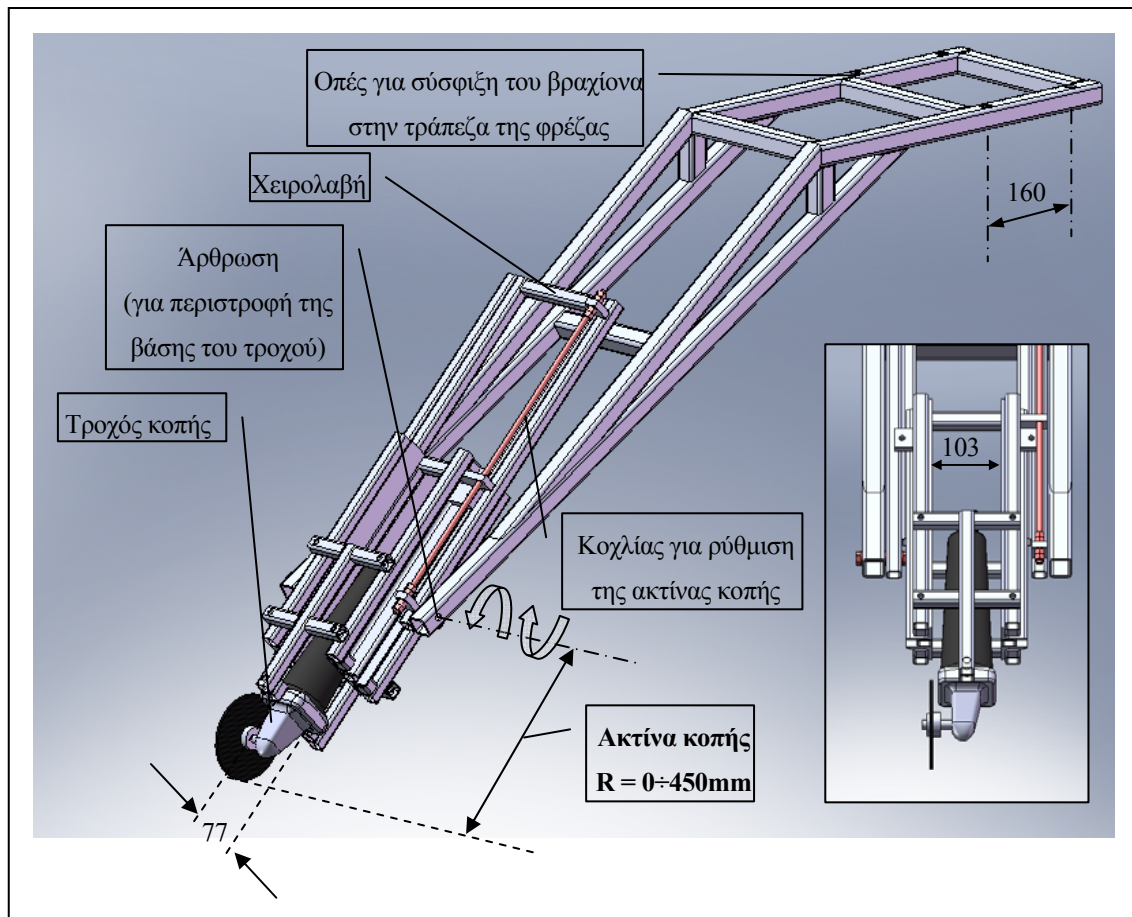
1. Το χαμηλό κόστος υλικών και χρόνου κατασκευής ήταν ο πιο καθοριστικός παράγοντας στο σχεδιασμό του βραχίονα κοπής. Η λύση που επιλέξαμε είναι η κατασκευή του βραχίονα αποκλειστικά από υλικά που υπήρχαν στο απόθεμα του εργαστηρίου. Έτσι, με τον τρόπο αυτό κερδίζουμε το χρόνο που θα κόστιζε η παραγγελία και παραλαβή των υλικών, ενώ ταυτόχρονα δεν έχουμε κανένα κόστος αγοράς υλικών. Με λίγα λόγια, ο σχεδιασμός και η κατασκευή δεν κόστισε τίποτα για το Ε.Θ.Σ.. Τα υλικά που είχαμε στη διάθεσή μας ήταν κοιλοδοκοί και στραντζαριστά διαφόρων διαστάσεων, καθώς επίσης διάφορων τύπων και διαστάσεων κοχλίες.
2. Η δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της κατακόρυφης θέσης του βραχίονα κατορθώνεται μέσω της σύσφιξης με κοχλίες της μιας του άκρης επάνω στην τράπεζα της φρέζας με την οποία είναι εξοπλισμένο το Ε.Θ.Σ.. Έτσι, αρκεί η ύπαρξη ενός πλαισίου με οπές στην άκρη του βραχίονα ώστε να βιδώνεται επάνω στην τράπεζα της φρέζας.
3. Για να μπορέσουμε να ρυθμίζουμε με ακρίβεια την ακτίνα κοπής και να έχουμε ένα μεγάλο εύρος ρύθμισης, επιλέξαμε την εξής λύση : Στην άρθρωση του άκρου του βραχίονα τοποθετείται ένα πλαίσιο σχήματος "Π" που αναλαμβάνει το ρόλο της γλίστρας. Επάνω στη γλίστρα ολισθαίνει ένα φορείο πάνω στο οποίο τοποθετείται το κοπτικό. Για να έχουμε ακρίβεια στη ρύθμιση της θέσης (άρα και της ακτίνας) του φορείου (άρα και του κοπτικού) θα επιτρέπουμε την κίνησή του μέσω κοχλία κίνησης. Ο κοχλίας κίνησης έχει ακινητοποιημένα τα άκρα του επάνω στη γλίστρα μέσω περικοχλίων και μπορεί μόνο να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από τον άξονά του. Το φορείο παίρνει κίνηση από τον κοχλία κίνησης μέσω ενός πλακιδίου με σπείρωμα, συγκολλημένο επάνω του. Για να έχουμε μεγάλο εύρος ρύθμισης της ακτίνας κοπής, αρκεί η γλίστρα και ο κοχλίας να είναι του επιθυμητού μήκους. Για ακινητοποίηση του φορείου στην επιθυμητή θέση συσφίγγουμε το φορείο επάνω στη γλίστρα μέσω ενός κοχλία ο οποίος βιδώνεται σε ένα πλακίδιο συγκολλημένο στο φορείο. Ο χειρισμός γίνεται χειροκίνητα, περιστρέφοντας ουσιαστικά την γλίστρα γύρω από τον άξονα της άρθρωσής της με το βραχίονα.
4. Η δυνατότητα χρήσης διαφορετικού κοπτικού για άλλου τύπου κατεργασία κατορθώνεται ως εξής : Το φορείο έχει οπές που προορίζονται για τη σύνδεση συγκρατητών πάνω στους οποίους προσαρμόζεται το κοπτικό. Η σχεδίαση είναι τέτοια όπου οι συγκρατητές αυτοί έχουν πολύ απλή γεωμετρία, ώστε εάν επιθυμούμε την χρήση άλλου κοπτικού να κατασκευάσουμε ταχύτητα διαφορετικούς αλλά πολύ απλούς συγκρατητές.
5. Για τη κατάλληλη στιβαρότητα της κατασκευής επιλέξαμε τετράγωνης διατομής στραντζαριστά σε κατάλληλες διαστάσεις ανάλογα τη λειτουργία. Επίσης, επειδή ο βραχίονας είναι ουσιαστικά πρόβολος, σχεδιάσαμε τη μορφή του έτσι ώστε να

δημιουργείται ένα δικτύωμα το οποίο ενισχύει την δυσκαμψία του. Βέβαια, δεν έχουμε και ιδιαίτερες απαιτήσεις στιβαρότητας, αφού το φορτίο λειτουργίας είναι πάρα πολύ μικρό.

6. Η ακρίβεια κατά την κατεργασία καθορίζεται από τη σταθερότητα των κινούμενων στοιχείων που απαρτίζουν το μηχάνημα. Τα κινούμενα στοιχεία είναι το φορείο και η γλίστρα η οποία περιστρέφεται γύρω από την άρθρωση. Για να μην έχουμε λοιπόν "τζόγους" οι διαστάσεις των οπών της άρθρωσης έγιναν ακριβώς στη διάσταση των κοχλιών του ώστε να έχουμε σφικτή συναρμογή. Επίσης, η διάσταση του πλάτους της γλίστρας σχεδιάστηκε ακριβώς στη διάσταση πλάτους του φορείου και μάλιστα, συγκολλήθηκε έτσι ώστε το "Π" να σχηματίζει οξείες γωνίες, ώστε η συναρμογή γλίστρα – φορείο να είναι σφικτή. Παράλληλα, η ακινητοποίηση του φορείου επάνω στη γλίστρα μέσω κοχλίου όπως αναφέραμε παραπάνω ενισχύει τη σταθερότητα κατά την κατεργασία.

Να επισημάνουμε ότι δεν κάναμε κάποια μελέτη αντοχής του βραχίονα επειδή το φορτίο λειτουργίας είναι πολύ μικρό όπως έχουμε ήδη αναφέρει. Η επιλογή των διαστάσεων των στραντζαριστών έγινε προφανώς βάση του αποθέματος που είχαμε διαθέσιμο, καθώς επίσης και βάση της εμπειρίας μας, με μια υπερδιαστασιολόγηση για ασφάλεια και σιγουριά. Επίσης, όλες οι συγκολλήσεις είναι απλές αυχενικές ραφές.

Αποτέλεσμα λοιπόν του παραπάνω συλλογισμού – σχεδιασμού είναι το σχέδιο CAD του βραχίονα κοπής που φαίνεται στο Σχήμα 2.26, καθώς και ο κατασκευασμένος βραχίονας που φαίνεται στο Σχήμα 2.27. Τα πλήρη σχέδια όλων των στοιχείων που απαρτίζουν το βραχίονα, αλλά και του συναρμολογημένου βραχίονα, παρουσιάζονται με τις διαστάσεις τους στο παράρτημα Π6 και είναι τα σχέδια ΣΔΚ-01 1/2, 2/2, ΒΡΑ-01 1/1, ΓΛΙ-01 1/1, ΦΟΡ-01 1/5 έως 5/5 και ΣΥΓ-01 1/1.



Σχήμα 2.26: Σχέδιο CAD βραχίονα. Βασικά στοιχεία και γεωμετρικοί περιορισμοί.

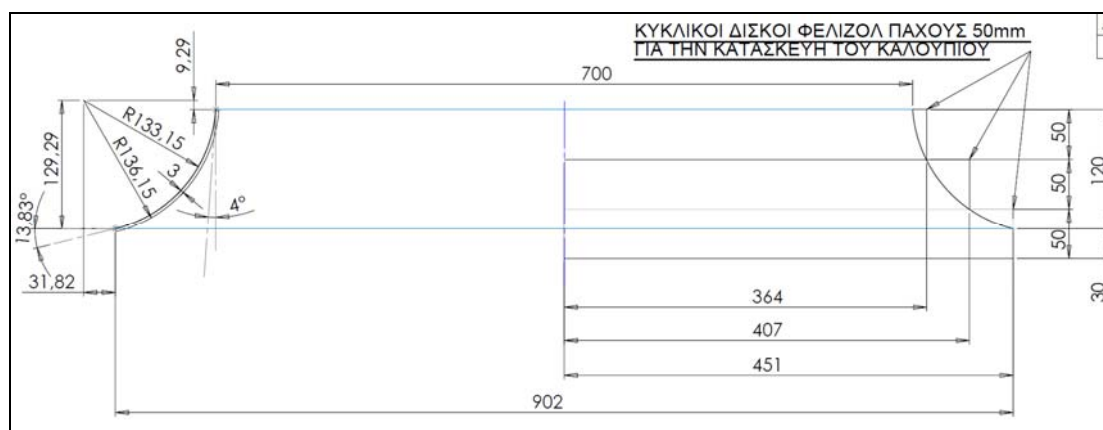


Σχήμα 2.27: Βραχίονας κοπής τοποθετημένος στην τράπεζα της φρέζας.

Για να κατανοήσουμε τον τρόπο χρήσης της διάταξης κοπής φελιζόλ θα αναφέρουμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε για τη δημιουργία του καλουπιού του χείλους εξόδου. Η διαδικασία λοιπόν έχει ως εξής :

Το κυλινδρικό κομμάτι φελιζόλ δημιουργείται από κυκλικούς δίσκους φελιζόλ κολλημένους ο ένας πάνω στον άλλον. Οι κυκλικοί αυτοί δίσκοι έχουν πάχος 50mm και κόπηκαν σε διαφορετικές ακτίνες ο καθένας ανάλογα με τη θέση τους, ώστε να κερδίσουμε χρόνο κατεργασίας και φύρα. Ο βραχίονας κοπής είναι σταθερά συνδεδεμένος επάνω στην τράπεζα της φρέζας του Ε.Θ.Σ.. Έτσι, εφ' όσον η γεωμετρία του τόξου κύκλου (γενέτειρα) είναι πλήρως καθορισμένη από τους γεωμετρικούς περιορισμούς του χείλους εξόδου, είναι γνωστά η ακτίνα του κύκλου και η θέση του κέντρου του κύκλου. Άρα λοιπόν ρυθμίζουμε τη σχετική θέση του τόρνου με τον βραχίονα ώστε η άρθρωση του βραχίονα να ταυτιστεί με το κέντρο του κυκλικού τόξου. Τέλος, ρυθμίζουμε την ακτίνα κοπής να είναι ίση με την ακτίνα του κυκλικού τόξου συν (+) το πάχος που θα έχει το υλικό επικάλυψης του φελιζόλ, δημιουργώντας έτσι ένα offset στη γεωμετρία ώστε να συμπληρωθεί αυτό στη συνέχεια από το υλικό επικάλυψης (εποξειδική ρητίνη και πολυεστερικός στόκος). Η ακτίνα κοπής είναι η μέγιστη απόσταση της άρθρωσης του βραχίονα από τον κύκλο που σχηματίζει ο δίσκος του τροχού λείανσης. Αφού λοιπόν γίνουν αυτές οι ρυθμίσεις, εκκινούμε τον τροχό λείανσης και τον τόρνο, και χειροκίνητα "χαράζουμε" το επιθυμητό κυκλικό τόξο επάνω στο τεμάχιο φελιζόλ το οποίο περιστρέφεται.

Οι διαστάσεις ρύθμισης φαίνονται στο Σχήμα 2.28 και στο σχέδιο ΑΓΩ-02 ½ του παραρτήματος Π6.

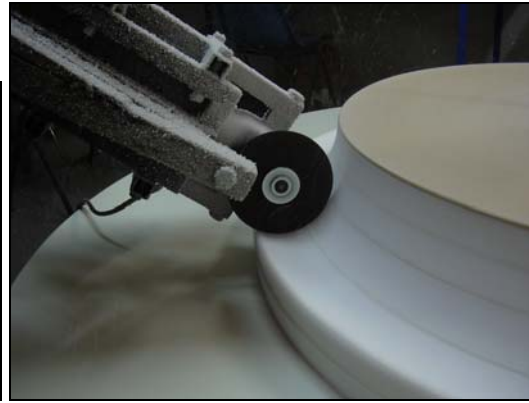


Σχήμα 2.28: Σχέδιο CAD. Γεωμετρικοί περιορισμοί χείλους εξόδου αγωγού εξόδου και δίσκων φελιζόλ για την κατασκευή του καλουπιού.

Παρακάτω στο Σχήμα 2.29 και στο Σχήμα 2.30 φαίνεται η διάταξη κοπής φελιζόλ επί τω έργω, στην φάση κατασκευής του καλουπιού του χείλους εξόδου.



Σχήμα 2.29: Διάταξη διαμόρφωσης φελιζόλ. Διακρίνεται ο βραχίονας καθώς και οι δίσκοι φελιζόλ πριν τη διαμόρφωση, επάνω στον κατακόρυφο τόρνο.



Σχήμα 2.30: Διάταξη διαμόρφωσης φελιζόλ. Διακρίνεται ο βραχίονας καθώς διαμορφώνει το επιθυμητό τόξο κύκλου επάνω στους δίσκους φελιζόλ.

2.4 Διαμόρφωση και τοποθέτηση των πτερυγίων.

Όταν ξεκίνησε η διπλωματική αυτή εργασία, τα πτερύγια είχαν εκπέτασμα 126mm και το μήκος αυτό είχε προβλεφτεί από το σχεδιασμό^[20] ώστε να έχουμε το περιθώριο ρύθμισης του ακριβούς μήκους και διαμόρφωσης των ακροπτερυγίων, όταν έρθει η στιγμή της τοποθέτησης των πτερυγίων στους δίσκους. Έτσι, αυτό που έπρεπε να γίνει τώρα είναι το τρόχισμα των πτερυγίων για τη ρύθμιση του επιθυμητού ακτινικού διακένου. Το επόμενο στάδιο είναι το ζύγισμα των έτοιμων πλέον πτερυγίων, ώστε να τοποθετηθούν με τέτοια σειρά στους δίσκους, η οποία θα προκαλέσει τη μικρότερη δυνατή αζυγοσταθμία των πτερωτών. Τέλος, η τοποθέτηση των πτερυγίων ολοκληρώνεται με τη ρύθμιση της επιθυμητής γωνίας κλίσης (stagger) τους, και στη συνέχεια με τη σύσφιξη των κοχλιών των πτερυγίων με ροπόκλειδο για εφαρμογή της υπολογισμένης ροπής προέντασης.

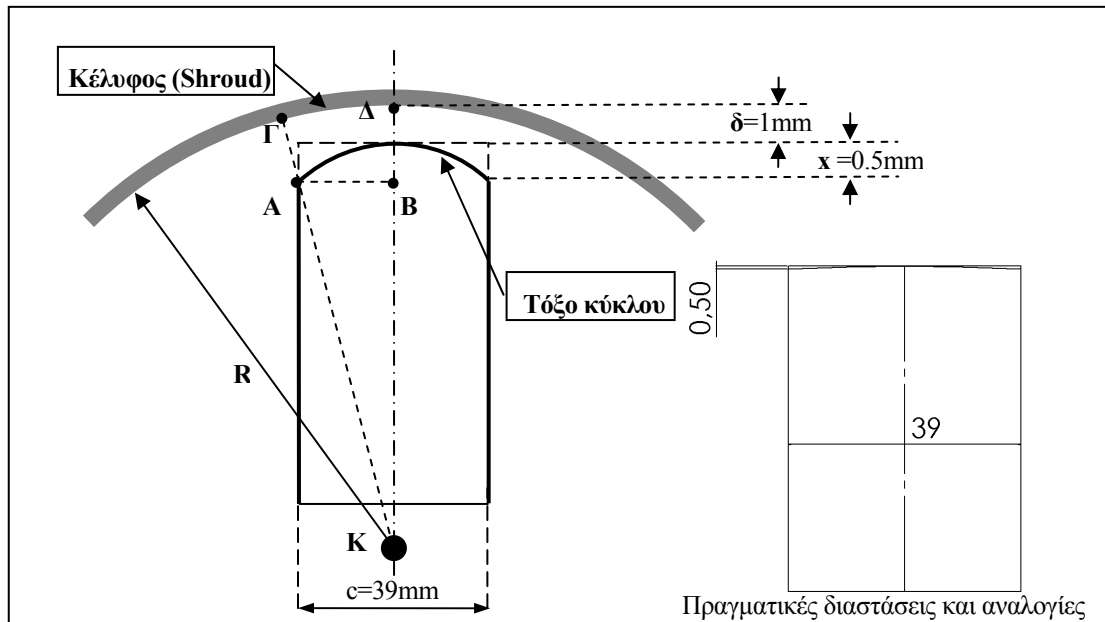
2.4.1 Διαμόρφωση πτερυγίων για ρύθμιση ακτινικού διακένου.

Το ακτινικό διάκενο των πτερυγίων αποφασίσαμε να το ρυθμίσουμε στο 1mm που είναι μια τυπική τιμή. Θα μπορούσε να γίνει και μικρότερο για καλύτερες επιδόσεις, όμως προτιμήσαμε να διασφαλίσουμε την ακεραιότητα των πτερυγίων, αφού με πιο μικρό διάκενο, οι κραδασμοί και τα σφάλματα κυλινδρικότητας των κελυφών είναι πιθανές αιτίες επαφής των πτερυγίων στο κέλυφος.

Για να δημιουργήσουμε ακτινικό διάκενο 1mm, δεν φτάνει μόνο το κόψιμο των πτερυγίων στη σωστή διάσταση, χρειάζεται και η διαμόρφωση του ακροπτερυγίου ώστε κάθε σημείο του ακροπτερυγίου να απέχει 1mm από το κέλυφος. Δηλαδή, πρέπει το ακροπτερύγιο να τροχισθεί ώστε να διαμορφωθεί μια καμπύλη. Βέβαια, αυτή η καμπύλη

θα έπρεπε να αλλάζει κάθε φορά που αλλάζει η γωνία stagger, πράγμα που δε μπορούμε να το κατασκευάσουμε. Αυτό που κάναμε είναι να διαμορφώσουμε στο ακροπτερύγιο ένα τόξο κύκλου, το οποίο για μια τυπική γωνία stagger του πτερυγίου θα απέχει από το κέλυφος 1mm στην ακμή πρόσπτωσης, ακμή εκφυγής και στο μέσο του ακροπτερυγίου.

Στο Σχήμα 2.31 φαίνεται η γεωμετρία στο ακροπτερύγιο όταν το πτερύγιο έχει γωνία stagger 0°. Για αυτήν τη περίπτωση θα κάνουμε την ανάλυση μιας και είναι η δυσμενέστερη όσον αφορά στον κίνδυνο επαφής των πτερυγίων στο κέλυφος.



Σχήμα 2.31: Γεωμετρία στο TIP των πτερυγίων και ρύθμιση ακτινικού διακένου.

Κοιτώντας το Σχήμα 2.31, για να υπολογίσουμε το τόξο κύκλου του ακροπτερυγίου αρκεί να γνωρίζουμε το μήκος x . Εφ' όσον εμείς επιθυμούμε κάθε σημείο του ακροπτερυγίου να απέχει από το κέλυφος απόσταση $\delta=1\text{mm}$, τότε για τις πλευρές του σχήματος θα ισχύει ότι :

$$AK = GK - GA = R - \delta$$

$$KB = K\Delta - \Delta B = R - \delta - x$$

$$AB = c/2$$

Το τρίγωνο ABK είναι ορθογώνιο άρα ισχύει ότι :

$$(R - \delta)^2 = (R - \delta - x)^2 + \frac{c^2}{4} \Rightarrow x^2 - 2(R - \delta)x + \frac{c^2}{4} = 0$$

Στη διάταξή μας η ακτίνα του κελύφους είναι $R=274.5\text{mm}$, το διάκενο $\delta=1\text{mm}$ και η χορδή $c=39\text{mm}$. Έτσι, λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς x , βρίσκουμε ότι $x=0.696\text{mm}$. Όμως, η γωνία stagger δεν θα είναι ποτέ 0°, με αποτέλεσμα όταν η stagger είναι λόγου χάρη 45° το x θα πρέπει να είναι μικρότερο. Για το λόγο αυτό, επιλέξαμε για το x την τιμή $x=0.5\text{mm}$. Με απλή γεωμετρία μπορούμε να δούμε ότι για $x=0.5\text{mm}$ η

ακτίνα καμπυλότητας του κυκλικού τόξου που πρέπει να έχει το ακροπερύγιο είναι $R_c=380.5\text{mm}$. Στο Σχήμα 2.31 δεξιά, φαίνεται η πραγματική διάσταση του κυκλικού αυτού τόξου. Να προσθέσουμε, ότι πιο μικρό τόξο από αυτό θα μπορούσε μόνο με CNC να κατασκευαστεί, και για το λόγο αυτό επιλέξαμε αυτό το κυκλικό τόξο.

Για την διαμόρφωση αυτή λοιπόν, μετρήσαμε και χαράξαμε με ψηφιακό χαράκτη τα σημεία στα οποία έπρεπε να αφαιρεθεί το υλικό από τα ακροπερύγια. Στη συνέχεια, τροχίσσαμε χειροκίνητα τα περύγια σε επιτραπέζιο τροχό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.32.

Στο Σχήμα 2.33 φαίνεται το ακτινικό διάκενο στη συναρμολογημένη διάταξη.



Σχήμα 2.32: Τροχίσμα των περυγίων για δημιουργία του κυκλικού τόξου στο TTP.

Σχήμα 2.33: Ο δίσκος με τα περύγια τοποθετημένος μέσα στη διάταξη. Διακρίνεται το ακτινικό διάκενο.

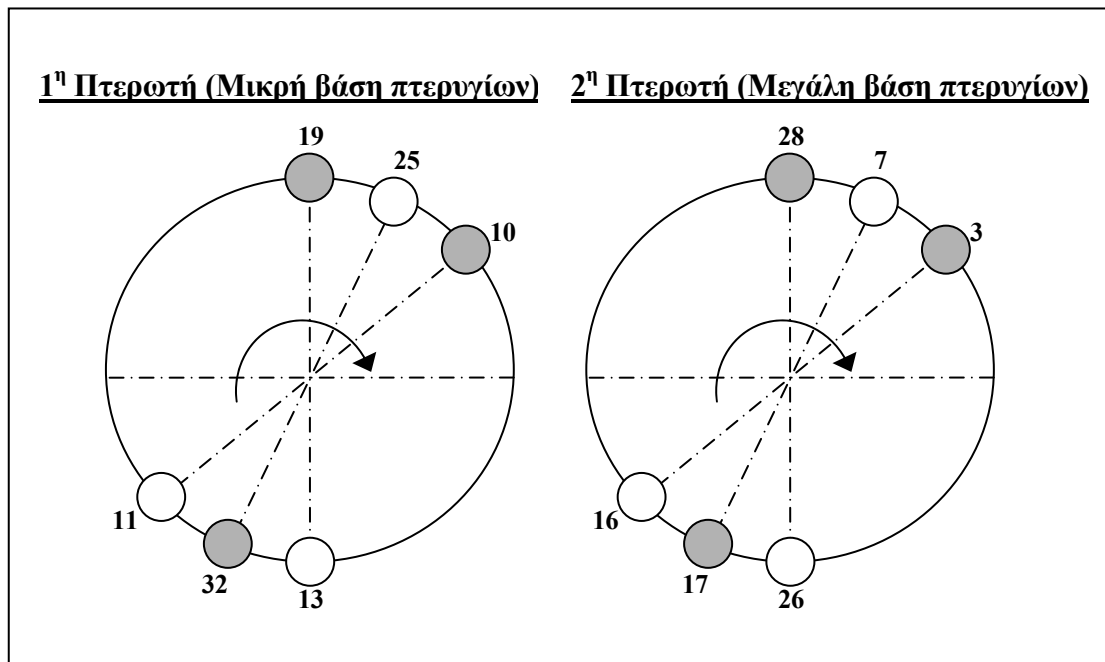
2.4.2 Τοποθέτηση περυγίων στους δίσκους συγκράτησης.

Ταξινόμηση περυγίων ανάλογα το βάρος τους

Αφού τα περύγια τροχίσθηκαν και ολοκληρώθηκε η διαμόρφωσή τους, ζυγίστηκαν σε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας για να μετρηθεί το βάρος τους, το οποίο προφανώς διαφέρει από περύγιο σε περύγιο. Η διαφορά αυτή του βάρους μεταξύ των περυγίων αν και μικρή, είναι ικανή να προκαλέσει αζυγοσταθμία. Η τοποθέτησή τους στους δίσκους έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχουμε τη μικρότερη δυνατή αζυγοσταθμία. Η ιδέα είναι η εξής : Έστω ότι έχουμε 4 περύγια Α, Β, Γ, Δ με το Α να είναι το βαρύτερο και το Δ το ελαφρύτερο. Τοποθετούμε τα δύο βαρύτερα, δηλαδή το Α και το Β, αντιδιαμετρικά στο δίσκο. Στη συνέχεια τοποθετούμε τα δύο επόμενα αμέσως βαρύτερα, δηλαδή το Γ και το Δ, αντιδιαμετρικά ώστε το ελαφρύτερο από τα Γ, Δ, δηλαδή το Γ να βρίσκεται δίπλα στο βαρύτερο από το προηγούμενο ζεύγος, δηλαδή δίπλα στο Α. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται για τα υπόλοιπα περύγια. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.2) παρουσιάζονται τα βάρη των περυγίων και η σωστή σειρά τοποθέτησής τους, και στο Σχήμα 2.34 ο τρόπος τοποθέτησης σχηματικά.

1 ^η Πτερωτή (Μικρή βάση πτερυγίων)			2 ^η Πτερωτή (Μεγάλη βάση πτερυγίων)		
α/α Πτερυγίου	Βάρος (g) (Μειούμενη σειρά)	α/α Πτερυγίου (Σειρά τοποθέτησης)	α/α Πτερυγίου	Βάρος (g) (Μειούμενη σειρά)	α/α Πτερυγίου (Σειρά τοποθέτησης)
19	96.7	19	28	119.7	28
13	95.8	13	26	118.3	26
32	95.7	25	17	118.1	7
25	94.5	32	7	117.3	17
10	94	10	3	117	3
11	93.9	11	16	117	16
16	93.6	5	11	116.7	10
5	93.6	16	10	116.7	11
20	93.5	20	19	116.2	19
34	93.4	34	27	115.9	27
8	93.4	23	15	115.8	12
23	93	8	12	115.6	15
7	92.4	7	8	115.4	8
27	92.4	27	22	114.8	22
33	92.1	18	33	113.9	20
18	91.5	33	20	112.9	33
29	91.4	29	2	112.8	2
14	90.9	14	6	112.8	6
26	90.2	24	1	112.4	30
24	90.1	26	30	112.1	1
17	88.6	17	18	112.1	18
22	88.6	22	4	111.9	4
2	87.9	9	25	111.9	32
9	87.3	2	32	111.6	25
15	87.2	15	23	111.4	23
31	86.7	31	24	111.2	24
28	86.5	12	5	111	9
12	86.3	28	9	110	5
3	86.2	3	13	109.9	13
4	85.9	4	34	109.8	34
30	85.7	21	29	109.2	21
21	85.3	30	21	107.8	29
6	84.7	6	31	105.8	31
1	83.7	1	14	105.4	14

Πίνακας 2.2: Σειρά τοποθέτησης πτερυγίων στις πτερωτές ανάλογα με το βάρος τους (βλ. και Σχήμα 2.34).



Σχήμα 2.34: Σχηματική άποψη της ταξινόμησης των πτερυγίων στους δίσκους, ανάλογα με το βάρος τους (βλ. και Πίνακας 2.2). Στα αντιδιαμετρικά ζευγάρια το γκρι είναι βαρύτερο και το λευκό ελαφρύτερο.

Ρύθμιση της επιθυμητής γωνίας κλίσης (stagger) των πτερυγίων

Η ρύθμιση της γωνίας κλίσης (stagger) των πτερυγίων επάνω στους δίσκους απαιτεί τη γνώση της γωνίας συστροφής (twist angle) των πτερυγίων. Ο λόγος είναι ότι μας ενδιαφέρει η γωνία κλίσης των πτερυγίων στη μέση ακτίνα R_m και για να ρυθμίσουμε τη γωνία κλίσης στη μέση ακτίνα πρέπει να γνωρίζουμε τη συστροφή του πτερυγίου ώστε να μπορούμε κατάλληλα να ρυθμίσουμε τη γωνία κλίσης στο πόδι (Hub) αφού μόνο εκεί μπορεί να γίνει αξιόπιστη και εύκολη ρύθμιση.

Η γωνία συστροφής μετρήθηκε με βαρυτικό μοιρογνωμόνιο σε διάφορες θέσεις του εκπετάσματος των πτερυγίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.35 και στο Σχήμα 2.36. Η ακρίβεια μέτρησης που έχουμε με το μοιρογνωμόνιο αυτό είναι $\pm 0.5^\circ$. Βέβαια, ο τρόπος που μετράμε δεν είναι απόλυτα ακριβής, καθώς το μοιρογνωμόνιο δεν ακουμπά επάνω στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής. Ωστόσο, λόγω των μικρών διαστάσεων της αεροτομής, το σφάλμα που έχουμε εκτιμούμε ότι είναι κάτω από 0.5° .

Μετρήσαμε τη γωνία συστροφής πέντε πτερυγίων από κάθε πτερωτή. Για την 1^η πτερωτή τα πτερύγια (μικρή βάση) έχουν γραμμική μεταβολή της γωνίας κλίσης από το hub στο tip με τη γωνία συστροφής να είναι κατά μέσο όρο $\varphi_t = 3.9^\circ \approx 4^\circ$. Συγκεκριμένα, μετρήσαμε τα πτερύγια με α/α 2-2, 2-31, 2-28, 2-4, 2-30. Για την 2^η πτερωτή τα πτερύγια (μεγάλη βάση) έχουν γραμμική μεταβολή της γωνίας κλίσης από τη μέση ακτίνα R_m στο tip με τη γωνία συστροφής να είναι κατά μέσω όρο $\varphi_t = 2.2^\circ \approx 2^\circ$, ενώ από

το hub έως τη μέση ακτίνα R_m η γωνία κλίσης είναι σταθερή άρα η γωνία συστροφής είναι 0° . Συγκεκριμένα, μετρήσαμε τα περύγια με α/α 1-10, 1-3, 1-7, 1-19, 1-12.



Σχήμα 2.35: Ρύθμιση της γωνίας κλίσης του περύγιου στο Hub στις 0° με χρήση βαρυντικού μοιρογνωμονίου.



Σχήμα 2.36: Μέτρηση της γωνίας κλίσης σε διάφορες θέσεις του εκπετάσματος, για εύρεση της γωνίας συστροφής (twist angle).

Πρέπει να σημειώσουμε ότι τα περύγια της 2^{ης} περωτής (μεγάλη βάση περυγίων) έχουν ανάποδη συστροφή από αυτή που συνηθίζεται στις στροβιλομηχανές, δηλαδή όσο μεγαλώνει η ακτίνα, η γωνία κλίσης μικραίνει, βλέπει το περύγιο δηλαδή πιο αξονικά τη ροή. Αυτό οφείλεται στο ότι τα περύγια προέρχονται από ένα περύγιο του J-79 κομμένο στη μέση.

Η ρύθμιση της γωνίας κλίσης των περυγίων επάνω στις περωτές γίνονται με τη χρήση ενός μεταλλικού ρυθμιστή που κατασκευάσαμε (βλ. Σχήμα 2.37 και Σχήμα 2.38). Με ένα μηχανουργικό μοιρογνωμόνιο ρυθμίζουμε την αντίστοιχη γωνία στον ρυθμιστή και σφίγγουμε τον κοχλία ώστε να τον σταθεροποιήσουμε στην γωνία αυτή. Έπειτα, με επιφάνεια αναφοράς την επίπεδη επιφάνεια (δακτύλιος) του δίσκου ακουμπάμε τη χορδή στο hub του περυγίου, επάνω στο στέλεχος του ρυθμιστή, και σφίγγουμε τα περύγια.



Σχήμα 2.37: Ρύθμιση του ρυθμιστή γωνίας stagger στην επιθυμητή γωνία .



Σχήμα 2.38: Ο ρυθμιστής γωνίας stagger επί τω έργω.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν και για γωνία συστροφής φ_t , για να ρυθμίσουμε την επιθυμητή γωνία κλίσης γ_m στη μέση ακτίνα R_m , τότε η γωνία κλίσης γ_h στο hub και η γωνία φ_p του ρυθμιστή πρέπει να είναι :

Για την 1^η Πτερωτή (μικρή βάση πτερυγίων) $\varphi_t = 4^\circ$ από το hub ως την R_m .

$$\gamma_h = \gamma_m - \varphi_t/2 = \gamma_m - 2$$

$$\varphi_p = \pi/2 - \gamma_h$$

Για την 2^η Πτερωτή (μεγάλη βάση πτερυγίων) $\varphi_t = 0^\circ$ από το hub ως την R_m .

$$\gamma_h = \gamma_m - \varphi_t/2 = \gamma_m$$

$$\varphi_p = \pi - (\pi/2 - \gamma_h) = \pi/2 + \gamma_h$$

Προένταση των περικοχλίων των πτερυγίων με ροπόκλειδο

Η πρόσδεση των πτερυγίων επάνω στους δίσκους γίνεται μέσω των διαμορφωμένων με σπείρωμα άκρων των πτερυγίων στο οποίο βιδώνεται το περικόχλιο. Λόγω του μεγάλου φορτίου λειτουργίας των πτερυγίων, κυρίως από τη φυγόκεντρο δύναμη, ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός αντοχής της κοχλιοσύνδεσης και ο υπολογισμός της απαιτούμενης ροπής προέντασης των κοχλιοσυνδέσεων. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται αναλυτικά στο παράρτημα Π1.3. Η εφαρμογή της κατάλληλης ροπής προέντασης γίνεται με χρήση ροπόκλειδου όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2.40. Αρκεί εδώ να αναφέρουμε ότι τα περικόχλια των πτερυγίων της 1^{ης} πτερωτής (μικρή βάση πτερυγίων) τα συσφίγγουμε με ροπή 7Nm και τα περικόχλια των πτερυγίων της 2^{ης} πτερωτής (μεγάλη βάση πτερυγίων) τα συσφίγγουμε με ροπή 15Nm.



Σχήμα 2.39: Οι θέσεις των αριθμημένων πτερυγίων σε ταξινόμηση ανάλογα με το βάρος τους .



Σχήμα 2.40: Σύσφιξη των πτερυγίων στους δίσκους με χρήση ροπόκλειδου.

2.5 Σχεδιασμός και κατασκευή χειριστηρίων ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων διάταξης.

Στη διάταξη έχουμε τρεις ηλεκτρικούς κινητήρες (H/K). Έναν AC 3Φ H/K 45kW για την κίνηση της 1^{ης} πτερωτής, έναν DC H/K 42 kW για την κίνηση της 2^{ης} πτερωτής και έναν AC 3Φ H/K 0.18kW για την κίνηση του κώνου της διάταξης στραγγαλισμού παροχής. Ο έλεγχος των στροφών των κινητήρων γίνεται μέσω αναστροφέα (inverter) για τους AC κινητήρες και μέσω θυρίστορ για τον DC κινητήρα. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι απαραίτητο να γίνεται ο χειρισμός των κινητήρων από το δωμάτιο ελέγχου για λόγους ασφαλείας και προφανώς άνεσης. Έτσι, αναγκαίος ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή των ενσύρματων τηλεχειριστηρίων με τα οποία θα ελέγχουμε τα inverter των AC H/K και το θυρίστορ του DC H/K.

2.5.1 Χειριστήριο ελέγχου AC 3Φ κινητήρα πρώτης πτερωτής.

Το inverter του H/K της 1^{ης} πτερωτής είναι φίρμας LG τύπου iP5A και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρατίθενται στο Σχήμα Π5.11 του παραρτήματος Π5. Το inverter αυτό έχει εισόδους και εξόδους σήματος για τη ρύθμιση διάφορων παραμέτρων με εξωτερικό χειριστήριο. Επίσης έχει πηγή τάσης 12V χαμηλής ισχύος για την τροφοδοσία ποτενσιόμετρου για τη ρύθμιση της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοσίας του κινητήρα, άρα για τον έλεγχο των στροφών του.

Για τον σχεδιασμό του χειριστηρίου θέσαμε τους παρακάτω **στόχους** :

1. Η ρύθμιση των στροφών να είναι άμεση, εύκολη και ακριβής.
2. Να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της φοράς περιστροφής του κινητήρα με ασφαλή τρόπο.
3. Να υπάρχει η δυνατότητα για άμεσο σταμάτημα του κινητήρα σε περίπτωση κινδύνου.
4. Να είναι εμφανές εάν τροφοδοτείται ή όχι με ρεύμα το inverter.
5. Η εργονομία τόσο του εξωτερικού όσο και του εσωτερικού του χειριστηρίου (καλωδιώσεις κλπ).
6. Η ασφάλεια του χρήστη έναντι ηλεκτροπληξίας.

Για τον 1^ο στόχο, η καλύτερη λύση είναι η χρήση γραμμικού ποτενσιόμετρου, όπου μάλιστα προτείνεται και στο εγχειρίδιο χρήσης του inverter.

Για τον 2^ο στόχο, επιλέχθηκε η χρήση δύο διακοπών, έναν για κάθε φορά περιστροφής. Για να έχουμε εποπτεία της φοράς περιστροφής επιλέχθηκαν διακόπτες με ενσωματωμένο λαμπτήρα χαμηλής ισχύος. Η τροφοδοσία των λαμπτήρων είναι δυνατή από πηγή τάσης του inverter. Για ασφάλεια έναντι στην στη βλάβη του inverter ή του H/K από βίαιη αλλαγή της φοράς περιστροφής του H/K, προστέθηκε και άλλος ένας διακόπτης τύπου ON-ON ώστε να χρειάζεται το πάτημα δύο διακοπών για την αλλαγή

της φοράς περιστροφής. Έτσι, ελαττώνουμε τις πιθανότητες για μια κατά λάθος βίαιη αλλαγή περιστροφής.

Για τον 3^ο στόχο, επιλέχθηκε η χρήση ενός μπουτόν με το πάτημα του οποίου ο κινητήρας επιβραδύνει άμεσα και σταματά.

Για τον 4^ο στόχο, επιλέχθηκε η χρήση ενός LED στο χειριστήριο, το οποίο τροφοδοτείται από το inverter όταν το τελευταίο τροφοδοτείται με ρεύμα.

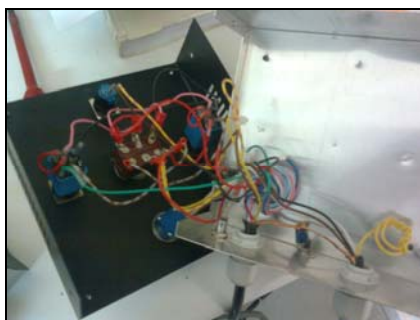
Για τον 5^ο στόχο, επιλέχθηκε ο εγκλεισμός των παραπάνω εξαρτημάτων μέσα σε ένα μεταλλικό κουτί ειδικό για τέτοιες κατασκευές. Επίσης, οι ετικέτες και τα χρώματα των διακοπών καθώς και η θέση τους επιλέχθηκαν έτσι ώστε να υπάρχει άνεση στη χρήση του χειριστηρίου, ενώ παράλληλα οι καλωδιώσεις στο εσωτερικό του κουτιού να είναι εύκολα προσβάσιμες για συντήρηση ή επισκευή.

Για τον 6^ο στόχο, συνδέσαμε μέσω καλωδίου το σώμα του κουτιού του χειριστηρίου με την γείωση του inverter.

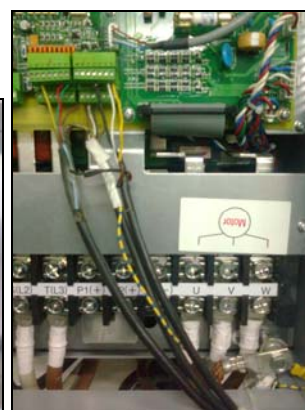
Αποτέλεσμα λοιπόν του παραπάνω συλλογισμού – σχεδιασμού είναι το χειριστήριο που φαίνεται στο Σχήμα 2.41 και στο Σχήμα 2.42. Στο Σχήμα 2.43 φαίνονται οι συνδέσεις των καλωδίων του χειριστηρίου στο inverter. Το ηλεκτρολογικό σχέδιο του χειριστηρίου παρατίθεται στο παράρτημα Π6.



Σχήμα 2.41: Χειριστήριο ελέγχου AC 3Φ κινητήρα πρώτης πτερωτής.



Σχήμα 2.42: Καλωδιώσεις χειριστηρίου ελέγχου AC 3Φ κινητήρα πρώτης πτερωτής.



Σχήμα 2.43: Καλωδιώσεις inverter AC 3Φ κινητήρα πρώτης πτερωτής .

2.5.2 Χειριστήριο ελέγχου DC κινητήρα δεύτερης πτερωτής.

Ακολουθώντας συλλογισμό παρόμοιο με τον παραπάνω κατασκευάστηκε και το χειριστήριο του Η/Κ της 2^{ης} πτερωτής. Εδώ όμως, δεν έχουμε τη δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής από το χειριστήριο, αφού αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με αλλαγή των καλωδιώσεων μέσα από τη καμπίνα τροφοδοσίας του Η/Κ. Στο χειριστήριο αυτό ο έλεγχος στροφών γίνεται με ποτενσιόμετρο που είναι τοποθετημένο στο χειριστήριο και η εκκίνηση ή το σταμάτημα του κινητήρα μέσω δύο μπουτόν. Λόγω της απλότητας του χειριστηρίου, δεν δημιουργήσαμε κάποιο ηλεκτρολογικό σχέδιο.

Το χειριστήριο και η καμπίνα ρύθμισης στροφών – τροφοδοσίας του Η/Κ φαίνονται στο Σχήμα 2.44 και στο Σχήμα 2.45 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.44: Χειριστήριο ελέγχου DC κινητήρα δεύτερης πτερωτής.



Σχήμα 2.45: Καμπίνα ρύθμισης στροφών DC κινητήρα δεύτερης πτερωτής.

2.5.3 Χειριστήριο ελέγχου AC 3Φ κινητήρα διάταξης στραγγαλισμού της ροής.

Το inverter του Η/Κ της διάταξης στραγγαλισμού παροχής είναι φίρμας AcTech τύπου SF420 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρατίθενται στο Σχήμα Π5.12 του παραρτήματος Π5. Το inverter αυτό έχει εισόδους και εξόδους σήματος για τη ρύθμιση διάφορων παραμέτρων με εξωτερικό χειριστήριο, καθώς και πηγή τάσης χαμηλής ισχύος για την τροφοδοσία εξωτερικών καταναλωτών (π.χ. led, ποτενσιόμετρο κλπ).

Για τον σχεδιασμό του χειριστηρίου θέσαμε τους παρακάτω **στόχους** :

1. Να υπάρχει η επιλογή τριών διαβαθμίσεων στις στροφές του Η/Κ και συνεπώς στη γραμμική ταχύτητα του κώνου της διάταξης στραγγαλισμού.
2. Να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της φοράς περιστροφής του κινητήρα ώστε να μπορούμε να κλείνουμε και να ανοίγουμε τη βάνα – κώνο ώστε να ελέγχουμε την παροχή.
3. Να υπάρχει η δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της θέσης του κώνου ώστε να έχουμε ακριβή έλεγχο της παροχής.
4. Να υπάρχει η δυνατότητα ορισμού των δύο οριακών θέσεων κίνησης του κώνου και μάλιστα όταν ο κώνος φτάνει σε κάποια από τις δύο οριακές θέσεις να υπάρχει ένδειξη στο χειριστήριο και παράλληλα να διακόπτεται η λειτουργία του Η/Κ προς αυτήν τη κατεύθυνση.

5. Να είναι εμφανές εάν τροφοδοτείται ή όχι με ρεύμα το inverter.
6. Η εργονομία τόσο του εξωτερικού όσο και του εσωτερικού του χειριστηρίου (καλωδιώσεις κλπ).
7. Η ασφάλεια του χρήστη έναντι ηλεκτροπληξίας.

Για τον **1^ο στόχο**, επιλέχθηκε η χρήση ενός διακόπτη τριών θέσεων τύπου ON-OFF-ON έτσι ώστε κάθε θέση να αντιστοιχεί σε προκαθορισμένο αριθμό στροφών που προηγουμένως έχουμε ρυθμίσει στο inverter. Οι επιλογές στροφών έγιναν δοκιμαστικά και είναι μια αργή, μια μέση και μια γρήγορη ταχύτητα ώστε να μπορούμε να ελέγχουμε ακριβέστερα την θέση του κώνου, άρα και την παροχή.

Για τον **2^ο στόχο**, επιλέχθηκε η χρήση ενός διακόπτη τύπου ON-ON ώστε κάθε θέση να αντιστοιχεί στην κάθε φορά περιστροφής.

Για τον **3^ο στόχο**, επιλέχθηκε η χρήση ενός μπουτόν τύπου NC ώστε όσο το πατάμε ο κινητήρας να λειτουργεί και όταν το αφήνουμε να σταματάει. Έτσι, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής ταχύτητας μπορούμε να έχουμε ακριβή έλεγχο στην παροχή.

Για τον **4^ο στόχο**, επιλέχθηκε η χρήση δύο διακοπών επαφής τύπου NC-NO, έναν για κάθε οριακή θέση. Οι διακόπτες αυτοί τοποθετούνται σταθερά σε προκαθορισμένη θέση ώστε να καθορίζουν το εύρος κίνησης του κώνου. Η ενεργοποίησή τους πραγματοποιείται μόλις το φορείο φτάσει στο τέρμα διαδρομής και ακουμπήσει επάνω τους. Τότε, η παροχή ρεύματος του led που βρίσκεται στο χειριστήριο ενεργοποιείται αφού είναι συνδεδεμένη με το NO του διακόπτη, ενώ παράλληλα διακόπτεται το σήμα για κατεύθυνση του Η/Κ αφού είναι συνδεδεμένο με το NC του διακόπτη. Έτσι, έχουμε ένδειξη του τέρματος της διαδρομής μέσω του led και σταμάτημα του Η/Κ εκεί ακόμα και αν συνεχίζουμε να πατάμε το μπουτόν έναρξης/σταματήματος του Η/Κ. Αλλάζοντας θέση στο διακόπτη κατεύθυνσης, μπορούμε έπειτα να εκκινήσουμε τον κινητήρα προς την άλλη κατεύθυνση.

Για τον **5^ο στόχο**, επιλέχθηκε η χρήση δύο LED επάνω στο χειριστήριο, τα οποία τροφοδοτούνται από το inverter όταν το τελευταίο τροφοδοτείται με ρεύμα. Τα led είναι συνδεδεμένα με το διακόπτη κατεύθυνσης, οπότε δίνουν και μια ένδειξη της θέσης κατεύθυνσης του διακόπτη.

Για τον **6^ο στόχο**, επιλέχθηκε ο εγκλεισμός των παραπάνω εξαρτημάτων μέσα σε ένα μεταλλικό κουτί ειδικό για τέτοιες κατασκευές. Επίσης, οι ετικέτες και τα χρώματα των διακοπών καθώς και η θέση τους επιλέχθηκαν έτσι ώστε να υπάρχει άνεση στη χρήση του χειριστηρίου, ενώ παράλληλα οι καλωδιώσεις στο εσωτερικό του κουτιού να είναι εύκολα προσβάσιμες για συντήρηση ή επισκευή.

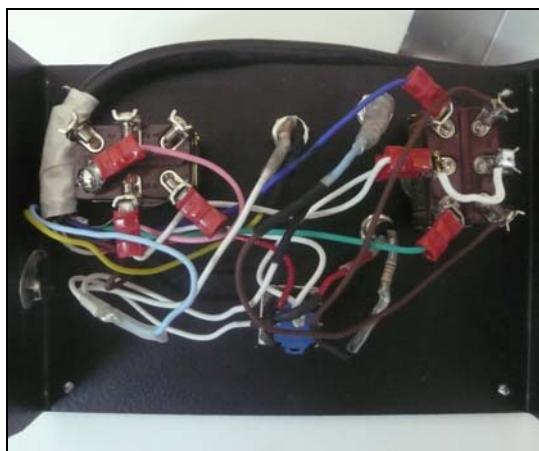
Για τον **7^ο στόχο**, συνδέσαμε μέσω καλωδίου το σώμα του κουτιού του χειριστηρίου με την γείωση του inverter.

Αποτέλεσμα λοιπόν του παραπάνω συλλογισμού – σχεδιασμού είναι το χειριστήριο που φαίνεται στο Σχήμα 2.46 και στο Σχήμα 2.47, όπως επίσης και οι διακόπτες ορίου διαδρομής που φαίνονται στο Σχήμα 2.48 και οι καλωδιώσεις στο

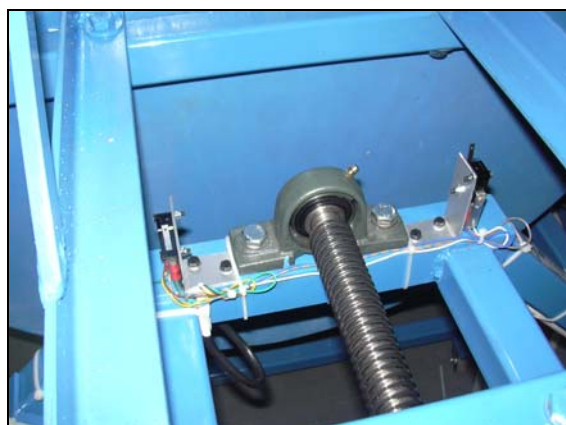
inverter που φαίνονται στο Σχήμα 2.49. Το ηλεκτρολογικό σχέδιο του χειριστηρίου παρατίθεται στο παράρτημα Π6.



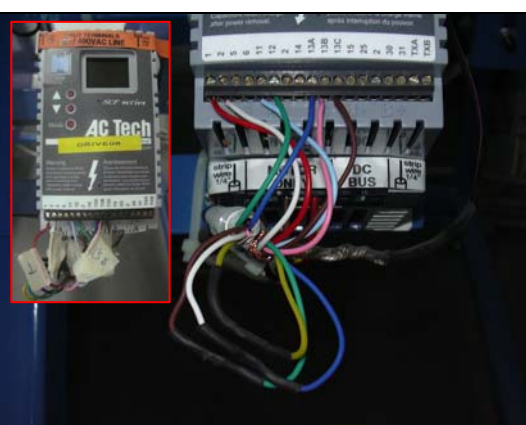
Σχήμα 2.46: Χειριστήριο ελέγχου AC 3Φ κινητήρα διάταξης στραγγαλισμού παροχής.



Σχήμα 2.47: Καλωδιώσεις χειριστηρίου ελέγχου AC 3Φ κινητήρα διάταξης στραγγαλισμού παροχής.



Σχήμα 2.48: Διακόπτες (2) ορίου διαδρομής της διάταξης στραγγαλισμού παροχής.



Σχήμα 2.49: Καλωδιώσεις inverter AC 3Φ κινητήρα διάταξης στραγγαλισμού παροχής.

2.6 Τροποποιήσεις, ρυθμίσεις και τελική μορφή διάταξης.

Η θέση σε λειτουργία της διάταξης απαιτεί κάποιες τροποποιήσεις και διαμορφώσεις με σκοπό την δυνατότητα εγκατάστασης του μετρητικού εξοπλισμού σε αυτήν. Παράλληλα, αναγκαία είναι η ρύθμιση ορισμένων βασικών συνιστών ώστε να εξασφαλίσουμε την αξιόπιστη, ομαλή και κατά συνέπεια ασφαλή λειτουργία της. Μετά το πέρας των τελευταίων αυτών επεμβάσεων, η διάταξη παίρνει πλέον την τελική της μορφή και είναι έτοιμη να υποδεχτεί τον μετρητικό εξοπλισμό ο οποίος αναλύεται στο κεφάλαιο 3.

2.6.1 Τροποποιήσεις και διαμορφώσεις επί της διάταξης.

Οι διαμορφώσεις επί της διάταξης αφορούν στην διάνοιξη οπών οι οποίες φέρουν σπείρωμα, καθώς και συγκόλληση μεταλλικών πλακιδίων. Η θέση των οπών αυτών και των μεταλλικών πλακιδίων είναι σε διάφορα σημεία του κελύφους του συμπιεστή και του αγωγού εισόδου και σκοπό έχουν την υποδοχή αισθητηρίων με τα οποία γίνεται η μέτρηση διαφόρων μεγεθών. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική περιγραφή των αισθητηρίων καθώς και της θέσης που τοποθετούνται επάνω στη διάταξη.

Οι τροποποιήσεις επί της διάταξης αφορούν στην αλλαγή της θέσης των περωτών. Στα προϋπάρχοντα σχέδια της διάταξης^[20], η 1^η περωτή (αυτή που πρώτη συναντά τον αέρα) ήταν αυτή με τη μεγάλη βάση περυγίων, δηλαδή η περωτή με τα περύγια που έχουν παχύτερη αεροτομή στο hub και κοχλία διάστασης περίπου M8. Η 2^η περωτή ήταν αυτή με τη μικρή βάση περυγίων, δηλαδή η περωτή με τα περύγια που έχουν λεπτότερη αεροτομή στο hub και κοχλία διάστασης περίπου M6. Αποφασίσαμε λοιπόν να αλλάξουμε τη θέση των περωτών ώστε η 1^η περωτή να είναι αυτή με τη μικρή βάση περυγίων και η 2^η περωτή να είναι αυτή με τη μεγάλη βάση περυγίων. Ο λόγος είναι ότι η 2^η περωτή φορτίζεται περισσότερο από την 1^η και αυτό φαίνεται από τα αποτελέσματα του κώδικα BLADE, καθώς επίσης και εκ των υστέρων από τις μετρήσεις που εκτελέσαμε και οι οποίες περιγράφονται στο κεφαλαίο 4. Παράλληλα, η μέχρι τώρα λογική είναι να στρέφεται η 2^η περωτή ταχύτερα από την πρώτη, με αποτέλεσμα η φυγόκεντρος δύναμη της 2^η θα είναι επίσης μεγαλύτερη. Έτσι λοιπόν, αφού η περωτή που θα είναι 2^η φορτίζεται περισσότερο προτιμούμε να τοποθετήσουμε ως 2^η τη περωτή που έχει μεγάλη βάση περυγίων και παχύτερο κοχλία, η οποία προφανώς αντέχει περισσότερο.

Το πλήρες σχέδιο με τις τροποποιήσεις και τις διαμορφώσεις που έγιναν, καθώς και με την επισήμανση των συνιστωσών που προστέθηκαν στη διάταξη, παρουσιάζεται στο παράρτημα Π6 και είναι το σχέδιο ΔΙΑ-02 2/2.

2.6.2 Βασικές ρυθμίσεις και εποπτεία συνιστωσών για ομαλή λειτουργία διάταξης.

Οι βασικές ρυθμίσεις και έλεγχοι που έγιναν για τη διασφάλιση ομαλής και συνεπώς ασφαλούς λειτουργίας είναι οι εξής :

1. Ευθυγράμμιση αξόνων κίνησης 1^{ης} περωτής, ευθυγράμμιση άξονα με κέλυφος πρώτης περωτής και ευθυγράμμιση άξονα με κέλυφος 2^{ης} περωτής.
2. Ευθυγράμμιση των τροχαλιών κίνησης των περωτών καθώς και η τάνυση των ιμάντων κίνησης.
3. Ο υπολογισμός της ροπής προέντασης των κοχλιοσυνδέσεων που βρίσκονται στα περιστρεφόμενα μέρη της διάταξης.

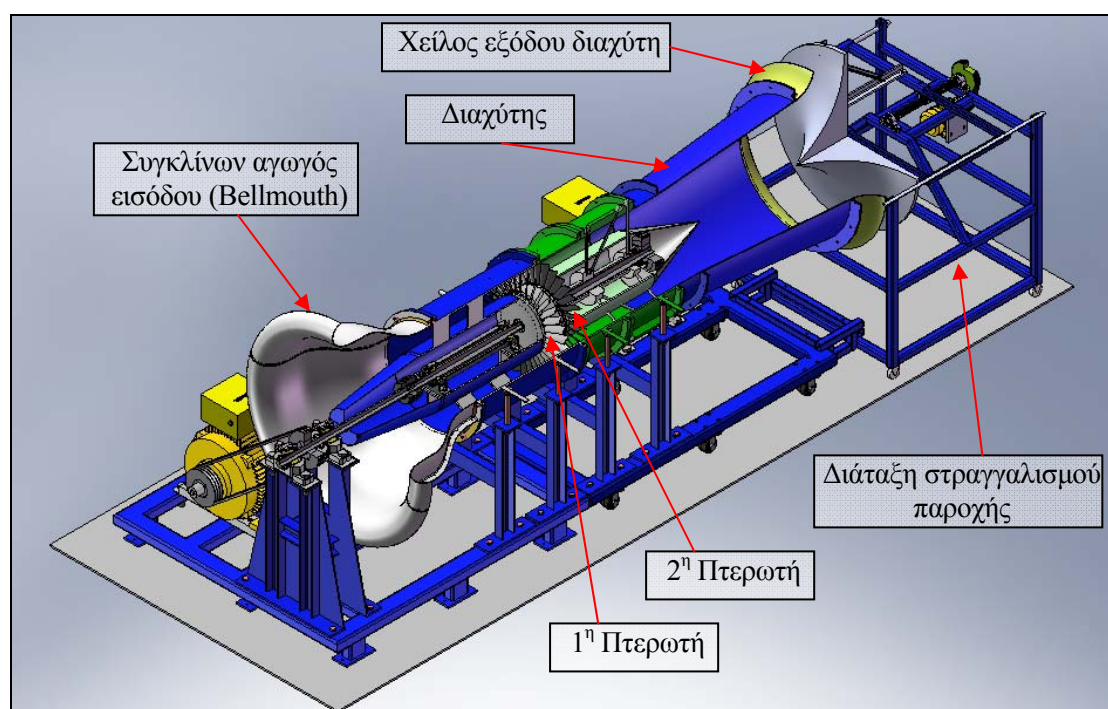
4. Ο έλεγχος αζυγοσταθμίας των πτερωτών και η ακτινική ταλάντωση των πτερυγίων κατά τη λειτουργία.

Οι παραπάνω ρυθμίσεις και υπολογισμοί καθώς και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίησή τους, αναλύονται στο παράρτημα Π1.

Σημαντικό είναι να δίνεται προσοχή στις παραπάνω ρυθμίσεις κάθε φορά που πρέπει να γίνει εποπτεία της ομαλής λειτουργίας και συντήρηση της διάταξης. Επιπλέον συνιστώσες που πρέπει να εποπτεύεται η ομαλή λειτουργία τους είναι οι εδράσεις των αξόνων κίνησης των πτερωτών, όσον αφορά στη λίπανσή τους. Στο παράρτημα Π1 δίνονται τέτοιες οδηγίες, καθώς και στο σχέδιο ΔΙΑ-02 1/2 του παραρτήματος Π6 όπου επισημαίνονται τα στοιχεία εκείνα της διάταξης που πρέπει να εποπτεύονται συχνά.

2.6.3 Παρουσίαση διάταξης – Επισήμανση συνιστωσών.

Η τελική πλέον μορφή της διάταξης φαίνεται στο σχέδιο CAD στο Σχήμα 2.50 στο οποίο διακρίνουμε τις βασικές συνιστώσες. Τα σχέδια με διαστάσεις και λεπτομέρειες παρουσιάζονται στο παράρτημα Π6 και είναι τα σχέδια ΔΙΑ-02 1/2 και ΔΙΑ-02 2/2. Φωτογραφίες της διάταξης με εγκατεστημένο το μετρητικό εξοπλισμό παρουσιάζονται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 2.50: Τελική μορφή διάταξης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

3

Μετρητική αλυσίδα – Πειραματικός εξοπλισμός – Διαδικασία μετρήσεων

Το κεφάλαιο ξεκινά από μια συνολική άποψη και περιγραφή της μετρητικής αλυσίδας, και στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα όργανα και αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις στην εγκατάσταση. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι τύποι και τα χαρακτηριστικά των οργάνων, ο τρόπος χειρισμού τους, οι διαδικασίες και η καμπύλες βαθμονόμησης τους, οι θέσεις που τοποθετούνται και τα μεγέθη που μετράμε με αυτές. Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος που τα όργανα συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν τη μετρητική αλυσίδα που χρησιμοποιούμε, και τέλος περιγράφονται τα βασικά στοιχεία εκτέλεσης μιας μέτρησης.

3.1 Παρουσίαση μετρητικής εγκατάστασης.

Η μετρητική πλέον εγκατάσταση φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Διακρίνουμε τη διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών και τα όργανα – αισθητήρες που είναι συνδεδεμένα σε αυτήν.



Σχήμα 3.1: Η μετρητική εγκατάσταση.



(Σχήμα 3.1 συνέχεια) Η μετρητική εγκατάσταση.

3.1.1 Θέσεις μέτρησης – Όργανα μέτρησης.

Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούμε στην εγκατάσταση, είναι τέτοιας ποιότητας και ποσότητας ώστε να μπορούμε να μετρήσουμε μεγέθη που μας δίνουν τη δυνατότητα 1^ο) να έχουμε εποπτεία της ομαλής λειτουργίας της εγκατάστασης επιβλέποντας και καταγράφοντας τους κραδασμούς της, και 2^ο) να κατασκευάσουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας κάθε βαθμίδας ξεχωριστά, αλλά και των δύο μαζί. Η χρησιμότητα των μεγεθών της ροής που καταγράφουμε για τη χάραξη των χαρτών των βαθμίδων του συμπιεστή, θα γίνει περισσότερο κατανοητή στο κεφάλαιο 4 στο οποίο με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων υπολογίζουμε τις επιδόσεις της διάταξης.

Βασική σύμβαση που κάνουμε, είναι η αρίθμηση των θέσεων στη διάταξη, ειδικά αυτών που αναφέρονται σε κύριες θέσεις της ροής. Αυτές είναι :

Θέση 01 : Η αξονική θέση που βρίσκεται η μεγάλη διάμετρος (είσοδος) του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth).

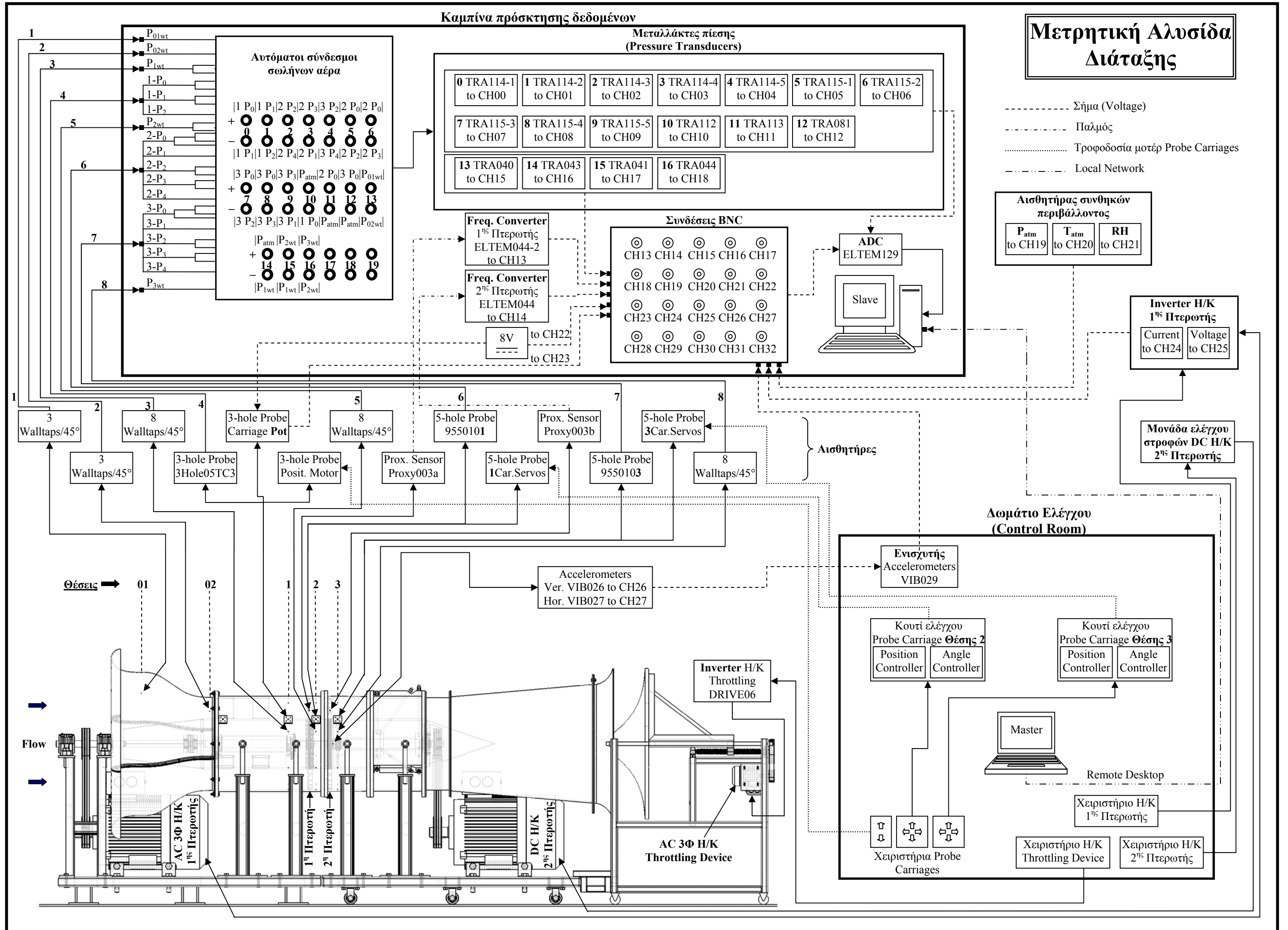
Θέση 02 : Η αξονική θέση που βρίσκεται η μικρή διάμετρος (έξοδος) του συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth).

Θέση 1 : Η αξονική θέση ανάντι της 1^{ης} πτερωτής.

Θέση 2 : Η αξονική θέση ανάντι της 2^{ης} πτερωτής (και προφανώς κατάντι της 1^{ης} πτερωτής).

Θέση 3 : Η αξονική θέση κατάντι της 2^{ης} πτερωτής.

Παρακάτω, παρουσιάζονται συνολικά στο Α3 φύλλο και στον πίνακα (Πίνακας 3.1) οι θέσεις, τα όργανα και τα μεγέθη μέτρησης της εγκατάστασης, (βλ. και ΔΙΑ-02 2/2,Π6).



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	Ανάντι 2 ^{ης} Πτερωτής	Κατακόρυφος Κραδασμός (m/s^2)	Accelerometer VIB026
27	VIB029	±5g	Ανάντι 2 ^{ης} Πτερωτής	Οριζόντιος Κραδασμός (m/s^2)	Accelerometer VIB027

Πίνακας 3.1: Όργανα μέτρησης μετρητικής εγκατάστασης.

3.2 Αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας και πίεσης ρευστού.

Για τη μέτρηση της ταχύτητας και πίεσης του ρευστού στις επιθυμητές θέσεις, χρησιμοποιούμε σωλήνες πίεσης τριών και πέντε οπών (3-hole Probe, 5-hole Probe). Με τους αισθητήρες αυτούς μπορούμε να μετρήσουμε την ολική και την στατική πίεση καθώς και το διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού, στην θέση του πεδίου ροής που βρίσκεται τοποθετημένος ο αισθητήρας.

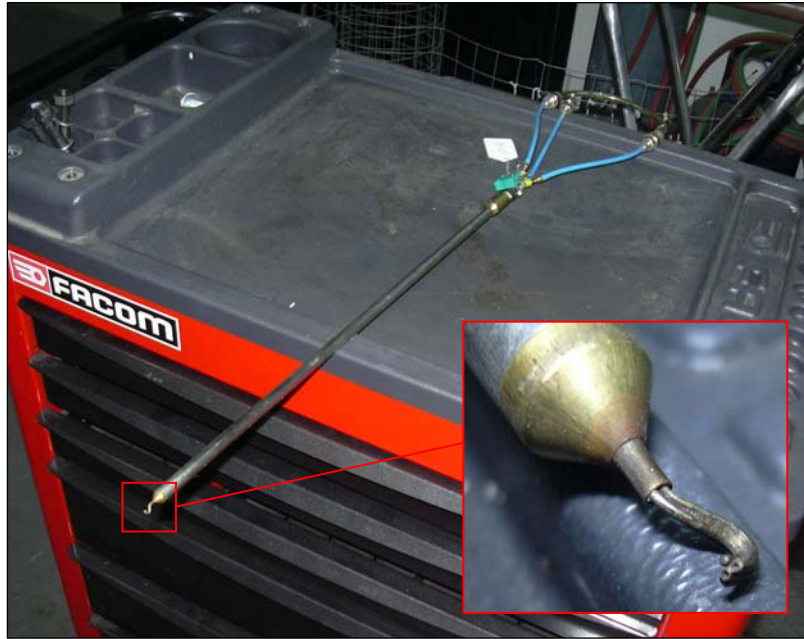
Η διαφορά του 3-hole Probe από τον 5-hole Probe είναι ότι με τον πρώτο μπορούμε να προσδιορίσουμε το διάνυσμα της ταχύτητας σε ένα επίπεδο, ενώ με τον δεύτερο στον χώρο. Για τον παραπάνω λόγο, επιλέχθηκε η χρήση ενός 3-hole Probe για την θέση 1, ανάντι της 1^{ης} περωτής, αφού εκεί το πεδίο ροής είναι κατά κύριο λόγο δισδιάστατο ακτινικά, λόγω της ομοιόμορφης εισερχόμενης ροής. Στις θέσεις 2 και 3, ανάντι και κατάντι της 2^{ης} περωτής αντίστοιχα, χρησιμοποιήσαμε 5-hole Probe επειδή εκεί έχουμε ακτινικά ανομοιόμορφη ροή, η οποία περιλαμβάνει και ακτινικές συνιστώσες της ταχύτητας.

Οι σωλήνες πίεσης είναι τοποθετημένοι επάνω σε φορεία (probe carriage), ώστε να μπορούμε να αλλάζουμε την ακτινική τους θέση, αλλά και να μπορούμε να τους περιστρέψουμε ως προς τον άξονά τους.

3.2.1 Σωλήνας πίεσης τριών οπών (3 hole Probe).

Ο σωλήνας πίεσης τριών οπών (3-hole Probe) (βλ. Σχήμα 3.2), είναι ένας σωλήνας ο οποίος έχει στο ένα άκρο του μια διαμόρφωση που περιλαμβάνει τρεις οπές οι οποίες σχηματίζουν ένα επίπεδο κάθετο στον σωλήνα. Οι τρεις αυτές οπές είναι ανεξάρτητες και μέσω μικρών συριγγίων εσωτερικά του σωλήνα, οδηγούνται στο άλλο άκρο του σωλήνα σε τρία ξεχωριστά σωληνάκια.

Στη διάταξή μας, χρησιμοποιούμε τον 3-hole Probe του εργαστηρίου, με κωδικό 3Hole05TC3 (βλ. Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Σωλήνας πίεσης τριών οπών (3-hole Probe) της διάταξης.

Όταν ο σωλήνας είναι τοποθετημένος έτσι ώστε το επίπεδο των οπών να περιέχει το διάνυσμα της ταχύτητας, τότε αυτό σχηματίζει μια γωνία α με τον άξονα της κεντρικής οπής (βλ. Σχήμα 3.3). Λόγω της γεωμετρίας λοιπόν της κεφαλής του σωλήνα, από κάθε οπή θα προκύπτει μια διαφορετική πίεση. Οι πιέσεις αυτές είναι : P_C ή P_0 είναι η πίεσης της κεντρικής οπής (center), P_L ή P_1 είναι η πίεσης της αριστερής οπής (left), P_R ή P_2 είναι η πίεσης της δεξιάς οπής (right). Ο συσχετισμός των πιέσεων αυτών μας δίνει τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής, μέσω των ακόλουθων παραμέτρων.

$$P_d = \frac{P_L - P_R}{q} \quad (3.1)$$

$$P_q = \frac{q}{q_{ref}} \quad (3.2)$$

$$P_p = \frac{P_C - P_{tref}}{q_{ref}} \quad (3.3)$$

$$q = P_C - \frac{P_L + P_R}{2} = P_C - P_L + \frac{P_L - P_R}{2} \quad (3.4)$$

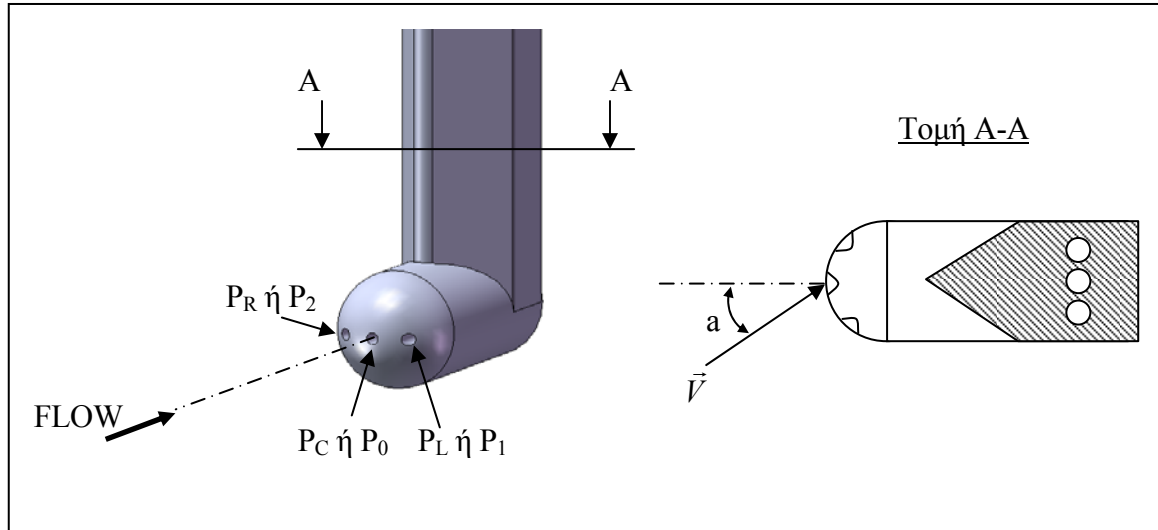
$$q_{ref} = P_{tref} - P_{sref} \quad (3.5)$$

$$P_{tref} = P_{sref} \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_{ref}^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.6)$$

$$T_{ref} = T_{sref} \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_{ref}^2 \right]^{-1} \quad (3.7)$$

$$V = M_{ref} \sqrt{\gamma RT_{ref}} \quad \text{ή} \quad V = \sqrt{\frac{2q_{ref}}{\rho}}, \quad \rho = \frac{P_{at}}{RT_{at}} \quad (3.8)$$

όπου για το πεδίο της ροής (δέσμη στη βαθμονόμηση) έχουμε : q_{ref} είναι η δυναμική πίεση, P_{tref} και P_{sref} είναι η ολική και η στατική αντίστοιχα. M_{ref} είναι ο αριθμός Mach, γ ο ισεντροπικός εκθέτης, R η σταθερά του αέρα και T_{tref} και T_{sref} η ολική και στατική θερμοκρασία αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστικά σωλήνα πίεσης τριών οπών (3-hole Probe).

Μπορεί να αποδειχθεί (ή να διαπιστωθεί πειραματικά) ότι οι τρεις παραπάνω παράμετροι είναι συνάρτηση μόνο της γωνίας a για μια σημαντική περιοχή τιμών της ταχύτητας της ροής. Έτσι, από τις παραπάνω εξισώσεις βλέπουμε ότι αν είναι γνωστές οι τιμές P_C , P_L , P_R και οι καμπύλες $P_d(a)$, $P_q(a)$, $P_p(a)$ μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως το διάνυσμα της ταχύτητας και η στατική και ολική πίεση με τα παρακάτω βήματα :

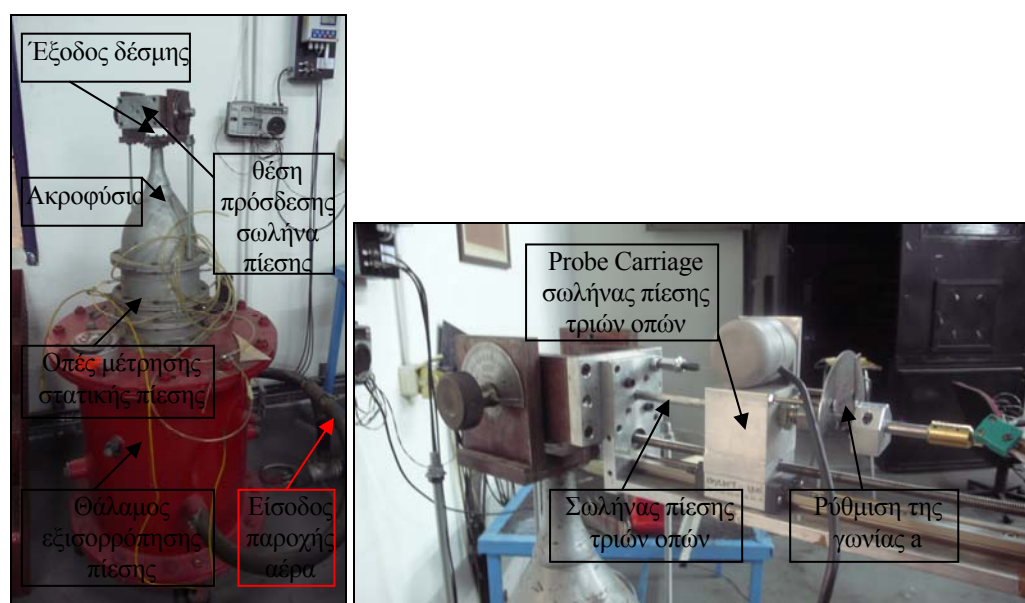
1. $q = q(P_C, P_L, P_R)$
2. $P_d = P_d(q, P_L, P_R)$
3. $P_d \rightarrow a \rightarrow P_q, P_p$
4. $P_q \rightarrow q_{ref}$
5. $P_p, q_{ref} \rightarrow P_{tref}$
6. $P_{tref}, q_{ref} \rightarrow P_{sref}$
7. $q_{ref} \rightarrow V$ ή $P_{tref}, P_{sref} \rightarrow M \rightarrow V$ για το συμπιεστό ρευστό

Οι καμπύλες $P_d(a)$, $P_q(a)$, $P_p(a)$ προσδιορίζονται με την βαθμονόμηση του σωλήνα, η οποία περιγράφεται παρακάτω.

3.2.2 Βαθμονόμηση σωλήνα τριών οπών – Καμπύλες βαθμονόμησης.

Για βαθμονόμηση του σωλήνα πίεσης τριών οπών, ο σωλήνας εισάγεται σε γνωστό πεδίο ροής και τοποθετείται σε θέσεις που αντιστοιχούν σε διάφορες γωνίες α . Σε κάθε θέση μετρούνται οι P_C , P_L , P_R και γνωρίζοντας την πίεση και την ταχύτητα, υπολογίζονται οι καμπύλες $P_d(\alpha)$, $P_q(\alpha)$, $P_p(\alpha)$.

Η διάταξη που χρησιμοποιήσαμε για τη βαθμονόμηση (βλ. Σχήμα 3.4), είναι μια σήραγγα ελεύθερης δέσμης η οποία τροφοδοτείται με αέρα από αεροφυλάκιο και η ταχύτητα της δέσμης ελέγχεται μέσω στρόφιγγας στο δίκτυο παροχής του αέρα.



Σχήμα 3.4: Διάταξη βαθμονόμησης σωλήνων πίεσης.

Οι ποσότητες που μετρήσαμε για τη διεξαγωγή της βαθμονόμησης είναι :

1. Πίεση περιβάλλοντος (απόλυτη) P_{at} , Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{at} , Σχετική υγρασία αέρα RH . Τα μεγέθη αυτά μετρήθηκαν με ψηφιακό αισθητήρα μέτρησης ατμοσφαιρικών συνθηκών (βλ. κεφάλαιο 3.4) που είναι εγκατεστημένος δίπλα από τη διάταξη. Η μέτρησή τους γίνεται ώστε να προσδιορίσουμε την σταθερά αέρα R και τον ισεντροπικό εκθέτη γ , μέσω σχέσεων για υγρό αέρα με χρήση προγράμματος σε Fortran (βλ. κεφάλαιο 4.3.1).
2. Ολική Θερμοκρασία της δέσμης T_{ref} , η οποία μετρήθηκε με θερμοστοιχείο εσωτερικά του ακροφυσίου στη μεγάλη διάμετρο. Φυσικά, εκεί μετράμε την στατική θερμοκρασία αλλά λόγω της πολύ μικρότερης ταχύτητας του αέρα στην μεγάλη διάμετρο σε σχέση με τη διάμετρο της δέσμης, ισχύει για τη μεγάλη διάμετρο ότι $T_t \approx T$ και επειδή στο ακροφύσιο έχουμε άεργη ροή έχουμε ότι $T_t = T_{ref}$, άρα $T_{ref} = T$. Έτσι, η στατική θερμοκρασία της δέσμης T_{ref} δίνεται από τη σχέση (3.7).

3. Η πίεση τροφοδοσίας της δέσμης, η οποία μετράται στο τοίχωμα του ακροφυσίου στη θέση της μεγάλης διαμέτρου (βλ. Σχήμα 3.4) μέσω οπών στο τοίχωμα. Ουσιαστικά, μετράμε την στατική πίεση εκεί η οποία όμως είναι η ολική πίεση της δέσμης λόγω της μεγάλης της διαμέτρου σε σχέση με τη διάμετρο της δέσμης. Έτσι, μετράμε με χρήση μεταλλάκτη πίεσης (βλ. κεφάλαιο 3.3) το $P_{tref} - P_{at}$. Όμως, η ταχύτητα της δέσμης μετράται μόλις έξω από το ακροφύσιο, άρα στο περιβάλλον, που σημαίνει ότι $P_{sref} = P_{at}$. Έτσι, μετράμε ουσιαστικά το $P_{tref} - P_{sref}$.
4. $P_C - P_{at}$, $P_C - P_L$, $P_L - P_R$ από σωλήνα πίεσης τριών οπών με χρήση μεταλλακτών πίεσης.
5. Γωνία α του σωλήνα από -24° έως $+24^\circ$ ανά 2° με χρήση μοιρογνωμονίου εγκατεστημένου επάνω στο probe carriage.
6. Για κάθε γωνία α καταγράφουμε μέσω H/Y όλα τα παραπάνω μεγέθη.
7. Τηρούμε για την προσήμανση της γωνίας α το εξής : Όταν $P_L - P_R > 0 \rightarrow \alpha > 0$.

Εφαρμόζοντας λοιπόν τις σχέσεις (3.1) έως (3.5) βρίσκουμε τις καμπύλες βαθμονόμησης.

Για την αναγωγή των μεγεθών χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα του εργαστηρίου στο οποίο όπως αναφέραμε υπολογίζονται : τα χαρακτηριστικά του αέρα λαμβάνοντας υπ' όψιν και την υγρασία, η ταχύτητα του αέρα μέσω των ισεντροπικών σχέσεων και τέλος οι προσεγγίσεις των καμπυλών $a(P_d)$, $P_q(a)$, $P_p(a)$ με πολώνυμα έκτου βαθμού με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.

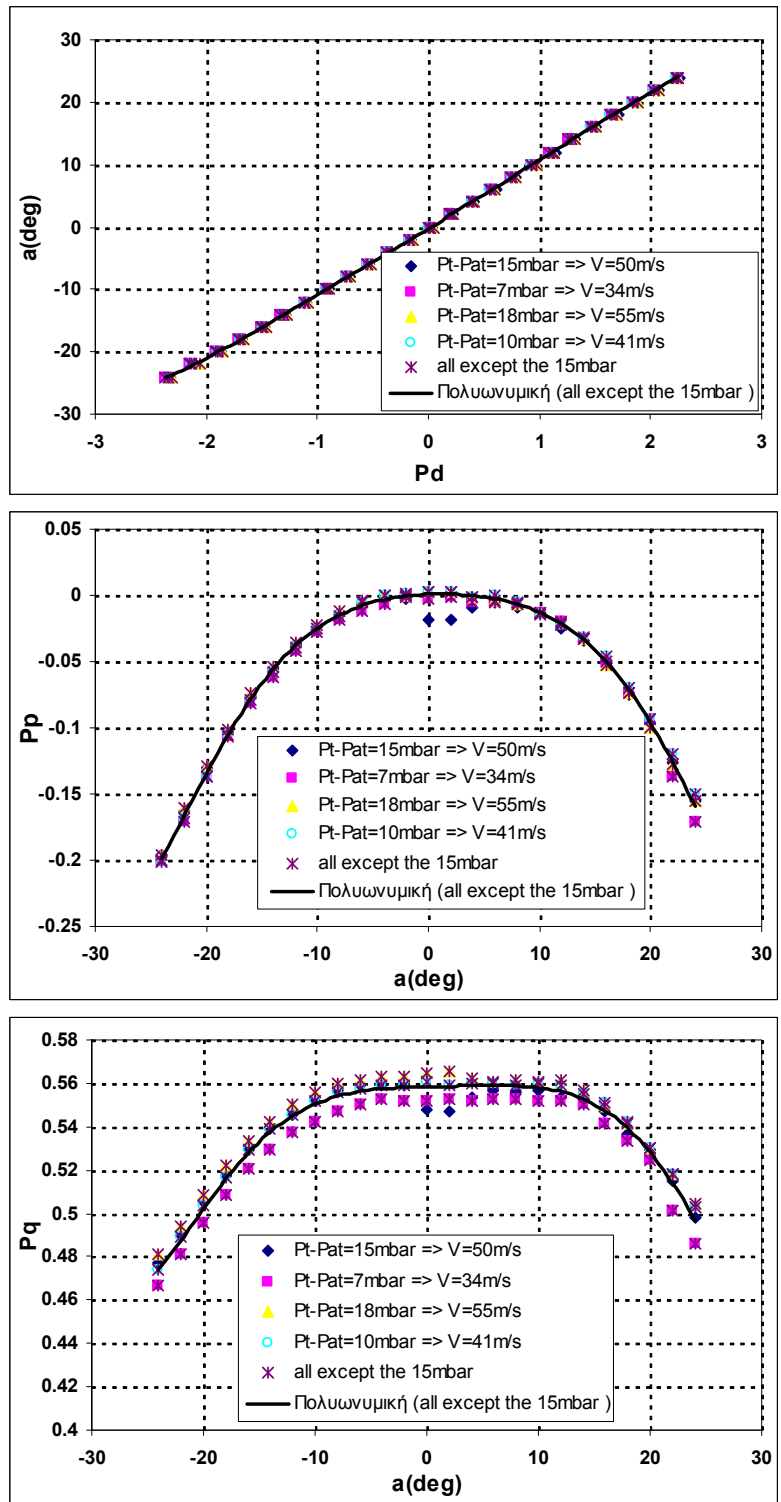
Το αρχείο εξόδου του προγράμματος περιλαμβάνει για κάθε καμπύλη $a(P_d)$, $P_q(a)$, $P_p(a)$ τους συντελεστές των πολωνύμων, καθώς και τον συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού R^2 και την μέση τιμή των αποκλίσεων των μετρήσεων από τα υπολογιζόμενα μεγέθη $MEAN|Y_{est}-Y|$.

Για να βαθμονομήσουμε τον σωλήνα πίεσης, κάναμε μετρήσεις για διάφορες ταχύτητες δέσμης. Τα πολώνυμα που βρίσκουμε προκύπτουν από όλες τις μετρήσεις. Οι καμπύλες βαθμονόμησης του σωλήνα πίεσης τριών οπών παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 3.5). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.2) παρουσιάζονται οι συντελεστές των πολωνύμων.

$$f = a_6x^6 + a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x^1 + a_0$$

Καμπύλη	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	R^2	$MEAN Y_{est}-Y $
$a(P_d)$	-.2311	.1076e-2	.1986	.5825e-1	-.3634e-1	-.2096e-1	.4537e-2	.99978	.1826
$P_p(a)$.831e-3	.306e-3	-.149e-3	.335e-5	-.518e-6	-.429e-8	.407e-9	.9966	.267e-2
$P_q(a)$.558	.119e-3	-.105e-4	.299e-5	-.340e-6	-.414e-8	.240e-9	.9588	.447e-2

Πίνακας 3.2: Πολώνυμα $a(P_d)$, $P_q(a)$, $P_p(a)$.



Σχήμα 3.5: Καμπύλες βαθμονόμησης σωλήνα πίεσης τριών οπών .

3.2.3 Σωλήνας πέντε οπών (5 hole Probe).

Κατά αντιστοιχία με τον σωλήνα πίεσης τριών οπών, ο σωλήνας πίεσης πέντε οπών αποτελείται από πέντε οπές στη μία διαμορφωμένη άκρη του, οι οποίες καταλήγουν σε πέντε διαφορετικά σωληνάκια στην άλλη άκρη. Στο παρακάτω σχήμα

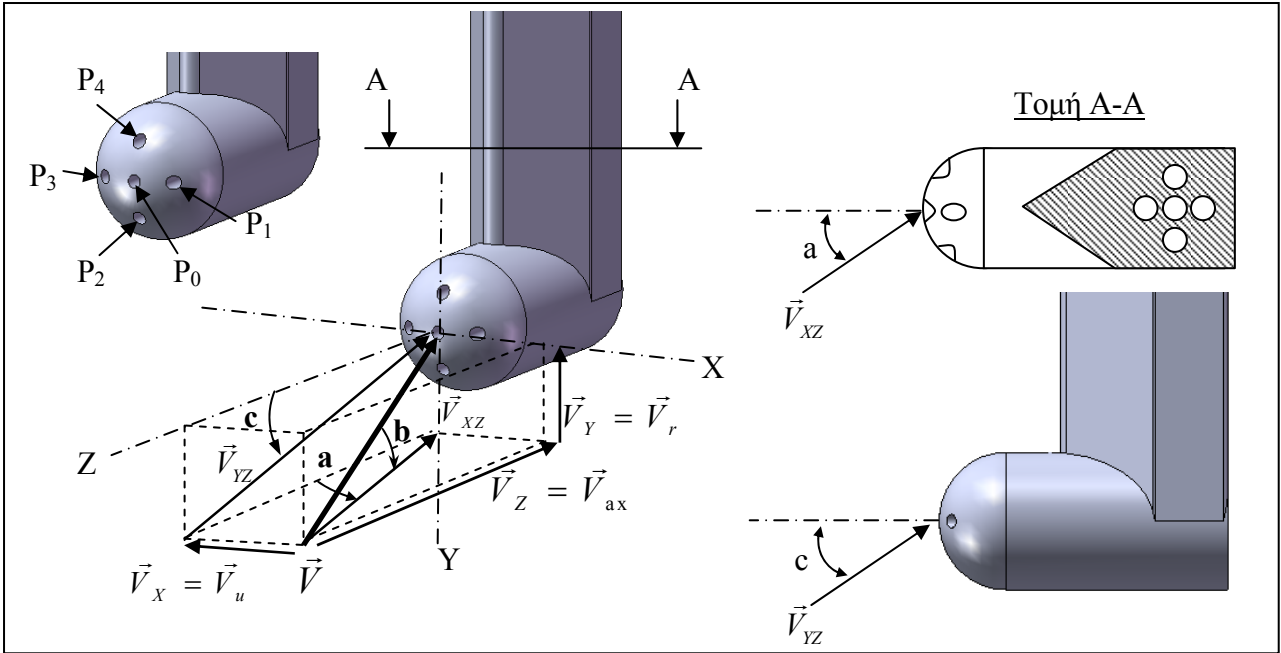
(Σχήμα 3.6) φαίνεται ο τύπος του σωλήνα πέντε οπών (5-hole Probe) που χρησιμοποιήσαμε στη διάταξη. Στη θέση 2 (ανάντι της 2^{ης} πτερωτής) χρησιμοποιήσαμε 5-hole Probe του εργαστηρίου με κωδικό 9550101 και στη θέση 3 (κατάντι της 2^{ης} πτερωτής) 5-hole Probe του εργαστηρίου με κωδικό 9550103.



Σχήμα 3.6: Σωλήνας πίεσης πέντε οπών (5-hole Probe) της διάταξης .

Στο σωλήνα πέντε οπών, οι οπές έχουν τέτοια συμμετρική διάταξη ώστε να βρίσκονται επάνω σε δύο επίπεδα κάθετα μεταξύ τους. Πάνω στα επίπεδα αυτά μπορούμε και μετράμε τις συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας με αποτέλεσμα να μπορούμε να μετράμε διανύσματα ταχύτητας σε τρισδιάστατα πεδία ροής. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.7), η προβολή V_{XZ} του διανύσματος της ταχύτητας V στο οριζόντιο επίπεδο (XZ), σχηματίζει γωνία a (Yaw angle) με τον άξονα της κεντρικής, και το διάνυσμα της ταχύτητας V σχηματίζει γωνία b (Pitch angle) με το οριζόντιο επίπεδο (XZ). Στις μετρήσεις της διάταξής μας, συμβολίζουμε την ακτινική, περιφερειακή και αξονική συνιστώσα του διανύσματος της ταχύτητας με V_r , V_u και V_{ax} (ή V_a) αντίστοιχα. Οι σχέσεις που συνδέουν τις ταχύτητες αυτές με τις γωνίες a και b είναι οι παρακάτω σχέσεις (3.9), (3.10), (3.11) και αποδεικνύονται εύκολα από τη γεωμετρία στο Σχήμα 3.7.

Η αρίθμηση των θέσεων των πιέσεων P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Από κάθε οπή μπορούμε και μετράμε μια πίεση που από μόνη της δεν αντιπροσωπεύει κάποιο χαρακτηριστικό της ροής. Ο συσχετισμός των πιέσεων αυτών μας δίνει τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής, μέσω των ακόλουθων παραμέτρων (σχέσεις (3.12) έως (3.20)).



Σχήμα 3.7: Χαρακτηριστικά σωλήνα πίεσης πέντε οπών (5-hole Probe).

$$V_{ax} = V_z = V \cos(a) \cos(b) \rightarrow \text{Αξονική συνιστώσα.} \quad (3.9)$$

$$V_u = V_x = V \sin(a) \cos(b) \rightarrow \text{Περιφερειακή συνιστώσα.} \quad (3.10)$$

$$V_r = V_y = V \sin(b) \rightarrow \text{Ακτινική συνιστώσα.} \quad (3.11)$$

$$\text{Συντελεστής γωνίας } a, K_a = \frac{P_3 - P_1}{\Delta p} \quad (3.12)$$

$$\text{Συντελεστής γωνίας } b, K_b = \frac{P_2 - P_4}{\Delta p} \quad (3.13)$$

$$\text{Συντελεστής δυναμικής πίεσης, } K_q = \frac{\Delta p}{q_{ref}} \quad (3.14)$$

$$\text{Συντελεστής ολικής πίεσης, } K_{Pt} = \frac{P_{tref} - P_0}{q_{ref}} \quad (3.15)$$

$$\Delta p = P_0 - \frac{P_1 + P_3}{2} = \frac{(P_0 - P_1) + (P_0 - P_3)}{2} \quad (3.16)$$

$$\text{δυναμική πίεση, } q_{ref} = P_{tref} - P_{sref} \quad (3.17)$$

$$P_{tref} = P_{sref} \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_{ref}^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.18)$$

$$T_{ref} = T_{ref} \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{ref}^2 \right]^{-1} \quad (3.19)$$

$$V = M_{ref} \sqrt{\gamma R T_{ref}} \quad \text{ή} \quad V \stackrel{M < 0.3}{=} \sqrt{\frac{2q_{ref}}{\rho}}, \quad \rho = \frac{P_{at}}{R T_{at}} \quad (3.20)$$

όπου για το πεδίο της ροής (δέσμη στη βαθμονόμηση) έχουμε : q_{ref} είναι η δυναμική πίεση, P_{tref} και P_{sref} είναι η ολική και η στατική αντίστοιχα. M_{ref} είναι ο αριθμός Mach, γ ο ισεντροπικός εκθέτης, R η σταθερά του αέρα και T_{tref} και T_{ref} η ολική και στατική θερμοκρασία αντίστοιχα.

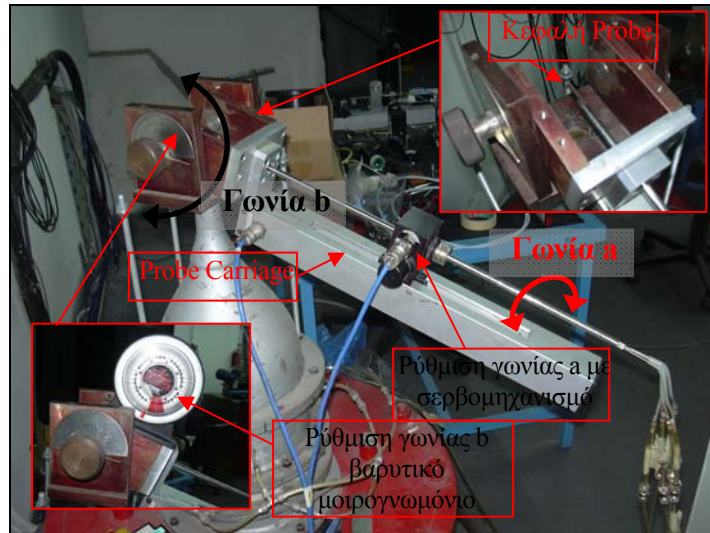
Μπορεί να αποδειχθεί (ή να διαπιστωθεί πειραματικά) ότι για μια σημαντική περιοχή τιμών της ταχύτητας της ροής, οι γωνίες a και b είναι συνάρτηση των παραμέτρων K_a και K_b και η στατική και ολική πίεση είναι συνάρτηση των παραμέτρων K_q και K_{Pt} . Έτσι, από τις παραπάνω εξισώσεις βλέπουμε ότι αν είναι γνωστές οι τιμές P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 και οι καμπύλες $a(K_a, K_b)$, $b(K_a, K_b)$, $K_q(a, b)$, $K_{Pt}(a, b)$ μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως το διάνυσμα της ταχύτητας και η στατική και ολική πίεση με τα παρακάτω βήματα :

1. $a(K_a, K_b) \rightarrow a$
2. $b(K_a, K_b) \rightarrow b$
3. $K_q(a, b) \rightarrow K_q$
4. $K_{Pt}(a, b) \rightarrow K_{Pt}$
5. $K_q \rightarrow q_{ref}$
6. $K_{Pt}, q_{ref} \rightarrow P_{tref}$
7. $P_{tref}, q_{ref} \rightarrow P_{sref}$
8. $q_{ref} \rightarrow V$ ή $P_{tref}, P_{sref} \rightarrow M \rightarrow V$ για το συμπιεστό ρευστό

Οι καμπύλες $a(K_a, K_b)$, $b(K_a, K_b)$, $K_q(a, b)$, $K_{Pt}(a, b)$ προσδιορίζονται με την βαθμονόμηση του σωλήνα, η οποία περιγράφεται παρακάτω.

3.2.4 Βαθμονόμηση σωλήνα πέντε οπών – Καμπύλες βαθμονόμησης.

Η διάταξη που χρησιμοποιήσαμε για τη βαθμονόμηση είναι ίδια με αυτήν που χρησιμοποιήσαμε για τη βαθμονόμηση του 3-hole Probe (βλ. Σχήμα 3.4). Εδώ όμως για τη ρύθμιση της γωνίας b χρησιμοποιήσαμε μια επιπλέον δυνατότητα της διάταξης βαθμονόμησης που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Διάταξη βαθμονόμησης σωλήνα πίεσης πέντε οπών (5-hole Probe).

Για βαθμονόμηση του σωλήνα πίεσης τριών οπών, ο σωλήνας εισάγεται σε γνωστό πεδίο ροής και τοποθετείται σε θέσεις που αντιστοιχούν σε διάφορες γωνίες a και b . Σε κάθε θέση μετρούνται οι P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 και γνωρίζοντας την πίεση και την ταχύτητα, υπολογίζονται οι καμπύλες $a(K_a, K_b)$, $b(K_a, K_b)$, $K_d(a, b)$, $K_{Pt}(a, b)$.

Οι ποσότητες που μετρήσαμε για τη διεξαγωγή της βαθμονόμησης είναι :

1. Πίεση περιβάλλοντος (απόλυτη) P_{at} , Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{at} , Σχετική υγρασία αέρα RH . Τα μεγέθη αυτά μετρήθηκαν με ψηφιακό αισθητήρα μέτρησης ατμοσφαιρικών συνθηκών (βλ. κεφάλαιο 3.4) που είναι εγκατεστημένος δίπλα από τη διάταξη. Η μέτρησή τους γίνεται ώστε να προσδιορίσουμε την σταθερά αέρα R και τον ισηντροπικό εκθέτη γ , μέσω σχέσεων για υγρό αέρα με χρήση προγράμματος σε Fortran (βλ. κεφάλαιο 4.3.1)..
2. Ολική Θερμοκρασία της δέσμης T_{ref} , η οποία μετρήθηκε με θερμοστοιχείο εσωτερικά του ακροφυσίου στη μεγάλη διάμετρο. Φυσικά, εκεί μετράμε την στατική θερμοκρασία αλλά λόγω της πολύ μικρότερης ταχύτητας του αέρα στην μεγάλη διάμετρο σε σχέση με τη διάμετρο της δέσμης, ισχύει για τη μεγάλη διάμετρο ότι $T_t \approx T$ και επειδή στο ακροφύσιο έχουμε άεργη ροή έχουμε ότι $T_t = T_{ref}$, άρα $T_{ref} = T$. Έτσι, η στατική θερμοκρασία της δέσμης T_{ref} δίνεται από τη σχέση (3.7).
3. Η πίεση τροφοδοσίας της δέσμης, η οποία μετράται στο τοίχωμα του ακροφυσίου στη θέση της μεγάλης διαμέτρου (βλ. Σχήμα 3.4) μέσω οπών στο τοίχωμα. Ουσιαστικά, μετράμε την στατική πίεση εκεί η οποία όμως είναι η ολική πίεση της δέσμης λόγω της μεγάλης της διαμέτρου σε σχέση με τη διάμετρο της δέσμης. Έτσι, μετράμε με χρήση μεταλλάκτη πίεσης (βλ. κεφάλαιο 3.3) το $P_{tref} - P_{at}$. Όμως, η ταχύτητα της δέσμης μετράται μόλις έξω από το

ακροφύσιο, άρα στο περιβάλλον, που σημαίνει ότι $P_{sref} = P_{at}$. Έτσι, μετράμε ουσιαστικά το $P_{tref} - P_{sref}$.

4. $P_0 - P_{at}$, $P_0 - P_2$, $P_0 - P_3$, $P_2 - P_4$, $P_3 - P_1$ από σωλήνα πέντε οπών με χρήση μεταλλακτών πίεσης.
5. Γωνία a του σωλήνα από -24° έως $+24^\circ$ ανά 2° με χρήση σερβομηχανισμού επάνω στο probe carriage (βλ. Σχήμα 3.8 και κεφάλαιο 3.6) και γωνία b από -20° έως 20° ανά 5° με χρήση βαρυτικού μοιρογνωμονίου (βλ. Σχήμα 3.8). Μετράμε ένα σετ γωνιών a για σταθερή γωνία b , για κάθε γωνία b .
6. Για κάθε ζεύγος γωνίας a και b καταγράφουμε μέσω H/Y όλα τα παραπάνω μεγέθη.
7. Τηρούμε για την προσήμανση των γωνιών a , b το εξής : Όταν $P_3 - P_1 > 0 \rightarrow a > 0$ και όταν $P_2 - P_4 > 0 \rightarrow b > 0$.

Εφαρμόζοντας λοιπόν τις σχέσεις (3.12) έως (3.17) βρίσκουμε τις καμπύλες βαθμονόμησης.

Για την αναγωγή των μεγεθών χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα του εργαστηρίου στο οποίο όπως αναφέραμε υπολογίζονται : τα χαρακτηριστικά του αέρα λαμβάνοντας υπ' όψιν και την υγρασία, η ταχύτητα του αέρα μέσω των ισεντροπικών σχέσεων και τέλος οι προσεγγίσεις των καμπυλών $a(K_a, K_b)$, $b(K_a, K_b)$, $K_q(a, b)$, $K_{Pt}(a, b)$ με πολυώνυμα της μορφής :

$$\sum_{i=1}^L \left[\sum_{j=1}^M C_{ij} K_a^{j-1} \right] K_b^{i-1}, \text{ για τις καμπύλες } a(K_a, K_b), b(K_a, K_b) \quad (3.21)$$

$$\sum_{i=1}^L \left[\sum_{j=1}^M C_{ij} a^{j-1} \right] b^{i-1}, \text{ για τις καμπύλες } K_q(a, b), K_{Pt}(a, b) \quad (3.22)$$

Χρησιμοποιήσαμε βαθμό πολυωνύμων ίσο με 6 που σημαίνει για τις σχέσεις (3.21) και (3.22) ότι $L=M=7$. Έτσι, ο πίνακας των συντελεστών C_{ij} είναι 7×7 , έχουμε δηλαδή 49 συντελεστές.

Το αρχείο εξόδου του προγράμματος περιλαμβάνει για κάθε καμπύλη $a(K_a, K_b)$, $b(K_a, K_b)$, $K_q(a, b)$, $K_{Pt}(a, b)$ τους συντελεστές των πολυωνύμων C_{ij} σειριακά στη μορφή $C_{1,1}$, $C_{1,2}$, ..., $C_{1,M}$, $C_{2,1}$, $C_{2,2}$, ..., $C_{2,M}$, ..., $C_{L,1}$, $C_{L,2}$, ..., $C_{L,M}$ καθώς και τον συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού R^2 και την μέση τιμή των αποκλίσεων των μετρήσεων από τα υπολογιζόμενα μεγέθη $MEAN|Y_{est}-Y|$.

Για να βαθμονομήσουμε τον σωλήνα πίεσης, κάναμε μετρήσεις για ταχύτητες δέσμης στα 40m/s και 55m/s. Τα πολυώνυμα που βρίσκουμε προκύπτουν από όλες τις μετρήσεις. Οι καμπύλες βαθμονόμησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9 για τον 5-hole Probe της θέσης 2 (ανάντι 2^{15} πτερωτής) και στο Σχήμα 3.10 για τον 5-hole Probe της θέσης 3 (κατάντι 2^{15} πτερωτής). Παρακάτω, παραθέτουμε τους συντελεστές C_{ij} των

πολυωνύμων όπου με τον δείκτη 1 και 3 αναφερόμαστε στο 5-hole Probe με κωδικό 9550101 και 9550103 αντίστοιχα .

$$Ca1 = \begin{pmatrix} -0.2281555 & 13.57027 & -0.0508784 & -0.8159535 & -0.0146752 & 0.0440701 & 4.079574 \times 10^{-3} \\ -0.4597783 & 0.6279512 & -0.2830465 & -0.2679795 & 0.1423456 & 0.0386093 & -0.0167936 \\ 1.007266 & 1.106069 & -0.5889371 & -0.5359784 & 0.2871044 & 0.0716375 & -0.0428788 \\ 0.38979 & 1.014979 & 0.2775371 & -0.4023833 & -0.1074347 & 0.0441554 & 4.967016 \times 10^{-3} \\ -2.357714 & -0.5728055 & 1.335515 & 0.3598758 & -0.4931037 & -0.0582023 & 0.0634498 \\ -2.259202 & -2.331744 & 1.269809 & 1.109455 & -0.3742722 & -0.1393986 & 0.045769 \\ -0.3058584 & -1.25003 & 0.3613262 & 0.5644074 & -0.0986305 & -0.0662355 & 0.0100645 \end{pmatrix}$$

$$R^2=0.9998438E+00$$

$$Cb1 = \begin{pmatrix} 2.892031 & -0.0317078 & -0.238493 & 0.0022334 & 0.0445289 & -4.686888 \times 10^{-4} & -0.0031028 \\ 13.25566 & 0.2326866 & -1.655068 & -0.1076522 & 0.338546 & 0.0162584 & -0.0341588 \\ 0.106587 & -0.1537866 & -0.3097552 & 0.0719912 & 0.0730125 & -0.0082762 & -0.004818 \\ 5.616845 & -0.4488173 & -0.8102708 & 0.3350412 & -0.2451732 & -0.0582337 & 0.0558879 \\ 2.075218 & 0.3236517 & 0.2722432 & -0.0465219 & -0.2744181 & -0.003531 & 0.0353896 \\ -7.741999 & 0.343869 & 2.600156 & -0.2905391 & -0.1970292 & 0.0512314 & -0.016441 \\ -5.118674 & -0.0682782 & 1.763349 & -0.0720878 & -0.1452561 & 0.0194554 & -0.0077326 \end{pmatrix}$$

$$R^2= 0.9993874E+00$$

$$Cq1 = \begin{pmatrix} 9.46E-001 & -3.28E-004 & -4.24E-004 & 2.82E-008 & -4.9E-007 & 1.74E-009 & 5.21E-010 \\ -8.89E-004 & -4.8E-005 & 2E-005 & -2.26E-007 & -3.89E-008 & 4.58E-010 & 2.68E-011 \\ 4.14E-005 & 1E-005 & -4.5E-006 & 7.95E-009 & 1.66E-008 & -5.98E-011 & -1.57E-011 \\ 2.08E-005 & -5.22E-007 & -1.68E-008 & 1.06E-008 & -2.21E-010 & -1.75E-011 & 3.38E-013 \\ -3.07E-006 & -2.01E-007 & 5.62E-008 & -4.64E-011 & -1.91E-010 & 9.07E-013 & 1.71E-013 \\ -6.49E-008 & 7.26E-010 & -4.18E-010 & -5.97E-011 & 2.68E-012 & 1.03E-013 & -3.15E-015 \\ 8.97E-009 & 7.13E-010 & -2.26E-010 & 1.42E-012 & 7.32E-013 & -5.55E-015 & 0E+000 \end{pmatrix}$$

$$R^2= 0.9932480E+00$$

$$Cpt1 = \begin{pmatrix} 5.59E-003 & 1.24E-004 & 2.77E-004 & 2.11E-007 & 8.1E-007 & -1.08E-010 & -7.5E-010 \\ -2.65E-003 & 8.68E-006 & -4.89E-006 & 3.14E-007 & 8.17E-009 & -5.9E-010 & -4.17E-012 \\ 1.77E-004 & -1.88E-005 & 4.04E-006 & 5.16E-008 & -1.31E-008 & -2.67E-011 & 1.12E-011 \\ -8.44E-006 & 1.76E-008 & -4.13E-008 & -1.13E-008 & 3.55E-010 & 1.99E-011 & -4.45E-013 \\ 4.07E-006 & 2.7E-007 & -4.75E-008 & -6.97E-010 & 1.6E-010 & 2.59E-013 & -1.36E-013 \\ 1.19E-008 & 1.91E-009 & 4.87E-010 & 6.04E-011 & -2.94E-012 & -1.11E-013 & 3.57E-015 \\ -1.46E-008 & -8.64E-010 & 1.95E-010 & 1.31E-012 & -6.73E-013 & 0E+000 & 0E+000 \end{pmatrix}$$

$$R^2= 0.9961415E+00$$

$$C_{a3} = \begin{pmatrix} -0.080142 & 13.77166 & -0.2573562 & -0.9003492 & 0.0576389 & 0.0558859 & -0.0058 \\ 1.065355 & 0.4279054 & -0.272925 & -0.2163479 & 0.1139147 & 0.0280517 & -0.0152858 \\ -0.4311123 & 0.4327386 & 0.1131015 & -0.1939885 & 0.0517176 & 0.0220557 & -0.0104834 \\ -0.5497707 & -0.237486 & -0.0282769 & 0.0839936 & -0.0042892 & -0.0102331 & 0.0066273 \\ 0.6281411 & 0.0011843 & -0.4088221 & -0.0558817 & 0.0611421 & 0.0105405 & -0.0016046 \\ 0.6160206 & 0.0129779 & -0.2009852 & -0.0002055 & 0.0374566 & -0.0001883 & -0.0042049 \\ -0.0205022 & -0.0806159 & 0.0525667 & 0.0499291 & -0.0102106 & -0.0069817 & 0.0003459 \end{pmatrix}$$

$$R^2 = 0.9995458E+00$$

$$C_{b3} = \begin{pmatrix} 3.420043 & -1.212928 & -0.5413458 & 0.0737044 & 0.0733329 & -0.0029801 & -0.0020193 \\ 15.45961 & -0.3985103 & -1.449659 & 0.1840709 & 0.1971099 & -0.0305657 & -0.0189839 \\ -2.597116 & -0.5941432 & 1.243621 & 0.5084478 & 0.0619093 & -0.0841533 & -0.03429 \\ -0.7773764 & -0.6933857 & -0.9141898 & 0.2524584 & 0.2876874 & -0.0100079 & -0.0209264 \\ 3.846041 & 0.5387666 & -2.653515 & -0.45748 & 0.3519989 & 0.0777458 & -0.0018374 \\ 1.341064 & 0.4608525 & -0.2839047 & -0.2229246 & 0.0321412 & 0.0226603 & -0.0033647 \\ -1.09951 & -0.2063014 & 0.9447962 & 0.1409533 & -0.1877413 & -0.023378 & 0.0106452 \end{pmatrix}$$

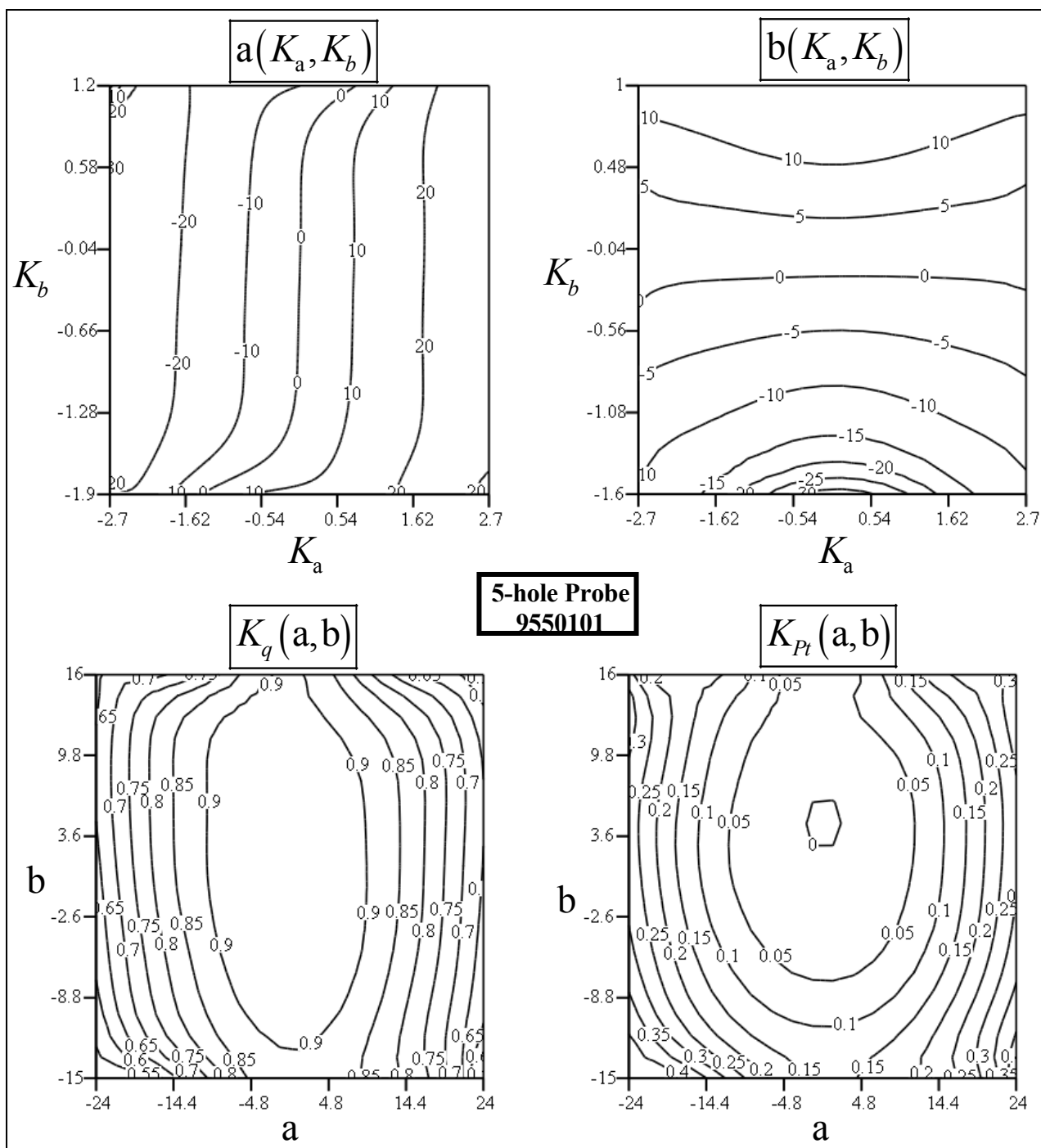
$$R^2 = 0.9937649E+00$$

$$C_{q3} = \begin{pmatrix} 9.76E-001 & -1.2E-003 & -4.52E-004 & 2.52E-006 & -4.3E-007 & -2.17E-009 & 4.87E-010 \\ -1.6E-003 & 1.02E-004 & 1.51E-005 & -1.95E-007 & -3.88E-008 & 2.26E-010 & 3.57E-011 \\ -6.05E-005 & 6.48E-007 & -2.22E-006 & 7.03E-009 & 8.87E-009 & -8.97E-012 & -9.55E-012 \\ 6.08E-006 & -2.91E-007 & -6.64E-008 & 2.93E-010 & 2.22E-010 & -8.36E-014 & -2.07E-013 \\ -1.07E-006 & 4.56E-009 & 1.34E-008 & -7.23E-011 & -5.53E-011 & 7.01E-014 & 6.3E-014 \\ -9.96E-009 & 4.54E-010 & 9.1E-011 & 1.39E-012 & -3.51E-013 & -3.07E-015 & 0E+000 \\ 1.69E-009 & -6.69E-012 & -2.06E-011 & 1.19E-013 & 8.82E-014 & 0E+000 & 0E+000 \end{pmatrix}$$

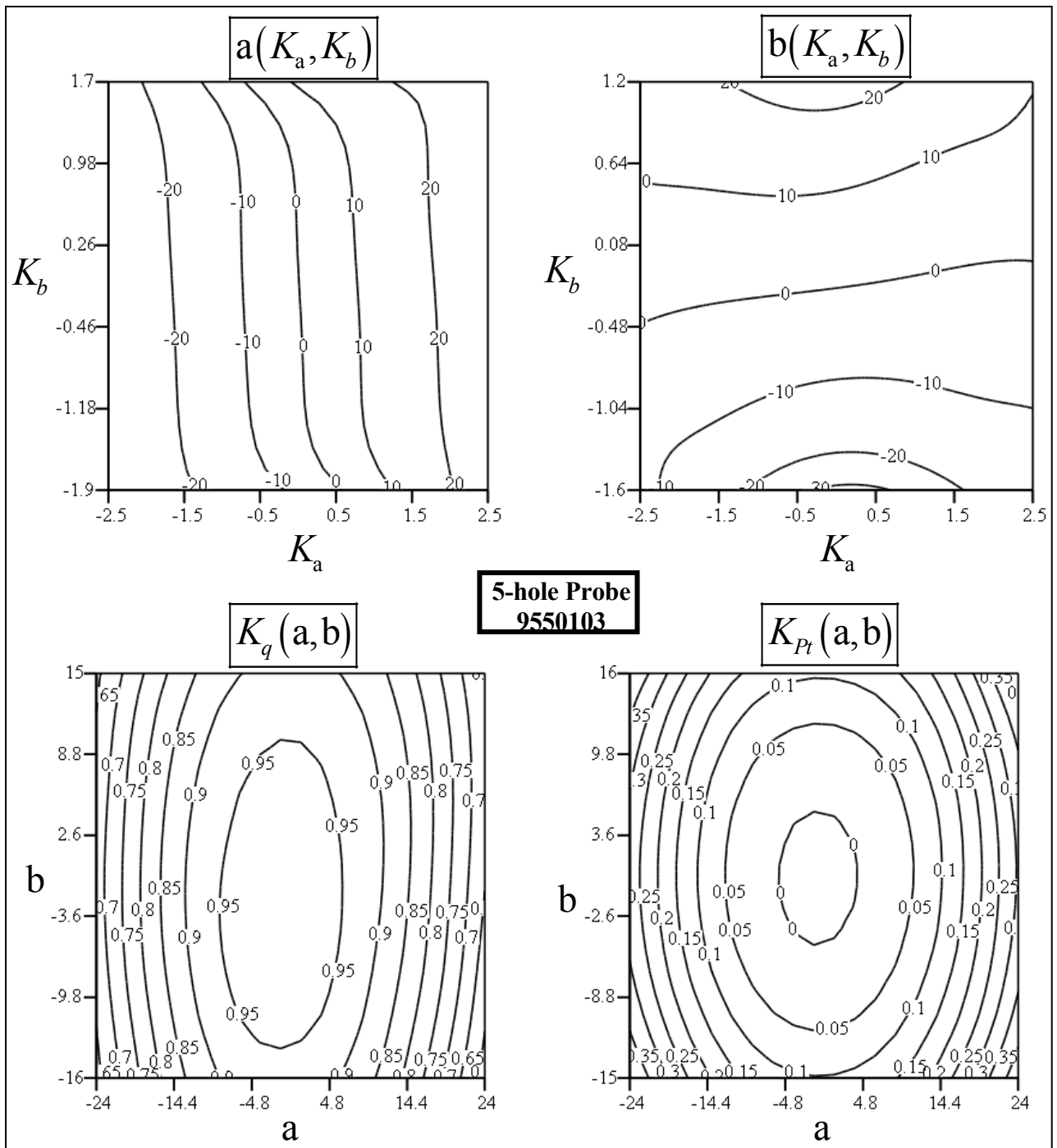
$$R^2 = 0.9912937E+00$$

$$C_{pt3} = \begin{pmatrix} -8.67E-003 & 6.01E-004 & 3.39E-004 & 1.19E-007 & 7.63E-007 & -2.37E-010 & -7.77E-010 \\ -1.76E-004 & -2.59E-005 & -6.01E-006 & 8.62E-008 & 2E-008 & -9.3E-011 & -1.93E-011 \\ 3.02E-004 & 8.07E-007 & 2.25E-006 & -1.65E-008 & -7.73E-009 & 2.55E-011 & 7.84E-012 \\ -2.62E-006 & 1.43E-007 & 1.93E-008 & 2.58E-010 & -7.84E-011 & -8.17E-013 & 8.49E-014 \\ 1.12E-006 & -8.51E-009 & -1.28E-008 & 1.27E-010 & 4.92E-011 & -1.78E-013 & -5.35E-014 \\ 6.29E-009 & -2.56E-010 & -1.52E-011 & -2.11E-012 & 1E-013 & 4.22E-015 & 0E+000 \\ -1.76E-009 & 1.15E-011 & 2.12E-011 & -2.22E-013 & -8.51E-014 & 0E+000 & 0E+000 \end{pmatrix}$$

$$R^2 = 0.9946889E+00$$



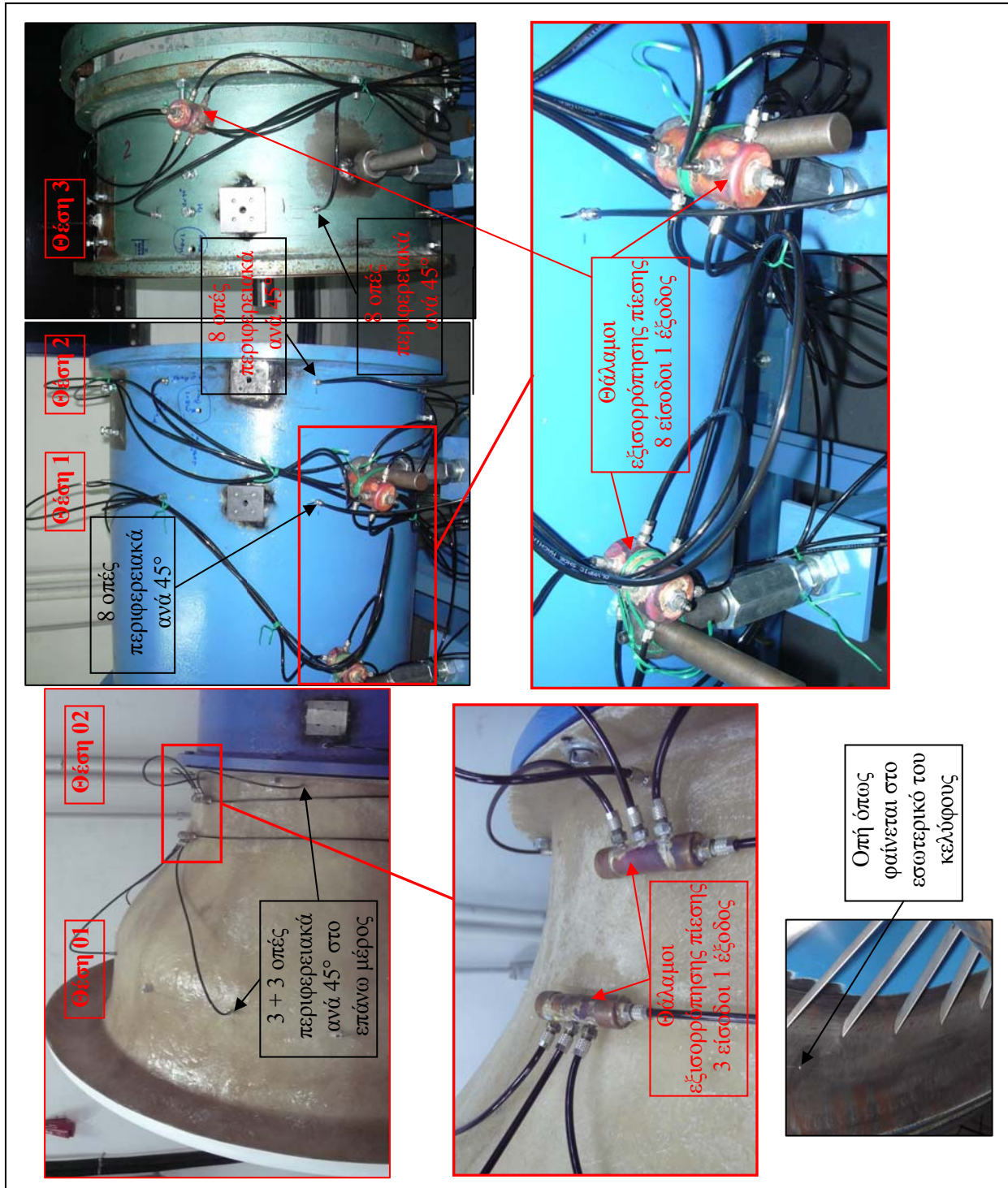
Σχήμα 3.9: Καμπύλες βαθμονόμησης σωλήνα πίεσης πέντε οπών (5-hole Probe) θέση 2 (ανάντι 2^{ης} πτερωτής) με κωδικό 9550101.



Σχήμα 3.10: Καμπύλες βαθμονόμησης σωλήνα πίεσης πέντε οπών (5-hole Probe) θέση 3 (κατάντι 2^{ης} πτερωτής) με κωδικό 9550103.

3.2.5 Μέτρηση στατικής πίεσης από οπές στο κέλυφος της διάταξης (Walltaps).

Οι θέσεις και ο τρόπος μέτρησης της μέσης στατικής πίεσης στις θέσεις 01, 02, 1, 2, 3 φαίνεται στο Σχήμα 3.11.

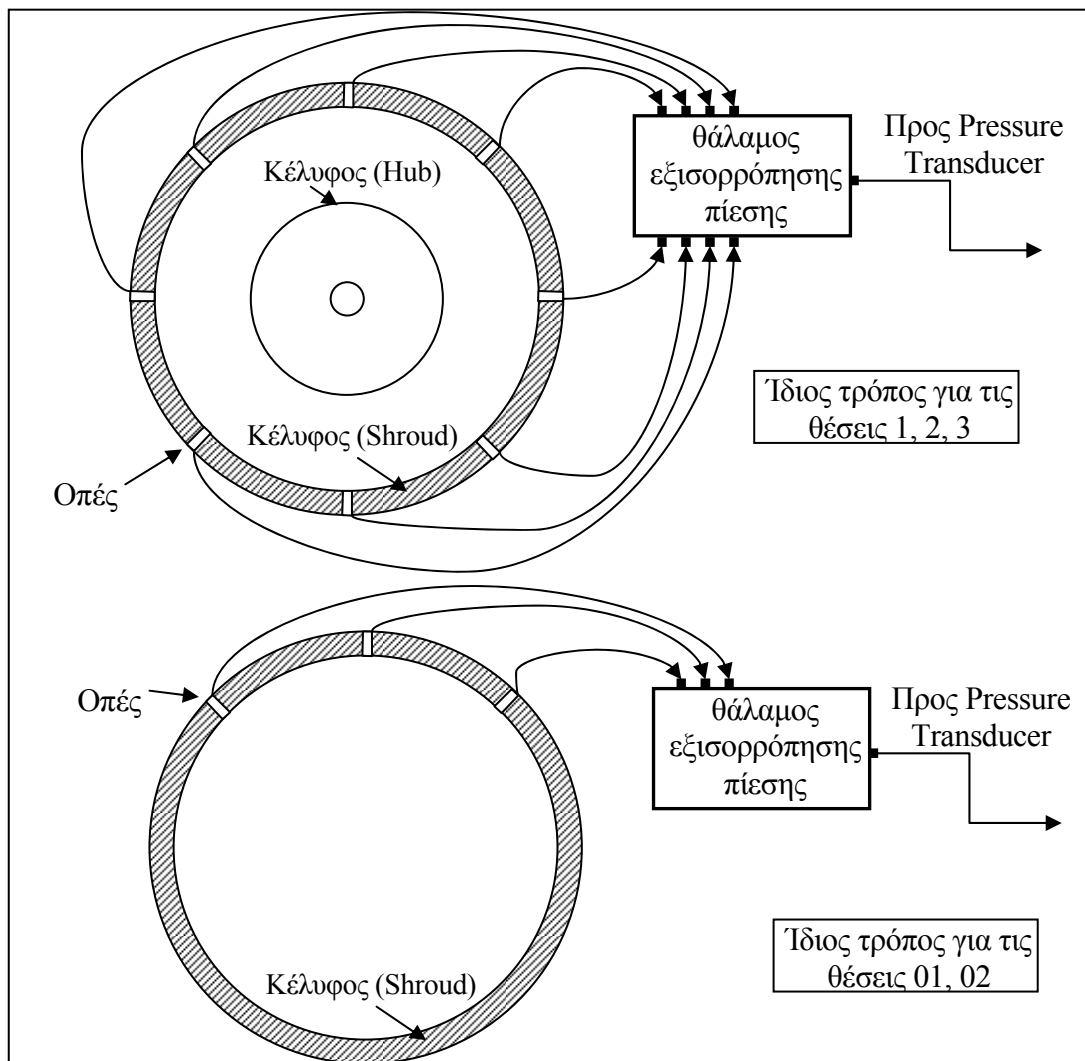


Σχήμα 3.11: Θέσεις και τρόπος μέτρησης στατικής πίεσης στο κέλυφος της διάταξης.

Όπως είναι γνωστό, η πίεση που μετράμε μέσω των οπών είναι η στατική, αφού κοντά στο τοίχωμα το διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού είναι παράλληλο στο άξονα συμμετρίας της μηχανής, άρα κάθετο στον άξονα συμμετρίας των οπών.

Κάθε σωληνάκι κάθε οπής, συνδέεται σε ένα δοχείο μεγαλύτερου όγκου στο οποίο έχουμε εξισορρόπηση των πιέσεων από όλα τα σωληνάκια που φθάνουν εκεί. Από τη έξοδο του θαλάμου εξισορρόπησης της πίεσης, μετράμε την μέση τιμή των πιέσεων της εισόδου. Βέβαια, με αυτόν τον τρόπο δεν μπορούμε να έχουμε κάποια ένδειξη της περιφερειακής ανομοιομορφίας της ροής.

Στις θέσεις 1, 2, 3 (κέλυφος συμπίεστη) έχουμε 8 οπές περιφερειακά ανά 45° για κάθε θέση, και στις θέσεις 01, 02 (κέλυφος αγωγού εισόδου) έχουμε 3 οπές περιφερειακά ανά 45° για κάθε θέση, στο επάνω μέρος του αγωγού εισόδου (βλ. και Σχήμα 3.12). Η επιλογή για την περιφερειακή θέση των οπών στον αγωγό εισόδου, βασίστηκε στο ότι η ροή είναι περισσότερο ομοιόμορφη στο επάνω μέρος του αγωγού εισόδου, αφού στο κάτω μέρος έχουμε την αρνητική επίδραση της έδρασης της ατράκτου της 1^{ης} περωτής.



Σχήμα 3.12: Τρόπος μέτρησης στατικής πίεσης στο κέλυφος της διάταξης.

3.3 Όργανα μέτρησης πίεσης.

Τα όργανα μέτρησης πίεσης που χρησιμοποιήσαμε στη διάταξη είναι :

- 1^ο) Μεταλλάκτες πίεσης για τη μέτρηση στατικών πιέσεων στο κέλυφος του συμπιεστή και μέτρηση των πιέσεων από τις οπές των σωλήνων πίεσης (3 & 5 hole Probes),
- 2^ο) Μικρομανόμετρο φίρμας Furness Control τύπου FC012 (κωδικός εργαστηρίου : ELTEM007) με δυνατότητα μέτρησης διαφοράς πίεσης από 0 έως $1999\text{mmH}_2\text{O}=196\text{mbar}$ και βαθμονομητή πίεσης (Pressure Calibrator) τύπου DPI 615 IS (κωδικός εργαστηρίου : TRA111), για την βαθμονόμηση των μεταλλακτών πίεσης (τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του μικρομανόμετρου και του ρυθμιστή πίεσης παρατίθενται στο παράρτημα 0),
- 3^ο) Ψηφιακό βαρόμετρο για τη μέτρηση της πίεσης περιβάλλοντος (βλ. κεφάλαιο 3.4).

3.3.1 Μεταλλάκτες πίεσης (Pressure Transducers).

Οι μεταλλάκτες πίεσης (Pressure Transducers) χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της διαφοράς πίεσης μεταξύ δύο θέσεων. Το βασικό στοιχείο σε όλους τους τύπους μεταλλακτών είναι μια μεταλλική μεμβράνη η οποία διαχωρίζει τους θαλάμους στους οποίους καταλήγουν οι δύο πιέσεις, και η οποία υπόκειται σε ελαστική παραμόρφωση υπό την επίδραση της διαφοράς πίεσης στα δύο τοιχώματά της. Η παραμόρφωση αυτή μετατρέπεται μέσω ηλεκτρονικών διατάξεων στο εσωτερικό του μεταλλάκτη, σε ηλεκτρική τάση η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης $\Delta P=K \cdot V$. Το πώς γίνεται αυτή η μετατροπή καθορίζει και τον τύπο του μεταλλάκτη, όμως δεν θα επεκταθούμε στην περιγραφή των τύπων αυτών καθώς ξεφεύγει από τα πλαίσια της εργασίας αυτής. Μπορούμε όμως να ανατρέξουμε στο [26] για λεπτομέρειες.

Είναι προφανές ότι κατά τη μέτρηση μιας διαφοράς πίεσης μας ενδιαφέρει η απόλυτη πίεση σε κάθε θέση. Έτσι, αν ξέρουμε την απόλυτη πίεση σε μια από τις δυο θέσεις, τότε αν ξέρουμε και τη διαφορά των πιέσεων μπορούμε να βρούμε και την πίεση στην άλλη θέση. Η απόλυτη πίεση που γνωρίζουμε είναι η πίεση περιβάλλοντος την οποία μετράμε με ψηφιακό βαρόμετρο (βλ. κεφάλαιο 3.4) στην διάταξή μας.

Η επιλογή του κατάλληλου μεταλλάκτη πίεσης για μια εφαρμογή καθορίζεται από το εύρος της διαφοράς πίεσης που μπορεί να μετρήσει. Στην διάταξή μας, για να επιλέξουμε το εύρος πίεσης που χρειαζόμαστε για κάθε μεταλλάκτη κάναμε το εξής : τρέξαμε τον κώδικα BLADE για τις μέγιστες στροφές ώστε να δούμε την μέγιστη παροχή που αναρροφά ο συμπιεστής και τις πιέσεις στις θέσεις 1, 2 και 3. Έπειτα, βάλαμε τα στοιχεία αυτά στις καμπύλες βαθμονόμησης των σωλήνων πίεσης για να δούμε τις διαφορές πίεσης μεταξύ των οπών που προκύπτουν. Φυσικά, αυτό έγινε με δοκιμές για όλο το εύρος των γωνιών α και β των σωλήνων πίεσης. Όσον αφορά στις

στατικές πιέσεις στο κέλυφος του συμπιεστή, για τις θέσεις 1,2 και 3 είχαμε τις πιέσεις σε κάθε θέση από το τρέξιμο του BLADE, και για τις θέσεις 01 και 02 που βρίσκονται στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα του αγωγού εισόδου βρήκαμε τις πιέσεις μέσω της παροχής (από BLADE) και της εξίσωσης του Bernoulli.

Στη διάταξή μας, χρησιμοποιούμε τους διαφορικούς μεταλλάκτες πίεσης Messtech τύπου GM για τη μέτρηση πιέσεων από τις οπές των σωλήνων πίεσης τριών και πέντε οπών, και Furness Control τύπου FC016 για τη μέτρηση των στατικών πιέσεων στο κέλυφος του συμπιεστή στις θέσεις 01, 02, 1, 2, 3 (βλ. και παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά). Οι μεταλλάκτες πίεσης φαίνονται στο Σχήμα 3.13. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται συνολικά σε παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.3).



Σχήμα 3.13: Μεταλλάκτες πίεσης (Pressure Transducers) της διάταξης. Αριστερά : Μεταλλάκτες για μέτρηση των πιέσεων από τις οπές των σωλήνων πίεσης. Δεξιά : Μεταλλάκτες για μέτρηση των στατικών πιέσεων στο κέλυφος του συμπιεστή.

3.3.2 Βαθμονόμηση μεταλλακτών – Καμπύλες βαθμονόμησης.

Η διάταξη που χρησιμοποιούμε για τη βαθμονόμηση των μεταλλακτών πίεσης φαίνεται στο Σχήμα 3.14 στην οποία περιλαμβάνεται :

α) Ο μεταλλάκτης πίεσης που πρόκειται να βαθμονομηθεί και ο οποίος έχει δύο υποδοχές για τα σωληνάκια των οποίων μετράμε την διαφορά πίεσης, μια έξοδο του σήματος της τάσης ανάλογα την διαφορά πίεσης που μετρά και συνδέεται σε κάποιο κανάλι στην κάρτα πρόσκτησης δεδομένων του H/Y, και μια είσοδο παροχής ρεύματος για τη λειτουργία του.

β) Ένα μικρομανόμετρο.

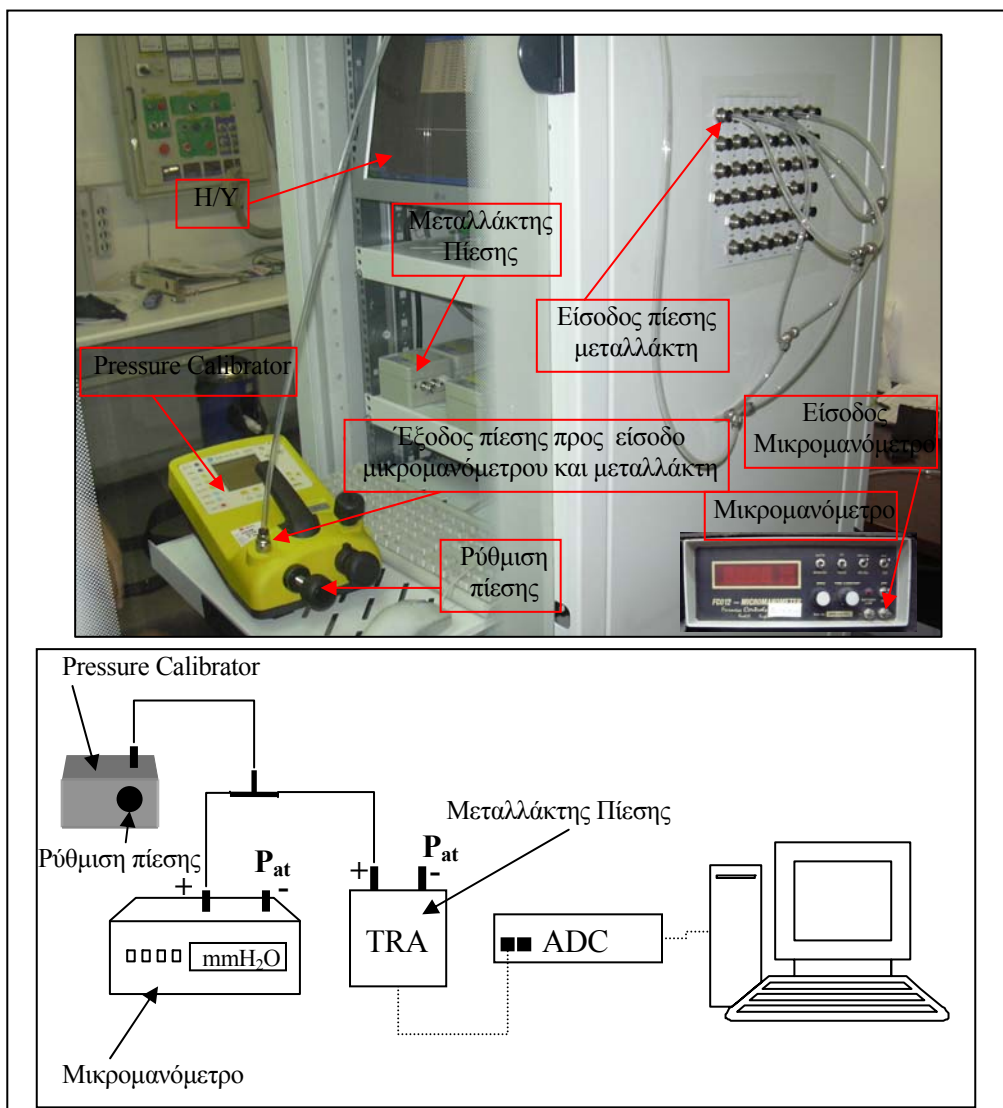
γ) Έναν βαθμονομητή πίεσης (Pressure Calibrator).

δ) Έναν H/Y με ενσωματωμένη κάρτα πρόσκτησης δεδομένων με αναλογισμιακό μετατροπέα (ADC).

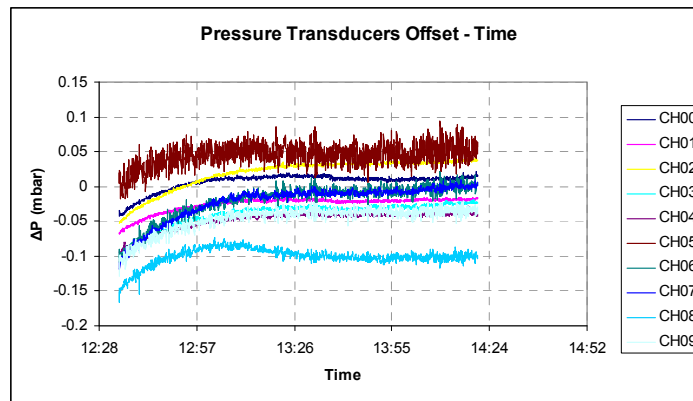
Η διαδικασία βαθμονόμησης έχει ως εξής :

Αφού έχουμε αφήσει τουλάχιστον μια ώρα αναμμένο τον μεταλλάκτη για να ζεσταθεί ώστε να σταθεροποιηθεί το offset (βλ. και Σχήμα 3.15), τοποθετούμε το σωληνάκι στον βαθμονομητή πίεσης (Pressure Calibrator). Στη συνέχεια, με τη στρόφιγγα ρύθμιση πίεσης ασκούμε πιέσεις από 0 έως το εύρος του μεταλλάκτη προσέχοντας να μην το

ξεπεράσουμε γιατί ίσως καταστρέψουμε το διάφραγμα ή αλλάξουμε τη γραμμική του συμπεριφορά. Οι πιέσεις ασκούνται ταυτόχρονα στον μεταλλάκτη και το μικρομανόμετρο από την οθόνη του οποίου διαβάζουμε την ένδειξη της πίεσης σε mmH₂O. Προφανώς, έχουμε ένδειξη πίεσης και από το pressure calibrator σε mbar, αλλά χρησιμοποιούμε τις πιο ακριβείς ενδείξεις του μικρομανόμετρου οι οποίες είναι σε mmH₂O.

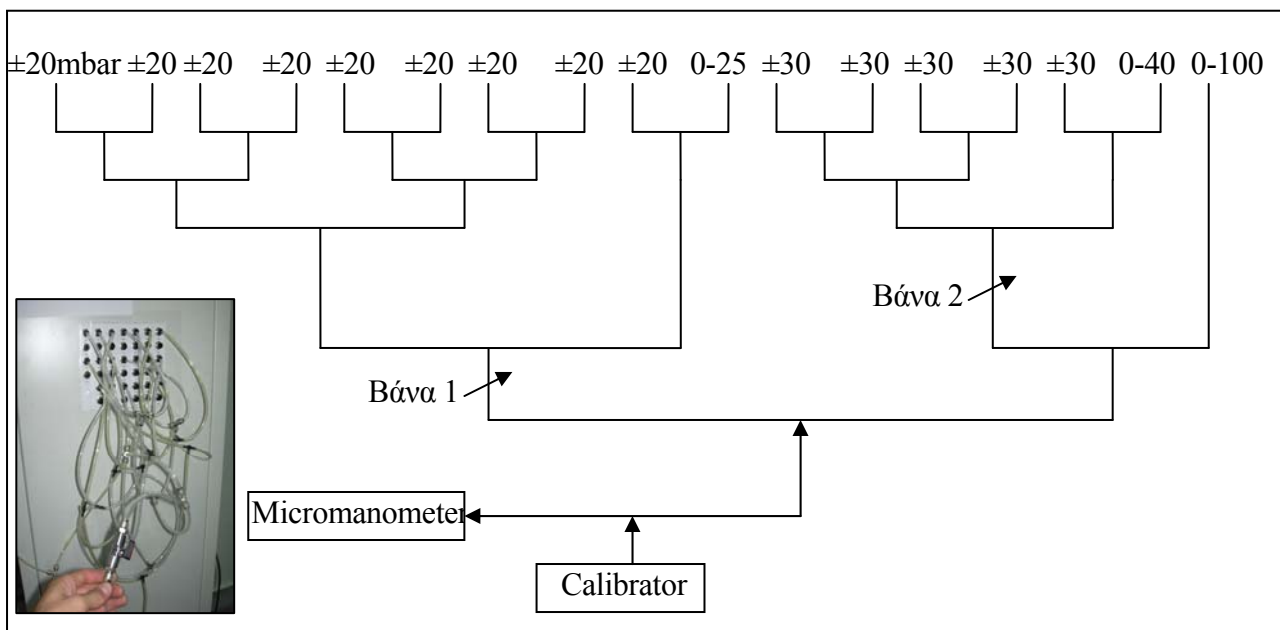


Σχήμα 3.14: Διάταξη βαθμονόμησης μεταλλακτών πίεσης.



Σχήμα 3.15: Ζέσταμα των μεταλλακτών πίεσης για σταθεροποίηση του offset.

Η βαθμονόμηση όλων των μεταλλακτών έγινε ταυτόχρονα αφού ήταν συνδεδεμένα παράλληλα σε ένα δίκτυο σωληνώσεων με βάνες οι οποίες έκλειναν την παροχή σε ορισμένους μεταλλάκτες όταν η πίεση που θα ασκούσαμε για τη βαθμονόμηση μεταλλακτών με μεγαλύτερο εύρος, θα ξεπέρναγε τη δικιά τους. Στο Σχήμα 3.16 φαίνεται η σύνδεση αυτή και είναι προφανές ότι αυξάνουμε την πίεση μέχρι τα 20mbar και έπειτα κλείνουμε τη βάνα 1 και συνεχίζουμε να αυξάνουμε την πίεση μέχρι τα 30 mbar και έπειτα κλείνουμε τη βάνα 2 και τέλος αυξάνουμε την πίεση μέχρι τα 100mbar όπου και σταματάμε.



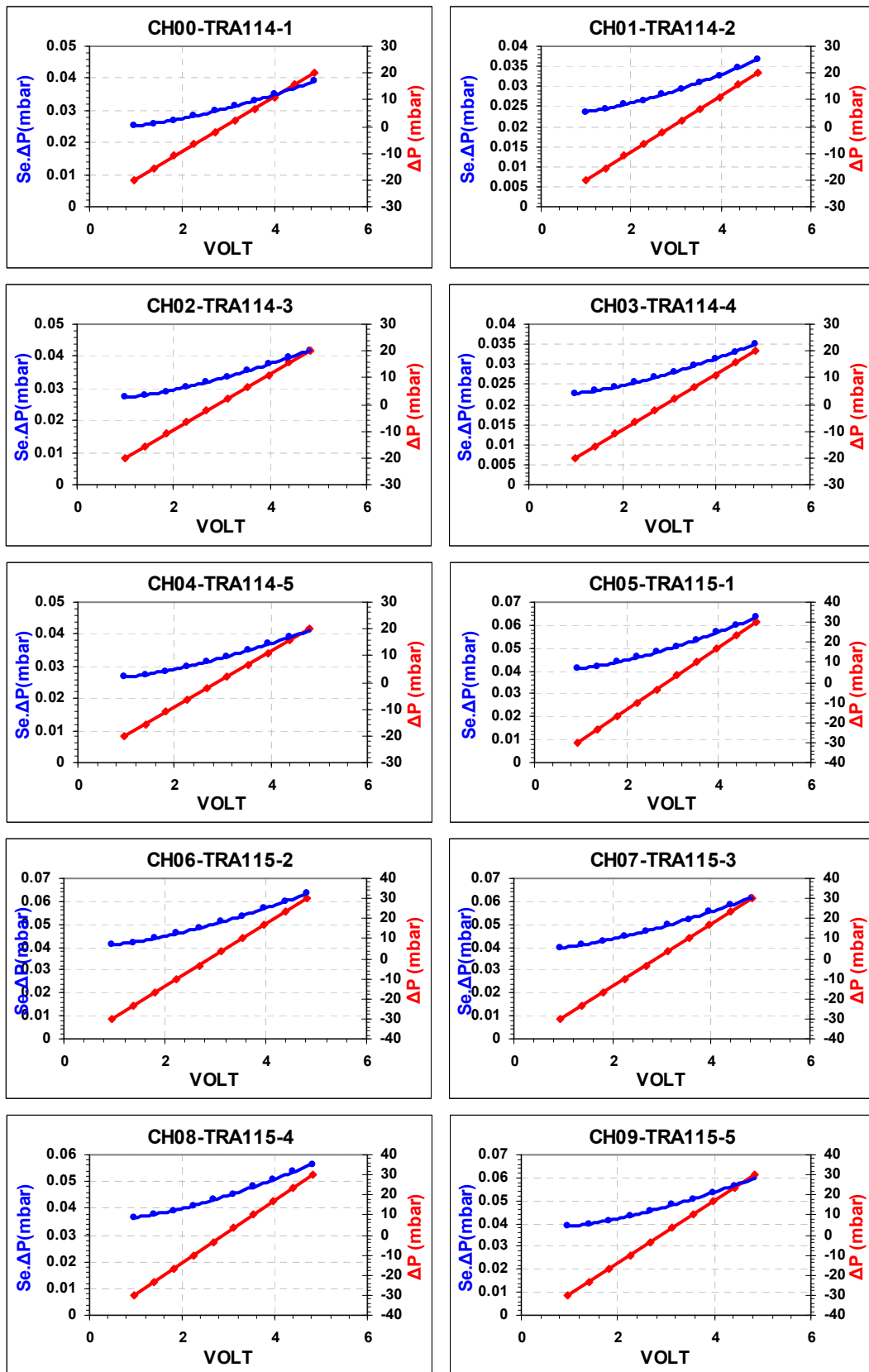
Σχήμα 3.16: Παράλληλη σύνδεση των μεταλλακτών πίεσης για ταυτόχρονη βαθμονόμηση.

Στη διάταξή μας, χρησιμοποιήσαμε 25 με 30 σημεία για κάθε καμπύλη βαθμονόμησης των μεταλλακτών πίεσης. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε στο Excel από όπου κατασκευάσαμε και τις καμπύλες βαθμονόμησης των μεταλλακτών οι οποίες είναι της μορφής $y=a \cdot x+b$ όπου το y αντιστοιχεί σε ΔP και το x σε Volt (έξοδος

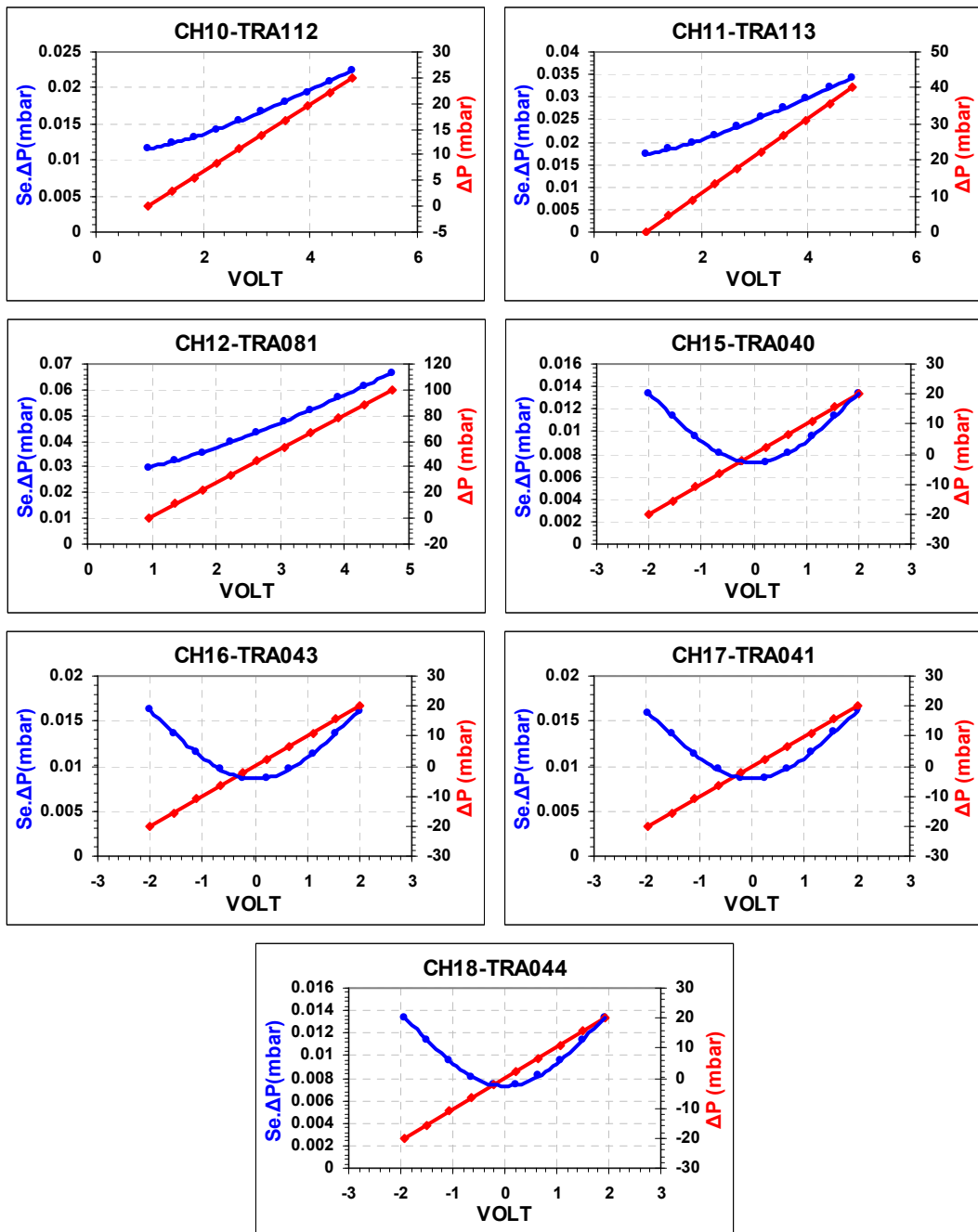
μεταλλάκτη). Τα σφάλματα σ_a και σ_b των συντελεστών a και b αντίστοιχα, υπολογίστηκαν επίσης στο Excel και το σφάλμα σ_x του x (Voltage) έχει να κάνει με διακριτική ικανότητα του αναλογοψηφιακού μετατροπέα (ADC) (16bit) (βλ. κεφάλαιο 3.9) η οποία δίνεται από τη σχέση (3.25) και ισούται με $\sigma_x = 0.00015259$ για τα κανάλια με εύρος εισόδου $\pm 5V$, και $\sigma_x = 0.00030518$ για τα κανάλια με εύρος εισόδου $\pm 10V$. Έτσι, το συνολικό σφάλμα δίνεται κατά τα γνωστά από τη σχέση^{[25],[26]} (3.23)

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial a} \sigma_a\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial b} \sigma_b\right)^2} = \sqrt{(x\sigma_a)^2 + (a\sigma_x)^2 + \sigma_b^2} \quad (3.23)$$

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.17) παρουσιάζονται οι καμπύλες βαθμονόμησης της διάταξης με τα σφάλματα και σε παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.3) τα πλήρη στοιχεία των μεταλλακτών.



Σχήμα 3.17: Καμπύλες βαθμονόμησης των μεταλλακτών πίεσης της διάταξης.



(Σχήμα 3.17 συνέχεια) Καμπύλες βαθμονόμησης των μεταλλακτών πίεσης της διάταξης.

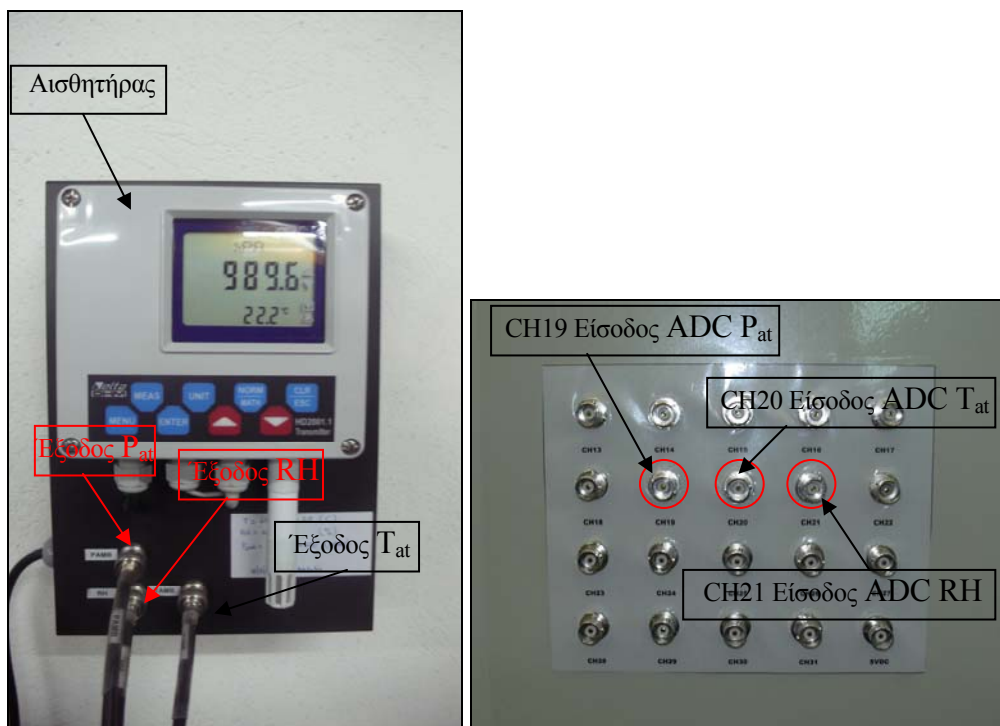
ADC Channel	Κωδικός Μεταλλάκτη	Εύρος Μεταλλάκτη (mbar)	a	b	Se.a	Se.b	ADC Volt Range	ADC CH Full scale volt range	Se.x (V/step)	Θέση Μέτρησης	Μετρούμενο Μέγεθος	Σύνδεση με
CH00	TRA114-1	±20	10.3446	-30.12223	0.006256153	0.024392587	± 5	10	0.00015259	1	P ₀ -P ₁	3-hole Probe
CH01	TRA114-2	±20	10.50441	-30.47733	0.005911793	0.02289664	± 5	10	0.00015259	1	P ₁ -P ₂	3-hole Probe
CH02	TRA114-3	±20	10.41567	-30.2271	0.006747642	0.026196468	± 5	10	0.00015259	2	P ₂ -P ₄	5-hole Probe
CH03	TRA114-4	±20	10.41958	-30.26668	0.005642991	0.021920818	± 5	10	0.00015259	2	P ₃ -P ₁	5-hole Probe
CH04	TRA114-5	±20	10.42711	-30.12966	0.006665244	0.02578667	± 5	10	0.00015259	3	P ₂ -P ₄	5-hole Probe
CH05	TRA115-1	±30	15.45788	-44.66606	0.010224283	0.039671024	± 5	10	0.00015259	2	P ₀ -P ₂	5-hole Probe
CH06	TRA115-2	±30	15.48615	-44.74554	0.01023052	0.039674629	± 5	10	0.00015259	2	P ₀ -P ₃	5-hole Probe
CH07	TRA115-3	±30	15.48133	-44.78673	0.009944618	0.038604043	± 5	10	0.00015259	3	P ₀ -P ₂	5-hole Probe
CH08	TRA115-4	±30	15.51312	-45.03883	0.009103936	0.035414363	± 5	10	0.00015259	3	P ₀ -P ₃	5-hole Probe
CH09	TRA115-5	±30	15.50261	-45.02158	0.009622511	0.037446424	± 5	10	0.00015259	3	P ₃ -P ₁	5-hole Probe
CH10	TRA112	0-25	6.573	-6.47209	0.004089123	0.010811395	± 5	10	0.00015259	1	P _{at} -P ₀	3-hole Probe
CH11	TRA113	0-40	10.40404	-10.1622	0.006305531	0.016017377	± 5	10	0.00015259	2	P ₀ -P _{at}	5-hole Probe
CH12	TRA081	0-100	26.38434	-25.05457	0.012794018	0.027046496	± 5	10	0.00015259	3	P ₀ -P _{at}	5-hole Probe
CH15	TRA040	±20	9.98391	0.01513	0.005638161	0.006540634	± 10	20	0.00030518	01-02	P _{Swt01} - P _{Swt02}	Κέλυφος Bellmouth
CH16	TRA043	±20	10.03344	0.0477	0.006901682	0.007948124	± 10	20	0.00030518	atm-1	P _{atm} - P _{Swt1}	Κέλυφος Σωμμεσστή
CH17	TRA041	±20	10.05348	-0.19345	0.006841301	0.00800062	± 10	20	0.00030518	2-1	P _{Swt2} - P _{Swt1}	Κέλυφος Σωμμεσστή
CH18	TRA044	±20	10.36973	-0.0362	0.005829556	0.006535224	± 10	20	0.00030518	3-2	P _{Swt3} - P _{Swt2}	Κέλυφος Σωμμεσστή

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά των μεταλλικών πίεσης της διάταξης.

3.4 Μέτρηση συνθηκών περιβάλλοντος.

Η μέτρηση των συνθηκών στον περιβάλλοντα χώρο της διάταξης γίνεται με αισθητήρα φίρμας Delta Ohm τύπου HD2001.1 (βλ. παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά) με κωδικό εργαστηρίου TRA116, ο οποίος βρίσκεται στον ίδιο χώρο με τον συμπίεστή σε απόσταση 5 μέτρων από αυτόν. Ο αισθητήρας αυτός μετρά την απόλυτη πίεση P_{at} (βαρομετρική), την θερμοκρασία T_{at} και την % σχετική υγρασία RH (Relative Humidity) του περιβάλλοντος αέρα. Έχει τρεις εξόδους σήματος (τάση), μία για κάθε μέγεθος, οι οποίες μέσω συνδέσεων BNC και καλωδίων σήματος κατευθύνονται στην είσοδο του ADC (βλ. Σχήμα 3.18).

Ο κατασκευαστής του αισθητήρα δίνει τις χαρακτηριστικές – γραμμικές – καμπύλες Μέγεθος – Τάσης για κάθε μέγεθος. Η καμπύλες αυτές είναι της μορφής $y=a \cdot x+b$ όπου y είναι το μέγεθος (P_{at} , T_{at} , RH) και x η τάση εξόδου του αισθητήρα και δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.4).



Σχήμα 3.18: Αισθητήρας μέτρησης των ατμοσφαιρικών συνθηκών της διάταξης.

ADC Channel	Μέγεθος	ADC Volt Range	a	b	Accuracy
CH19	P_{at} (mbar)	±10 Volt	50	600	±0.5mbar @ 25°C
CH20	T_{at} (°C)	±10 Volt	10	-20	±0.3°C
CH21	RH (%)	±10 Volt	10	0	±2.5%

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά του αισθητήρα ατμοσφαιρικών συνθηκών της διάταξης.

3.5 Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής πτερωτών.

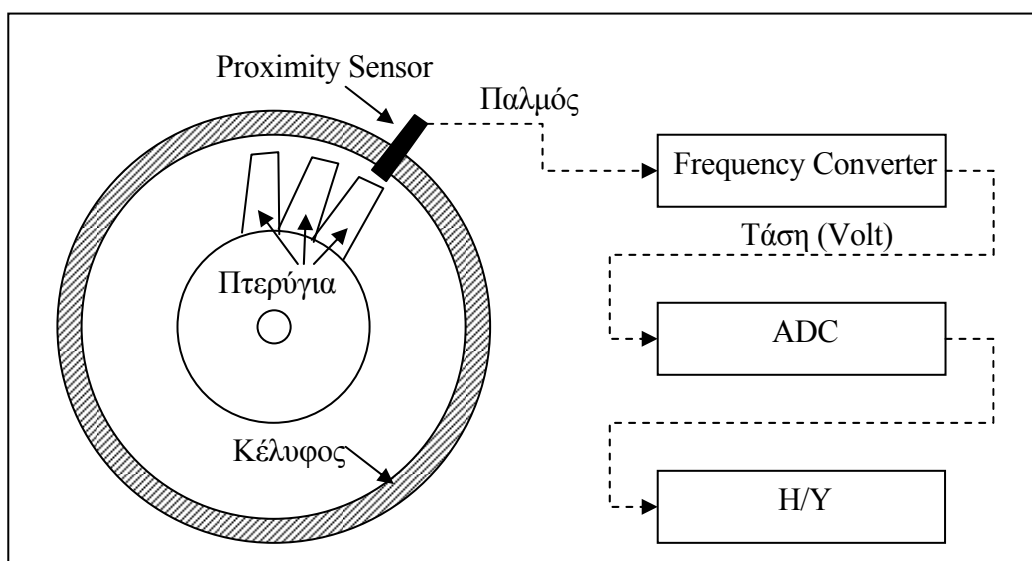
Στη διάταξή μας, η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής των πτερωτών γίνεται με χρήση αισθητήρων προσέγγισης (Proximity Switch Sensors) και μετατροπέων συχνότητας σε τάση (Frequency to Voltage Converter). Η διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 3.19 στην οποία ο αισθητήρας προσέγγισης είναι βιδωμένος στο κέλυφος ακριβώς πάνω από την πτερωτή και κάθε φορά που περνά ένα πτερύγιο από μπροστά του στέλνει ένα παλμό στον μετατροπέα συχνότητας. Ο μετατροπέας συχνότητας με τη σειρά του στέλνει στην έξοδό του (ADC) μια τάση ανάλογη της συχνότητας των παλμών που δέχεται. Έτσι, γνωρίζοντας του συντελεστές a , b της γραμμικής συνάρτησης $y=a \cdot x+b$ όπου y είναι η συχνότητα f_b που δέχεται ο μετατροπέας συχνότητας και x η τάση εξόδου του, μπορούμε να υπολογίσουμε τις στροφές ανά λεπτό (RPM) N της πτερωτής μέσω της σχέσης (3.24). Στη διάταξή μας, έχουμε 34 πτερύγια ($z=34$) σε κάθε πτερωτή. Οι συντελεστές a , b υπολογίζονται μέσω της βαθμονόμησης του μετατροπέα συχνότητας που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.5.3.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτή μέτρησης ταχύτητας περιστροφής είναι τα εξής : 1^{ον}) Απαιτεί ελάχιστες παρεμβάσεις στη διάταξη, δηλαδή δύο οπές με σπείρωμα στο κέλυφος του συμπιεστή, μία πάνω από κάθε πτερωτή. 2^{ον}) Προσδίδει μεγάλη ακρίβεια μέτρησης καθώς το σφάλμα της είναι $\sigma = \sigma_b \cdot 60/z$.

Σε παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.5) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων και των χαρακτηριστικών τους που αναφέραμε.

$$N[rpm] = f_b \frac{60}{z}, \text{ όπου } f_b \text{ η συχνότητα περάσματος πτερυγίων} \quad (3.24)$$

Z ο αριθμός πτερυγίων της πτερωτής



Σχήμα 3.19: Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής πτερωτών της διάταξης.

3.5.1 Αισθητήρες προσέγγισης (Proximity Sensors).

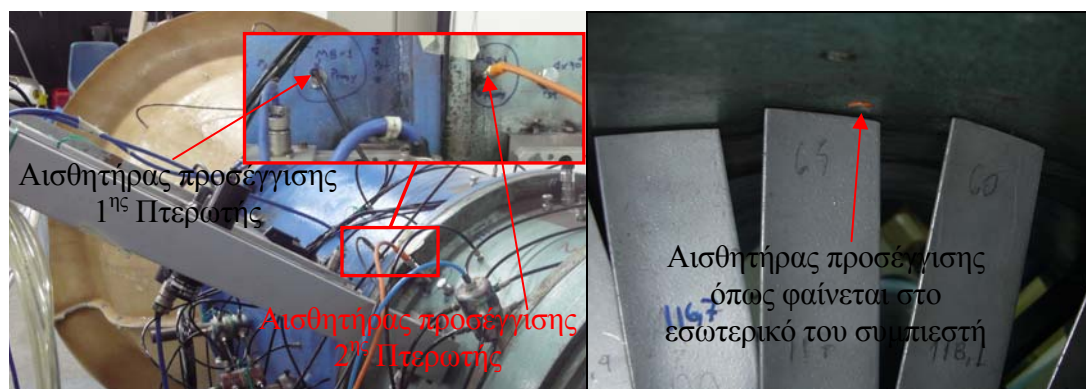
Οι αισθητήρες προσέγγισης (Proximity Sensors) υπάρχουν σε διάφορους τύπους, ανάλογα με την εφαρμογή και χωρίζονται στους αισθητήρες απόστασης (Distance Sensors) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μέτρηση αποστάσεων (0-30mm ανάλογα τον αισθητήρα) του αισθητήρα από ένα αντικείμενο, και στους αισθητήρες-διακόπτες (Switchers) που χρησιμοποιούνται σαν διακόπτες ενός κυκλώματος, όταν ένα αντικείμενο πλησιάσει τον αισθητήρα μέσα στα όρια που ο τελευταίος μπορεί να το ανιχνεύσει.

Στη διάταξή μας χρησιμοποιούμε επαγωγικού τύπου αισθητήρες προσέγγισης – διακόπτες . Οι αισθητήρες αυτοί τροφοδοτούνται με μια τάση στους ακροδέκτες τους και παράγουν ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην κεφαλή τους. Μόλις ένα μεταλλικό αντικείμενο – στόχος – πλησιάσει την κεφαλή του αισθητήρα, ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται τα δινορεύματα που προκαλούνται και ανοίγει το κύκλωμα της τροφοδοσίας του, παράγοντας έτσι έναν παλμό στους ακροδέκτες του τον οποίο χρησιμοποιεί ο μετατροπέας συχνότητας. Σημασία για τους επαγωγικούς αισθητήρες έχει το αντικείμενο στόχος να είναι μεταλλικό και η απόσταση του από την κεφαλή του αισθητήρα να είναι μέσα στα όρια που μπορεί αυτός να αντιληφθεί.

Στη διάταξή μας οι αισθητήρες που χρησιμοποιούμε είναι φίρμας IFM Electronic τύπου IE5123 και IE5282 για την 1^η και 2^η πτερωτή αντίστοιχα, με κωδικούς εργαστηρίου PROXY003-a και PROXY003-b αντίστοιχα (βλ. και παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά). Έχουν εύρος ανίχνευσης 0 – 1.6mm και μέγιστη συχνότητα διακοπής 2000hz. Τυπική μορφή επαγωγικού αισθητήρα προσέγγισης φαίνεται στο Σχήμα 3.20. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.21) φαίνονται οι αισθητήρες επάνω στη διάταξη.



Σχήμα 3.20: Τυπική μορφή αισθητήρα προσέγγισης.



Σχήμα 3.21: Οι αισθητήρες προσέγγισης επάνω στην διάταξη.

3.5.2 Μετατροπέας συχνότητας σήματος σε τάση (frequency – voltage converter).

Οι μετατροπείς συχνότητας σε τάση (Frequency to Voltage Converter) μετατρέπουν την συχνότητα του σήματος εισόδου σε ανάλογη τάση στην έξοδό τους. Στη διάταξή μας χρησιμοποιούμε μετατροπείς συχνότητας φίρμας BRODERSEN τύπου PXF20.230 με κωδικούς εργαστηρίου ELTEM044-2 και ELTEM044 για την 1^η και 2^η πτερωτή αντίστοιχα (βλ. και παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά).

Οι μετατροπείς αυτοί, έχουν επιλογή για τη ρύθμιση του εύρους συχνότητας του παλμού εισόδου. Έτσι, μπορούμε να επιλέξουμε εύρος 0-100hz, 0-500hz, 0-1000hz, 0-2000hz, ή 0-5000hz. Αφού λοιπόν μετράμε τη συχνότητα περάσματος πτερυγίων ($z=24$ πτερύγια), μπορούμε να δούμε ότι μέσω της σχέσης (3.24) μπορούμε να μετρήσουμε σ.α.λ. 0-176RPM, 0-882RPM, 0-1764RPM, 0-3529RPM, ή 0-8823RPM αντίστοιχα.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.22) φαίνονται οι μετατροπείς συχνότητας μέσα στην καμπίνα πρόσκτησης και επεξεργασίας σημάτων αισθητήρων.



Σχήμα 3.22: Οι μετατροπείς συχνότητας (Frequency Converter) μέσα στην καμπίνα πρόσκτησης και επεξεργασίας σημάτων αισθητήρων.

Για κάθε εύρος συχνότητας του μετατροπέα προκύπτει και μια διαφορετική καμπύλη συχνότητας-τάσης ($y=a \cdot x+b$). Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται στην παρακάτω παράγραφο. Τέλος, οι εξοδοί (τάσεις) των συνδέονται σε κάποιο κανάλι του ADC. Τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων παρουσιάζονται σε παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.5).

3.5.3 Βαθμονόμηση μετατροπέα συχνότητας παλμού σε τάση.

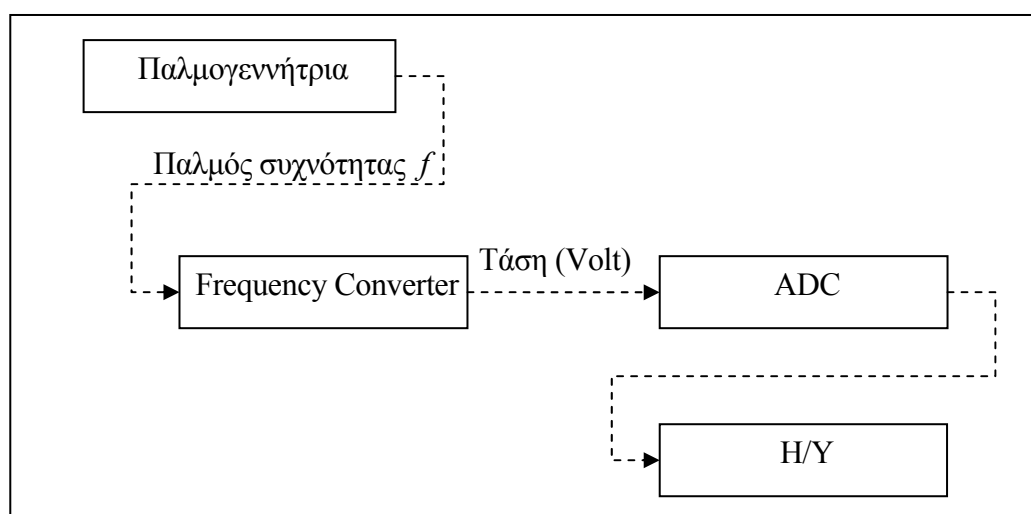
Για τη βαθμονόμηση των μετατροπέων συχνότητας τον τροφοδοτούμε με γνωστές συχνότητες και καταγράφουμε τις τάσεις εξόδου του. Τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούμε για το σκοπό αυτό είναι :

1^{ον}) Μετατροπέα συχνότητας.

2^{ον}) Ψηφιακή παλμογεννήτρια φίρμας Topward Digital Function Generator 8112 (βλ. Σχήμα 3.24 και παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά))

3^{ον}) Αναλογοψηφιακό μετατροπέα (ADC) και Η/Υ.

Η σύνδεσή τους φαίνεται στο Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Βαθμονόμηση του μετατροπέα συχνότητας.



Σχήμα 3.24: Παλμογεννήτρια για τη βαθμονόμηση μετατροπέων συχνότητας.

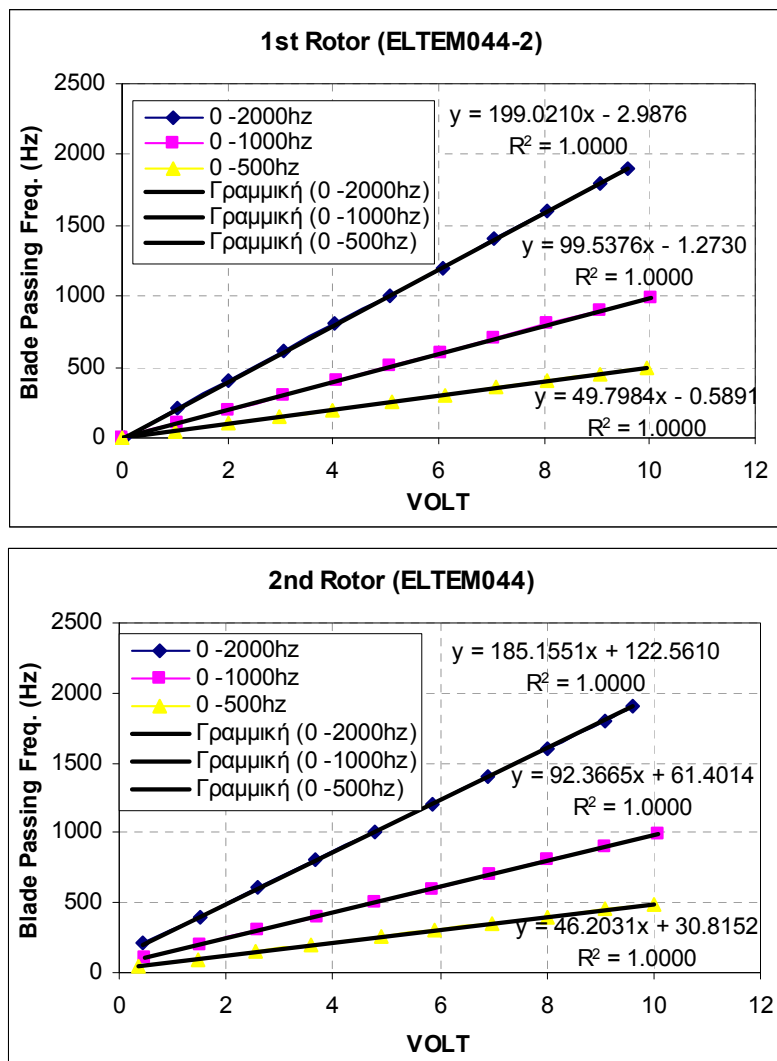
Η διαδικασία βαθμονόμησης έχει ως εξής :

1^{ov}) Ρυθμίζουμε το εύρος συχνότητας του μετατροπέα συχνότητας που θέλουμε να βαθμονομήσουμε.

2^{ov}) Ρυθμίζουμε τη συχνότητα της παλμογεννήτριας σε διάφορες τιμές (μέσα στο εύρος του μετατροπέα από 0Hz έως τη μέγιστη τιμή του εύρους) και καταγράφουμε μέσω του υπολογιστή τις τάσεις εξόδου του μετατροπέα.

3^{ov}) Κάνουμε τα βήματα 1 και 2 για τα εύρη συχνοτήτων που μας ενδιαφέρουν.

Οι βαθμονομήσεις που κάναμε είναι για εύρη συχνοτήτων 0-500Hz, 0-1000Hz, 0-2000Hz και στην λειτουργία της διάταξης χρησιμοποιούμε την 0-2000Hz αφού αυτή αντιστοιχεί σε 0-3529RPM και οι μέγιστες σ.α.λ. των πτερωτών είναι 3000RPM. Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζονται οι καμπύλες βαθμονόμησης και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.5) οι συντελεστές a,b των καμπυλών. Στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων, χρησιμοποιούμε για εύρος συχνότητας 0-2kHz τους συντελεστές a·60/34, b·60/34, ώστε να έχουμε ένδειξη σε RPM και όχι σε συχνότητα περάσματος πτερυγίων.



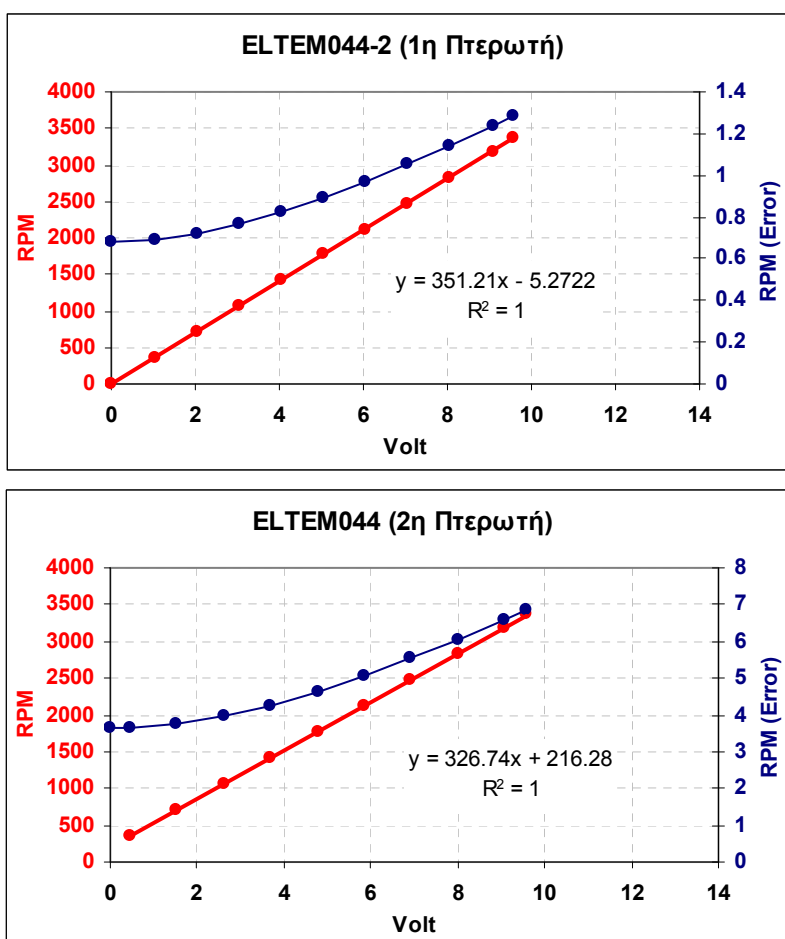
Σχήμα 3.25: Καμπύλες βαθμονόμησης μετατροπέων συχνότητας παλμού σε τάση.

Πτερωτή	ADC CH	Prox.	Freq.Conv.	a (0-500hz)	b (0-500hz)	a (0-1khz)	b (0-1khz)	a (0-2khz)	b (0-2khz)	a·60/34 (0-2khz)	b·60/34 (0-2khz)
1 ^η	CH13	Proxy003a	ELTEM044-2	49.7984	-0.5891	99.5376	-1.273	199.021	-2.9876	351.2135	-5.2722
2 ^η	CH14	Proxy003b	ELTEM044	46.2031	30.8152	92.3665	61.4014	185.1551	122.561	326.7443	216.2841

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά εξαρτημάτων μέτρησης ταχύτητας περιστροφής πτερωτών.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες βαθμονόμησης αφού έχει μετατραπεί η συχνότητα περάσματος πτερυγίων σε σ.α.λ. σύμφωνα με τη σχέση (3.24). Στα ίδια διαγράμματα φαίνονται και οι καμπύλες των σφαλμάτων των σ.α.λ. που υπολογίστηκαν από τη σχέση $\sigma = \sigma_b \cdot 60/z$ όπου το σ_b υπολογίστηκε με αντίστοιχο τρόπο όπως στους μεταλλάκτες πίεσης.

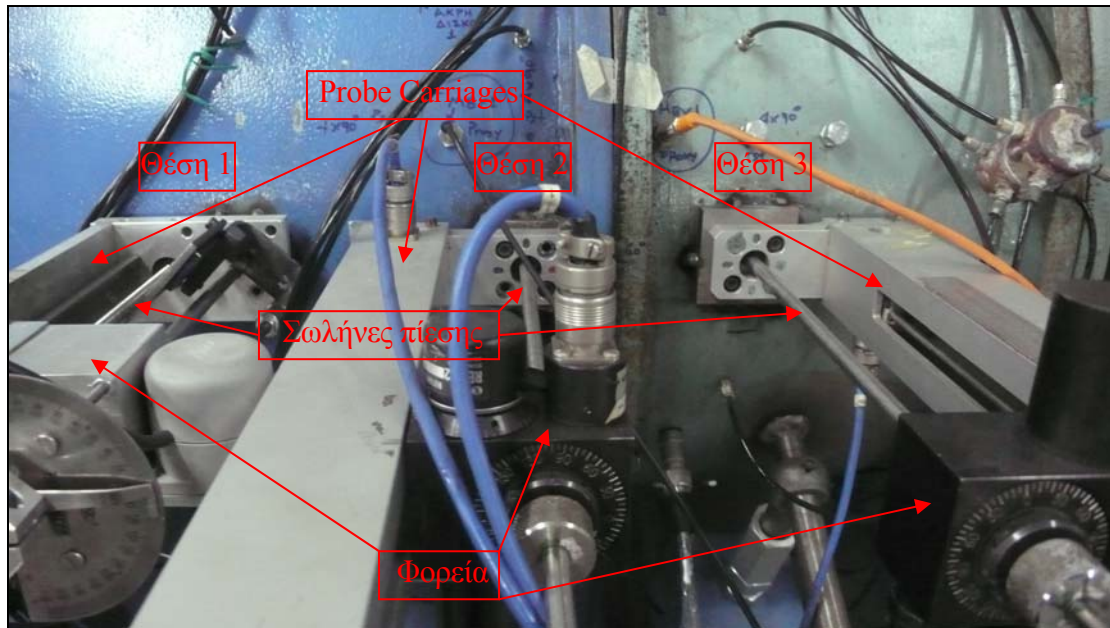
Παρατηρούμε λοιπόν ότι μέχρι τις 3000rpm, για την 1^η πτερωτή το μέγιστο σφάλμα στροφών είναι $\pm 1RPM$ και για τη 2^η πτερωτή είναι $\pm 6RPM$.



Σχήμα 3.26: Καμπύλες βαθμονόμησης σ.α.λ. πτερωτών και σφάλματα.

3.6 Μέτρηση θέσης και γωνίας σωλήνων τριών και πέντε οπών.

Για τη μέτρηση και τη ρύθμιση της ακτινικής θέσης και της γωνίας της κεφαλής των σωλήνων πίεσης, χρησιμοποιούμε στη διάταξη φορεία (Probe Carriages). Τα φορεία αυτά αποτελούνται από ένα στέλεχος αλουμινίου πάνω στο οποίο είναι προσαρμοσμένη μια γλίστρα, πάνω στη οποία ολισθαίνει ένα φορείο, πάνω στο οποίο είναι προσαρμοσμένος ο probe. Στο Σχήμα 3.27 φαίνονται τα probe carriages προσαρμοσμένα πάνω στη διάταξη.



Σχήμα 3.27: Φορεία σωλήνων πίεσης (Probe Carriages) της διάταξης.

Η κίνηση του φορείου (άρα και η ακτινική θέση του probe) γίνεται μέσω μικρού ηλεκτρικού κινητήρα και κοχλία κίνησης. Η ρύθμιση της γωνίας του probe γίνεται είτε χειροκίνητα είτε με μικρό ηλεκτρικό κινητήρα προσαρμοσμένο επάνω στο φορείο, ανάλογα με τον τύπο του probe carriage.

Για την μέτρηση της ακτινικής θέσης και της γωνίας χρησιμοποιούνται είτε ποτενσιόμετρα πολλών στροφών, είτε περιστροφικοί κωδικοποιητές (Rotary Encoders) (βλ. παρακάτω παραγράφους).

Στη διάταξή μας, έχουμε δύο είδη probe carriage. Το πρώτο είναι το απλούστερο και μπορούμε να ρυθμίσουμε την ακτινική θέση του probe μέσω του ηλεκτρικού κινητήρα που είναι συνδεδεμένο με ένα ενσύρματο τηλεχειριστήριο, και την γωνία του probe χειροκίνητα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήσαμε το probe carriage αυτό στην θέση 1, όπου δεν έχουμε ανάγκη περιστροφής του probe αφού στη θέση αυτή η ροή είναι ομοιόμορφη. Η μέτρηση της μετατόπισης του φορείου (άρα και της ακτινικής θέσης της κεφαλής του probe) γίνεται με πολυστροφικό ποτενσιόμετρο και περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.6.1. Τα χαρακτηριστικά του probe carriage αυτού φαίνονται στο Σχήμα 3.28.

Στις θέσεις 2, 3 χρησιμοποιούμε probe carriages που έχουν δυνατότητα ρύθμισης και της γωνίας του probe μέσω ηλεκτρικού κινητήρα, με χρήση ενσύρματου τηλεχειριστηρίου. Η μέτρηση της μετατόπισης του φορείου (άρα και της ακτινικής θέσης της κεφαλής του probe), αλλά και της γωνίας του probe γίνεται με περιστροφικούς κωδικοποιητές, και περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.6.3.

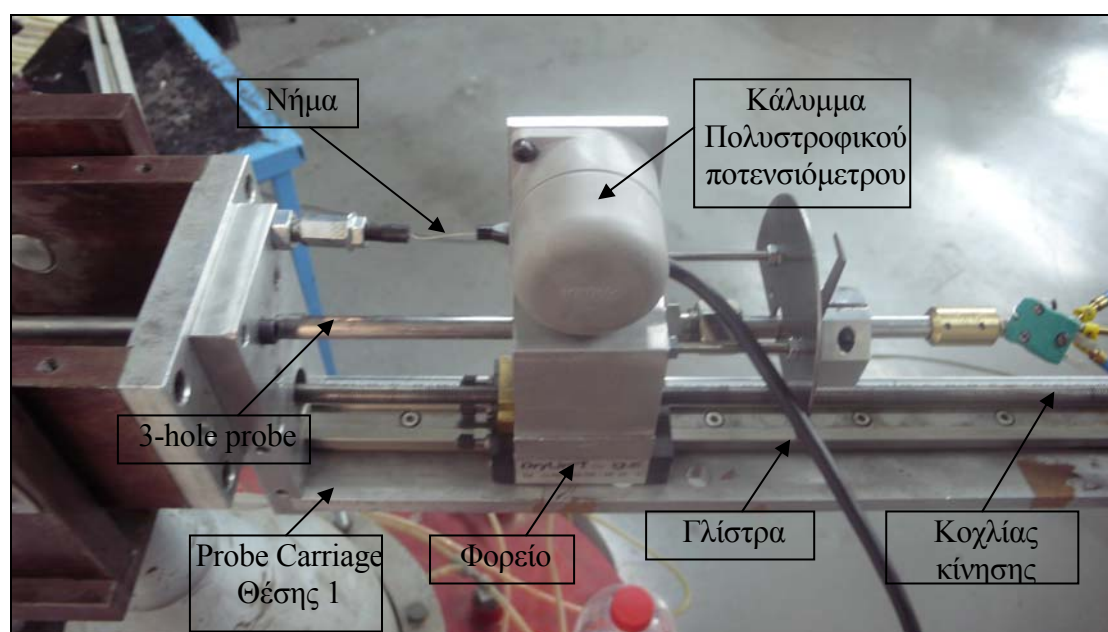
3.6.1 Μέτρηση θέσης με γραμμικό ποτενσιόμετρο.

Στο probe carriage της θέσης 1 στο οποίο προσαρμόζεται ο 3-hole probe, μετράμε την ακτινική θέση του φορείου (άρα και της κεφαλής του probe) με πολυστροφικό ποτενσιόμετρο το οποίο είναι προσαρμοσμένο επάνω στο φορείο. Στον άξονα του ποτενσιόμετρου είναι προσαρμοσμένο ένα τύμπανο που έχει τυλιγμένο ένα νήμα. Η μία άκρη του νήματος είναι δεμένη μόνιμα στο τύμπανο και η άλλη άκρη προσδένεται στη βάση του probe carriage (βλ. Σχήμα 3.28). Στο τύμπανο είναι προσαρμοσμένο ένα περιστροφικό ελατήριο ώστε το νήμα να είναι μόνιμα τεντωμένο.

Η αλλαγή της θέσης του φορείου προκαλεί αλλαγή του μήκους του νήματος, άρα στροφή του άξονα του ποτενσιόμετρου, άρα αλλαγή της τάσης εξόδου του ποτενσιόμετρου.

Το ποτενσιόμετρο αυτό είναι γραμμικό, αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή της γωνίας στροφής του άξονά του είναι ανάλογη της μεταβολής της τάσης στην έξοδο του ποτενσιόμετρου. Έτσι, αφού η μετατόπιση του φορείου είναι ανάλογη της μεταβολής της γωνίας στροφής, τότε θα είναι και ανάλογη της τάσης εξόδου του ποτενσιόμετρου.

Έτσι, για να έχουμε γνώση της μετατόπισης του φορείου, πρέπει να γίνει βαθμονόμηση του ποτενσιόμετρου, η οποία περιγράφεται παρακάτω στο κεφάλαιο 3.6.2.



Σχήμα 3.28: Φορείο σωλήνα πίεσης τριών οπών (3-hole Probe Carriage) της διάταξης.

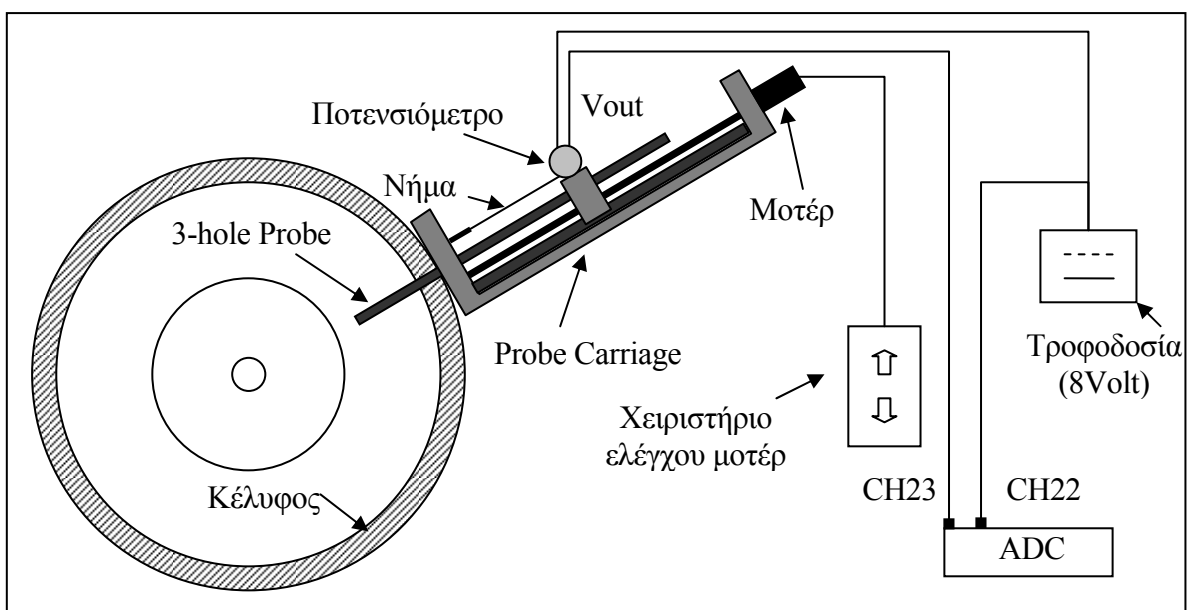
3.6.2 Βαθμονόμηση γραμμικού ποτενσιόμετρου.

Πριν τη βαθμονόμηση του γραμμικού ποτενσιόμετρου, ρυθμίζουμε τη θέση του probe επάνω στο φορείο και τη θέση του φορείου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σάρωση σε όλο το ύψος του καναλιού της ροής. Για τη βαθμονόμηση, ξεκινάμε από την μικρότερη ακτίνα (η κεφαλή του probe στο hub) και καταγράφουμε την τάση εξόδου του ποτενσιόμετρου και τη θέση (σε mm) του φορείου. Στη συνέχεια, καταγράφουμε τουλάχιστον άλλα δύο σεντ τιμών σε μεγαλύτερες ακτίνες, μέχρι το shroud μετρώντας την μετατόπιση του φορείου με χάρακα. Η σχέση ακτίνας R (σε mm) – Τάσης εξόδου ποτενσιόμετρου, είναι $R=a \cdot V+b$.

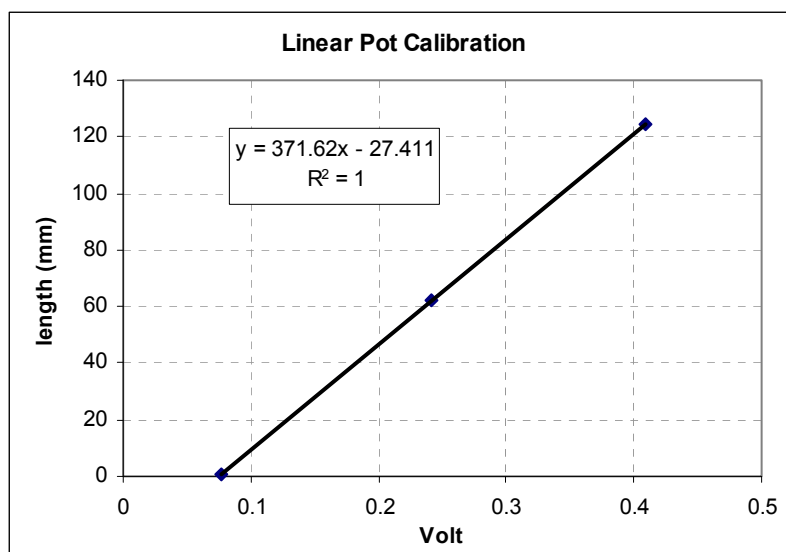
Η τάση εξόδου του ποτενσιόμετρου συνδέεται στο κανάλι CH23 του ADC, ώστε να τη χρησιμοποιήσουμε από το λογισμικό πρόσκτησης δεδομένων στο οποίο έχουμε εισάγει τους συντελεστές a , b της βαθμονόμησης, για να έχουμε την ένδειξη και να καταγράφουμε την ακτίνα (σε mm) του probe. Επίσης, η τάση τροφοδοσίας του ποτενσιόμετρου (8Volt) συνδέεται παράλληλα και στο κανάλι CH22 του ADC ώστε να έχουμε ένδειξη της διακύμανσής της, για να ξέρουμε αν η τιμή της ακτίνας R είναι πραγματική ή λανθασμένη σε περίπτωση που η τάση τροφοδοσίας μεταβληθεί σημαντικά από την προκαθορισμένη τιμή για το συγκεκριμένο ποτενσιόμετρο.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.6) παρουσιάζονται οι σταθερές βαθμονόμησης του ποτενσιόμετρου, στο Σχήμα 3.29 το σχεδιάγραμμα ελέγχου και μέτρησης της θέσης του 3-hole probe carriage, και στο Σχήμα 3.30 η καμπύλη βαθμονόμησης.

Όπως βλέπουμε από τη βαθμονόμηση, $R^2=1$, όμως η ακρίβεια της ακτινικής θέσης του άξονα της κεντρικής οπής του probe είναι $\pm 0.5\text{mm}$ καθώς η απόσταση του άξονα της οπής από τον άξονα συμμετρίας του συμπιεστή έχει μετρηθεί με τέτοια ακρίβεια.



Σχήμα 3.29: Έλεγχος και μέτρηση ακτίνας στο 3-hole probe carriage.



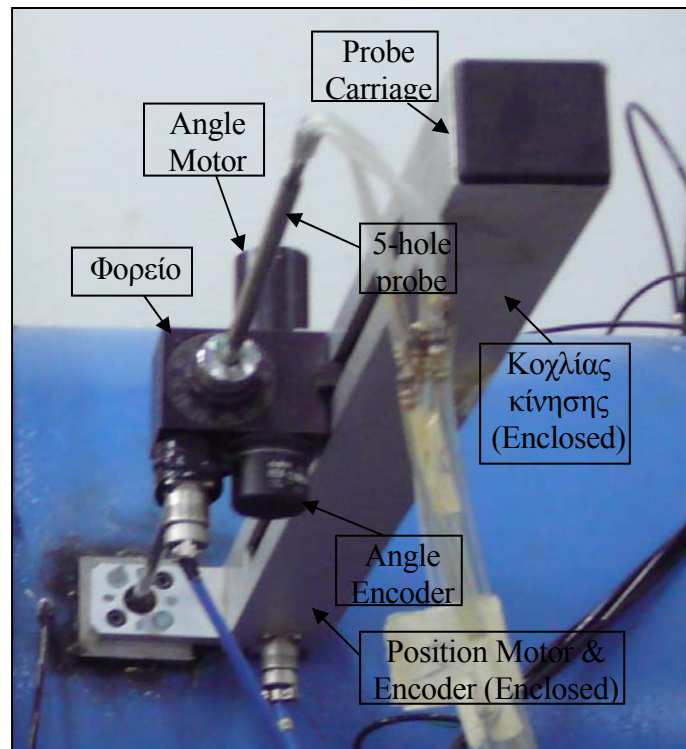
Σχήμα 3.30: Καμπύλη βαθμονόμησης του γραμμικού ποτενσιόμετρου.

Καλώδιο	ADC Channel	a(mm/Volt)	b(mm)
Έξοδος Pot	CH23	371.62	-27.411
Τροφοδοσία Pot (8V)	CH22	1	0

Πίνακας 3.6: Σταθερές βαθμονόμησης του γραμμικού ποτενσιόμετρου.

3.6.3 Μέτρηση θέσης και γωνίας με περιστροφικούς κωδικοποιητές (Rotary encoders)

Στα 5-hole probe carriages ο έλεγχος της ακτινικής θέσης και της γωνίας του probe γίνεται με συστοιχίες μοτέρ – rotary encoder – controller για την κάθε κίνηση. Η κίνηση για την ακτινική μετατόπιση γίνεται μέσω κοχλία κίνησης ο οποίος κινεί το φορείο. Πάνω στο φορείο βρίσκεται το 2^ο μοτέρ που αλλάζει την γωνία του probe μέσω ατέρμονα κοχλία (που είναι συνδεδεμένος στον άξονα του μοτέρ) και κορώνας (πάνω στην οποία συσφίγγεται ο probe). Οι rotary encoders είναι συνδεδεμένοι στον άξονα των μοτέρ, έτσι όσο περιστρέφεται ο άξονας του μοτέρ, τόσο περιστρέφεται και ο άξονας του encoder. Η παραπάνω περιγραφή φαίνεται στο Σχήμα 3.31.



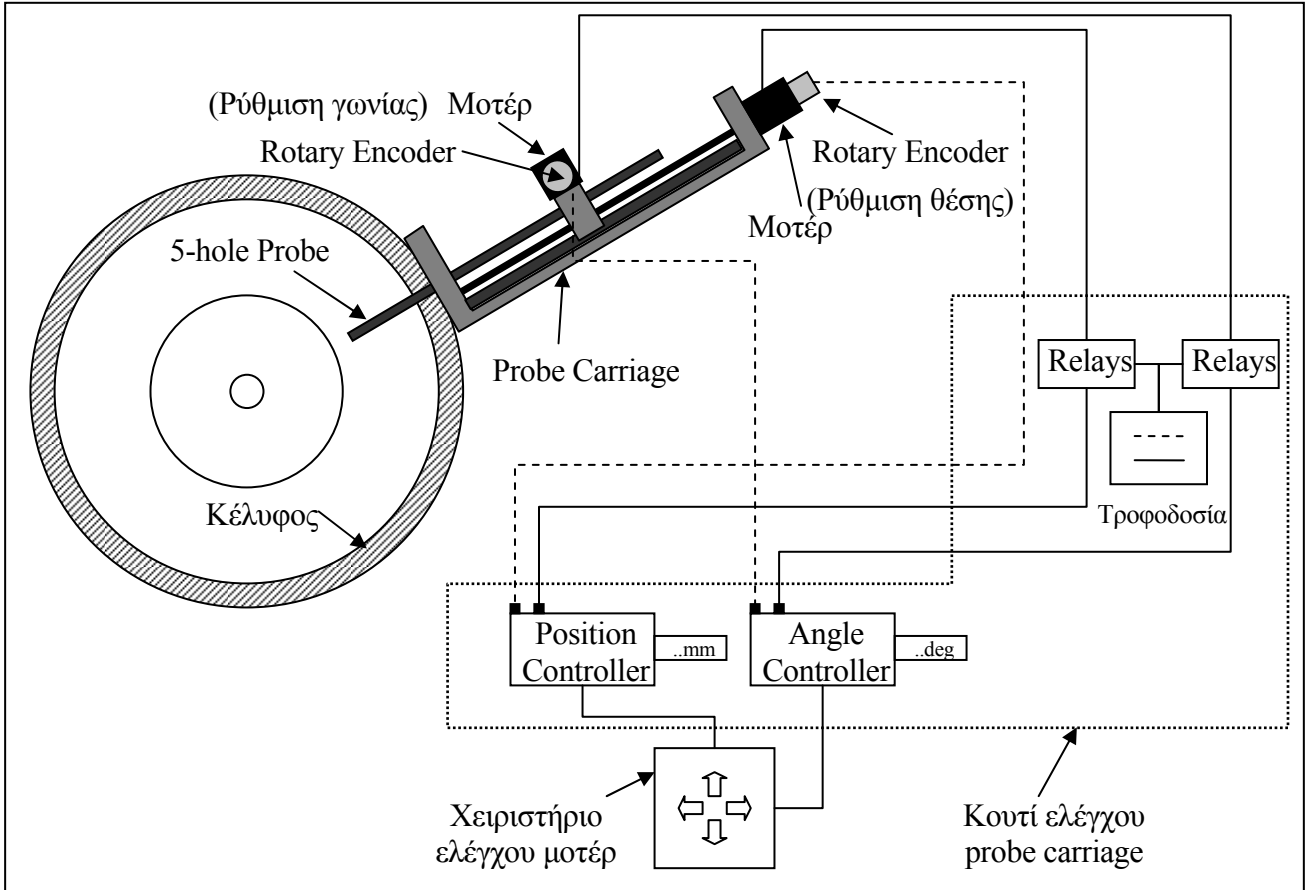
Σχήμα 3.31: 5-hole probe carriage.

Το κύριο χαρακτηριστικό των rotary encoder είναι οι παλμοί που στέλνουν στην έξοδό τους σε μια πλήρη περιστροφή του άξονά τους. Ο αριθμός των παλμών ανά περιστροφή εξαρτάται από το είδος και τον τύπο του encoder. Η έξοδος των encoder συνδέεται σε έναν controller, ο οποίος διαβάζει τους παλμούς. Ένας παλμός αντιστοιχεί σε μια γωνία στροφής του άξονα του encoder και άρα του άξονα του μοτέρ. Έτσι, αν γνωρίζουμε τις σχέσεις μετάδοσης κίνησης και τους παλμούς/1 περιστροφή του encoder, μπορούμε να γνωρίζουμε την ακτινική μετατόπιση και τη γωνία στροφής του probe.

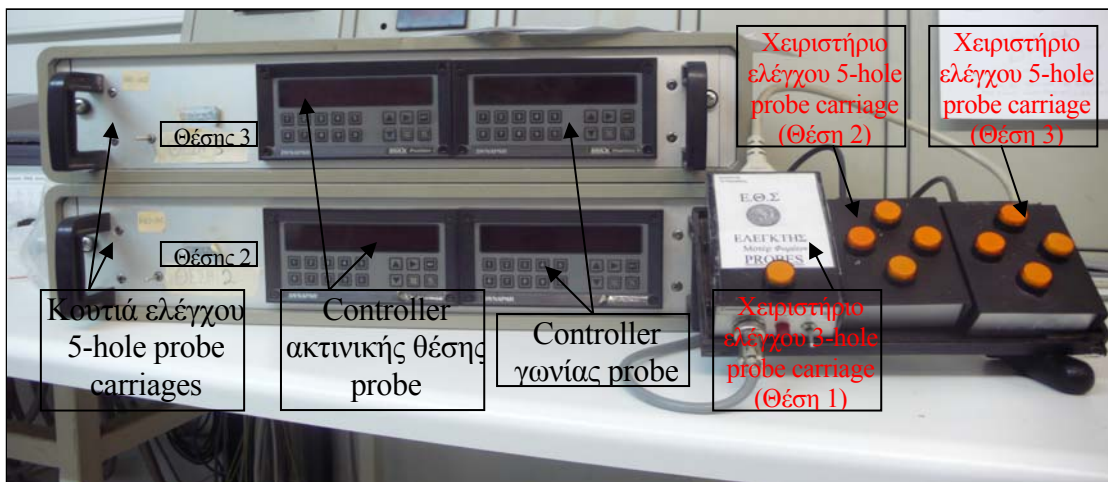
Στη διάταξή μας, χρησιμοποιούμε controller φίρμας DYNAPAR τύπου Max Position 1 (βλ. παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά). Ο controller αυτός έχει ενσωματωμένα τις σχέσεις μετάδοσης κίνησης και τον αριθμό παλμών/περιστροφή του encoder. Σαν είσοδο, λαμβάνει 1^{ov} τους παλμούς του encoder, 2^{ov} εξωτερικά από τον χρήστη τις οριακές θέσης (σε mm ή degrees) προς τις δύο κατευθύνσεις του μοτέρ και 3^{ov} το σταμάτημα ή ξεκίνημα του μοτέρ μέσω ενσύρματου τηλεχειριστηρίου. Τα όρια αυτά είναι χρήσιμα για να μπορούμε να βεβαιωθούμε για παράδειγμα ότι η κεφαλή του probe δεν θα ακουμπήσει στο εσωτερικό κέλυφος (Hub) του συμπιεστή. Σαν έξοδο, ανοιγοκλείνει τους ρελέδες (relays) που δίνουν ρεύμα στο DC μοτέρ προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση. Έτσι, αν ο χρήστης έχει πατημένο το κουμπί προς μια κατεύθυνση του μοτέρ και η κίνηση φτάσει στο όριο που έχουμε προγραμματίσει τον controller, τότε αυτός θα δώσει σήμα στο relay για κόψει την παροχή ρεύματος στο μοτέρ για αυτήν την κατεύθυνση, ώστε να μην ξεπεραστεί το όριο.

Έτσι, για κάθε κίνηση (γραμμική ή γωνιακή) χρειαζόμαστε 1 controller και 1 encoder. Άρα για κάθε probe carriage χρειαζόμαστε 2 controller και 2 encoder. Οι

controller, τα relays και το κύκλωμα τροφοδοσίας, για κάθε probe carriage βρίσκονται μέσα σε ένα κουτί. Τα κουτιά και τα χειριστήρια ελέγχου των probe carriages φαίνονται στο Σχήμα 3.33 και η συνδεσμολογία του ελέγχου των probe carriages αυτών στο Σχήμα 3.32.



Σχήμα 3.32: Έλεγχος και μέτρηση ακτινικής θέσης και γωνίας στο 5-hole probe carriage.



Σχήμα 3.33: Κουτιά και χειριστήρια ελέγχου probe carriages.

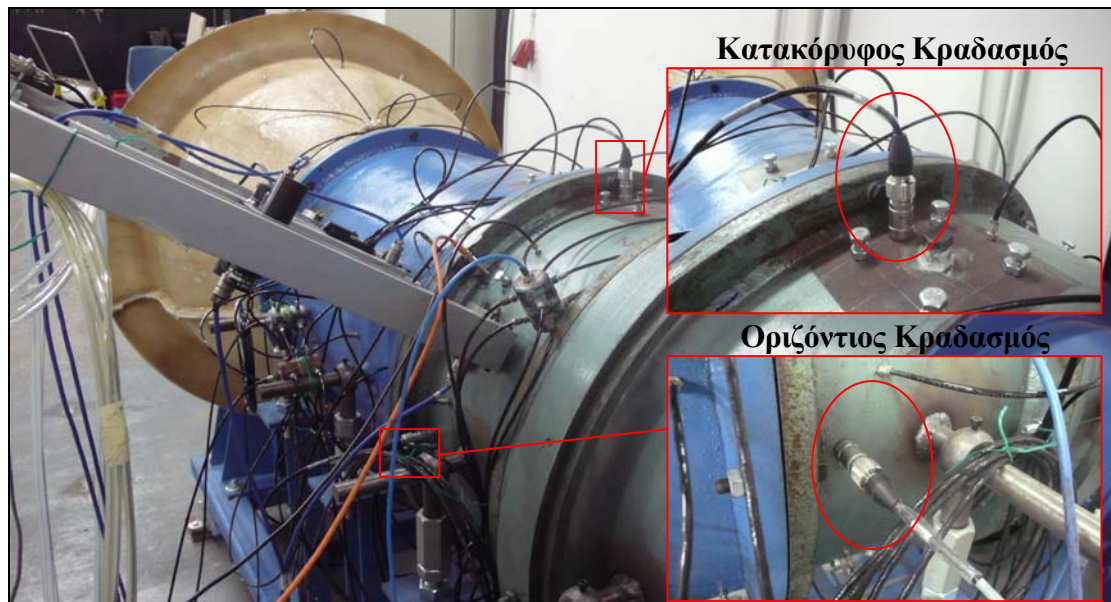
Να αναφέρουμε και εδώ, ότι η ακρίβεια μέτρησης της απόστασης με χρήση αυτών των encoder και του τρόπου μετάδοσης κίνησης, είναι κάτω από 100 μ m για την ακτινική θέση και κάτω από 0.1° για την γωνία. Όμως η ακρίβεια της ακτινικής θέσης του άξονα της κεντρικής οπής του probe είναι $\pm 0.5^\circ$ καθώς η απόσταση του άξονα της οπής από τον άξονα συμμετρίας του συμπιεστή έχει μετρηθεί με τέτοια ακρίβεια. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, η ακρίβεια της γωνίας του άξονα της κεντρικής οπής του probe είναι ± 0.5 mm καθώς η γωνία του άξονα της οπής από τον άξονα συμμετρίας του συμπιεστή έχει μετρηθεί με τέτοια ακρίβεια.

Τέλος, οι τιμές της ακτίνας και της γωνίας της κεφαλής του probe δεν εισάγονται στον Η/Υ μέσω σύνδεσης του controller με τον ADC, αλλά χειροκίνητα στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων, αφού τις διαβάσουμε από την οθόνη των controllers.

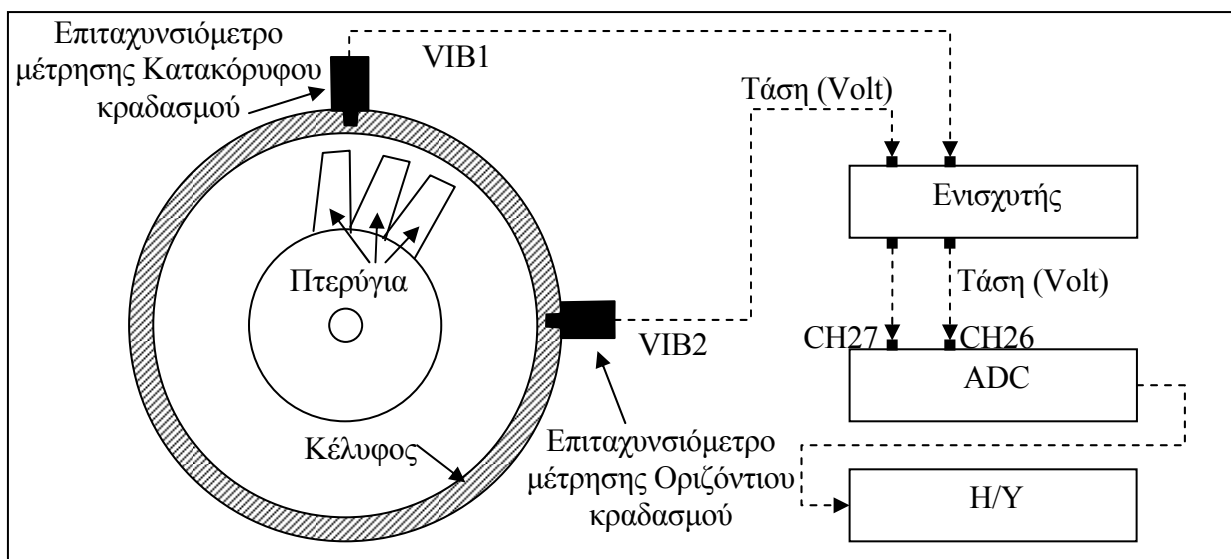
Το πρόσημο της γωνίας της κεφαλής του probe που διαβάζουμε από την οθόνη του controller είναι θετικό όταν ο probe περιστρέφεται δεξιόστροφα και αρνητικό όταν περιστρέφεται αριστερόστροφα, κοιτώντας τον probe από τα σωληνάκια προς την κεφαλή του.

3.7 Μέτρηση κραδασμών.

Στη διάταξή μας, μετράμε τον κραδασμό της (Vibration) στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Χρησιμοποιούμε δύο επιταχυνσιόμετρα (accelerometers) βιδωμένα επάνω στη διάταξη (βλ. Σχήμα 3.34), έναν ενισχυτή σήματος εξόδου επιταχυνσιόμετρων (βλ. Σχήμα 3.37) και έναν ADC και Η/Υ. Η έξοδος των επιταχυνσιόμετρων συνδέεται στην είσοδο του ενισχυτή και η έξοδος του ενισχυτή σε κάποιο κανάλι του ADC ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον Η/Υ. Το μέγεθος που μετράμε είναι η επιτάχυνση (m/s^2) του κραδασμού. Η συνδεσμολογία φαίνεται στο Σχήμα 3.35. Τα στοιχεία των εξαρτημάτων και η θέση σύνδεσής τους φαίνονται σε παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.7).



Σχήμα 3.34: Επιταχυνσιόμετρα επάνω στη διάταξη.



Σχήμα 3.35: Συνδεσμολογία επιταχυνσιόμετρων για μέτρηση κραδασμών.

Τα επιταχυνσιόμετρα συνδέονται στο κέλυφος του συμπιεστή μέσω κοχλιοσύνδεσης (Stud screw) ώστε να έχουμε καλή μετάδοση κραδασμού από τη διάταξη στον αισθητήρα. Επίσης, η αξονική θέση των επιταχυνσιόμετρων βρίσκεται πάνω από την 2^η περωτή, ώστε να είναι κοντά στην πηγή του κραδασμού που μας ενδιαφέρει, και ο κραδασμός που μας ενδιαφέρει προέρχεται από τις ταλαντώσεις των περωτών λόγω εμφάνισης αζυγοσταθμίας τους από πιθανή αποκόλληση μεταλλικού κομματιού τους, λόγω πιθανής επαφής των πτερυγίων στο κέλυφος, λόγω πιθανής επαφής των δίσκων μεταξύ τους ή μεταξύ των δίσκων και του εσωτερικού κελύφους (Hub), ή λόγω πιθανών αεροελαστικών συμπεριφορών των πτερυγίων που προκαλούν κραδασμό (Fluttering).

Επιταχυνσιόμετρα Διάταξης

Στη διάταξή μας, χρησιμοποιούμε επιταχυνσιόμετρα φίρμας Bruel & Kjaer τύπου 8341 με κωδικό εργαστηρίου VIB026 και VIB027 για μέτρηση κατακόρυφου και οριζόντιου κραδασμού αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 3.36 και παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά). Τα επιταχυνσιόμετρα αυτά έχουν ευαισθησία (έξοδος) $100\text{mV/g} \approx 10\text{mV}/(\text{m/s}^2)$ και όριο επιτάχυνσης έως $\pm 50\text{g}$. Η έξοδος του επιταχυνσιομέτρου είναι γραμμική. Η τάση εξόδου τους όπως παρατηρούμε είναι πολύ μικρή (10mV ανά 1m/s^2), γι' αυτό χρησιμοποιούμε τον ενισχυτή.



Σχήμα 3.36: Bruel & Kjaer^[38]. Επιταχυνσιόμετρα της διάταξης.

Ενισχυτής Σήματος Επιταχυνσιομέτρων Διάταξης

Στη διάταξή μας, χρησιμοποιούμε ενισχυτή σήματος εξόδου επιταχυνσιομέτρων φίρμας Bruel & Kjaer τύπου Nexus 2693-0S4 με κωδικό εργαστηρίου VIB029 (βλ. Σχήμα 3.37 και παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά). Εφόσον έξοδος του επιταχυνσιομέτρου είναι γραμμική $y=a \cdot x$ όπου y είναι η τάση σε mV και x η επιτάχυνση του κραδασμού σε m/s^2 και $a \approx 10\text{mV}/(\text{m/s}^2)$ η κλίση, χρησιμοποιούμε τέτοιο συντελεστή ενίσχυσης ($K \approx 10$), ώστε η κλίση να είναι $a=100\text{mV}/(\text{m/s}^2)$. Όμως, ο ενισχυτής στην έξοδό του βγάζει τάση και στο λογισμικό πρόσκτησης δεδομένων από τον ADC, χρησιμοποιούμε μετατροπή τάσης εισόδου ADC σε μετρούμενο μέγεθος. Άρα, ο συντελεστής a που χρησιμοποιούμε στην πρόσκτηση δεδομένων είναι $a=1/100(\text{m/s}^2)/\text{mV}=10(\text{m/s}^2)/\text{V}$. Τα κανάλια του ADC που έχουμε συνδέσει τις εξόδους του ενισχυτή έχουν εύρος $\pm 10\text{V}$. Έτσι, βλέπουμε ότι η ενίσχυση είναι επαρκής για επιτάχυνση κραδασμού μέχρι περίπου $\pm 10\text{g}$.



Σχήμα 3.37: Ενισχυτής σήματος εξόδου επιταχυνσιμέτρων της διάταξης.

Κραδασμός	ADC CH	Amp. CH	Cable	Accelerometer	Sensitivity(mV/(m/s ²))	Amp. Gain	Data Acq. Slope a ((m/s ²)/V)
Κατακόρυφος	CH26	1	VIB1	VIB026 (SN: 50525)	10.15 (VIB026)	9.852	10
Οριζόντιος	Ch27	2	VIB2	VIB027 (SN: 50526)	9.995 (VIB027)	10.005	10

Πίνακας 3.7: Χαρακτηριστικά εξαρτημάτων μέτρησης κραδασμών διάταξης.

3.8 Μέτρηση ισχύος κινητήρα 1^{ης} Πτερωτής.

Ο κινητήρας της 1^{ης} πτερωτής είναι Η/Κ 45kW 3Φ 2-πολικός βραχυκυκλωμένου δρομέα φίρμας Valiadis τύπου K225M-2 (βλ. και [20]). Η οδήγησή του γίνεται μέσω inverter φίρμας LG τύπου iP5A (βλ. παράρτημα 0 για τεχνικά χαρακτηριστικά). Το inverter αυτό έχει δύο αναλογικές εξόδους για μέτρηση της τάσης V και του ρεύματος I τροφοδοσίας του κινητήρα αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 3.38). Οι εξοδοί αυτοί έχουν μια τάση ανάλογη του μεγέθους (V και I), είναι συνάρτηση δηλαδή της μορφής $y=a \cdot x$ όπου y είναι το μέγεθος και x η τάση εξόδου. Οι συντελεστές a δίνονται από τον κατασκευαστή του inverter. Τις εξόδους λοιπόν αυτές τις συνδέουμε σε δύο κανάλια του ADC ώστε να μπορούμε να βλέπουμε και να καταγράφουμε την ισχύ P που απορροφά ο Η/Κ από την γνωστή σχέση $P=V \cdot I$. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντελεστές a και τα κανάλια του ADC που συνδέουμε τις εξόδους αυτές.



Σχήμα 3.38: Έξοδοι inverter σήματος τάσης και ρεύματος τροφοδοσίας του Η/Κ.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η ισχύς αυτή που μετράμε περιέχει την απορρόφηση ισχύος από την πτερωτή, τις τριβές των εδράνων, τις τριβές του ιμάντα, τις μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες του Η/Κ. Άρα, δεν είναι άμεσα χρήσιμη σαν έκφραση της ισχύος που απορροφά η πτερωτή. Αυτό που μπορούμε να κάνουμε για να προσεγγίσουμε την ισχύ που απορροφά η πτερωτή είναι να αφαιρέσουμε από την ολική ισχύ, αυτή που καταναλώνεται όταν έχουμε λειτουργία χωρίς την πτερωτή.

Μέγεθος	ADC Channel	a
Τάση (V σε Volt)	CH25	37.9147 Volt/Volt
Ρεύμα (I σε Ampere)	CH24	8.7313 A/Volt

Πίνακας 3.8: Χαρακτηριστικά εξόδου inverter για ισχύ Η/Κ.

3.9 Αναλογοψηφιακός μετατροπέας (Analog to digital converter – ADC).

Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας (Analog to Digital Converter – ADC) χρησιμοποιείται για την μετατροπή των αναλογικών σημάτων (τάση ή ρεύμα) που παρέχουν διάφορες συσκευές (μεταλλάκτες πίεσης, frequency converters, αισθητήρας περιβαλλοντικών συνθηκών κλπ) σε ψηφιακές, ώστε να μπορούν να μεταφερθούν και να επεξεργαστούν σε έναν Η/Υ.

Τα χαρακτηριστικά του ADC που είναι χρήσιμο να αναφέρουμε εδώ είναι :
 1^{ον}) Ο αριθμός των καναλιών εισόδου και η περιοχή λειτουργίας τους η οποία ορίζεται από την μέγιστη και ελάχιστη τάση εισόδου (V_{max} και V_{min} αντίστοιχα).

2^{ον}) Η διακριτική του ικανότητα (resolution) η οποία ορίζεται από τη σχέση^{[25],[26]} (3.25) ως η ελάχιστη μεταβολή του αναλογικού σήματος που προκαλεί μεταβολή στο ψηφιακό σήμα εξόδου. Στη σχέση αυτή το N είναι ο αριθμός των δυαδικών ψηφίων (bit) του καταχωρητή δεδομένων. Προφανώς, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός N (bit) τόσο καλύτερη

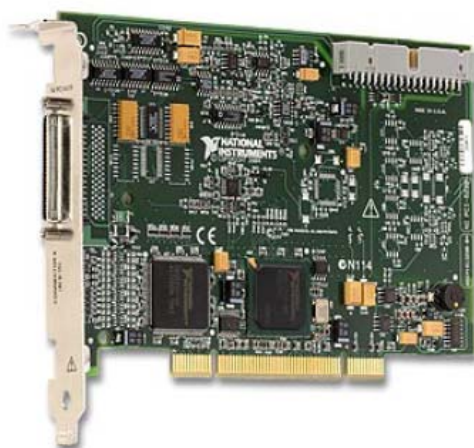
η διακριτική ικανότητα του ADC. Το τυπικό σφάλμα ψηφιοποίησης δίνεται από τη σχέση^[26] (3.26).

$$\delta V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^N - 1}, \quad V_{\max} - V_{\min} : \text{το max και min σήμα εισόδου του ADC} \quad (3.25)$$

N : ο αριθμός των bit του ADC

$$\delta V / (2\sqrt{3}) : \text{τυπικό σφάλμα ψηφιοποίησης ADC.} \quad (3.26)$$

Στη διάταξή μας, χρησιμοποιούμε ADC φίρμας National Instruments (NI) τύπου PCI-6224E (με κωδικό εργαστηρίου ELTEM129) που είναι ουσιαστικά μια κάρτα συνδεδεμένη απευθείας στην motherboard του Η/Υ (βλ. Σχήμα 3.39).



Σχήμα 3.39: Κάρτα ADC NI PCI-6224E.

Ο ADC αυτός είναι 16-bit που σημαίνει ότι η διακριτική ικανότητά του είναι το 0.001526% του εύρους τάσης ($V_{\max} - V_{\min}$) κάθε εισόδου και το τυπικό σφάλμα ψηφιοποίησης είναι το 0.00044% του εύρους τάσης, σύμφωνα με τις σχέσεις (3.25) και (3.26). Είναι επίσης εξοπλισμένος με 32 κανάλια αναλογικών εισόδων με εύρη ± 10 , ± 5 και ± 1 Volt.

3.10 Πρόσκτηση δεδομένων από μετρήσεις (Data Acquisition).

Όλα τα μετρούμενα μεγέθη που περιγράψαμε στο κεφάλαιο αυτό, εισάγονται είτε υπό μορφή αντίστοιχης τάσης μέσω του ADC, είτε χειροκίνητα, στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων ενός Η/Υ.

Για λόγους οργάνωσης, εποπτείας, εξοικονόμησης χώρου-καλωδίων και προσβασιμότητας, τα περισσότερα όργανα που μετατρέπουν σε τάση τα σήματα των αισθητήρων (μεταλλάκτες πίεσης, frequency converters), είναι ενσωματωμένα σε μια

καμπίνα μαζί με τον Η/Υ και τον ADC. Η καμπίνα αυτή είναι δίπλα από τη διάταξη και έχει μια κοινή τροφοδοσία (μία πρίζα) για όλα τα όργανα και τον Η/Υ.

Η καμπίνα αυτή έχει στη μια πλευρά και τις εισόδους για τους μεταλλάκτες πίεσης στις οποίες συνδέονται τα σωληνάκια από τους σωλήνες πίεσης και τις οπές μέτρησης στατικής πίεσης στο κέλυφος του συμπιεστή και του αγωγού εισόδου. Επίσης έχει στην άλλη πλευρά και τις αναλογικές εισόδους του ADC για τα κανάλια CH13 έως CH32, υπό μορφή βύσματος BNC.

Η καμπίνα και τα παραπάνω χαρακτηριστικά φαίνονται στο Σχήμα 3.40.



Σχήμα 3.40: Καμπίνα πρόσκτησης δεδομένων μετρήσεων εγκατάστασης.

Στον Η/Υ της καμπίνας είναι εγκατεστημένο το λογισμικό της κάρτας του ADC και το λογισμικό πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου με το οποίο καταγράφουμε τα

δεδομένα των μετρήσεων και του οποίου τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά περιγράφουμε στην παρακάτω παράγραφο.

3.10.1 Περιβάλλον – Λογισμικό λήψης δεδομένων μετρήσεων.

Το λογισμικό πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου που είναι εγκατεστημένο στον Η/Υ της καμπίνας, συνεργάζεται με το λογισμικό της κάρτας του ADC μόνο για να διαβάσει τις τιμές των τάσεων εισόδου της. Ουσιαστικά, αυτό που κάνει είναι να διαβάσει τις τάσεις εισόδου του ADC και να εξάγει τιμές των πραγματικών μεγεθών που μας ενδιαφέρουν χρησιμοποιώντας τις καμπύλες βαθμονόμησης των οργάνων. Μπορούμε να επιλέξουμε 1^{ov}) από ποια κανάλια θα προκύψει μια μέση τιμή του μεγέθους και μια τυπική απόκλιση, για έναν αριθμό δειγμάτων και μια συχνότητα δειγματοληψίας. Οι μετρήσεις αυτές ονομάζονται Steady Measurements και μας ενδιαφέρει η μέση τιμή τους καθώς τις θεωρούμε χρονικά μόνιμες, 2^{ov}) από ποια κανάλια θα γίνει καταγραφή της χρονοσειράς των μεγεθών για έναν αριθμό δειγμάτων και μια συχνότητα δειγματοληψίας και δημιουργία του φάσματος ισχύος με τη μέθοδο FFT. Οι μετρήσεις αυτές ονομάζονται Fast Response και σε αυτές μας ενδιαφέρει εκτός από την τιμή του μεγέθους και η συχνότητα εμφάνισής του.

Το κύριο αρχείο εισόδου του λογισμικού, είναι ένα αρχείο δεδομένων με όνομα Name.set το οποίο περιλαμβάνει ανά γραμμή τα χαρακτηριστικά των μεγεθών που μετράμε, τα οποία είναι : ο αριθμός καναλιού (Channel), η περιγραφή του μεγέθους (Position), οι μονάδες μέτρησης του μεγέθους (Units), το ημιέυρος της τάσης εισόδου του καναλιού (±τιμή) (Range), τον συντελεστή ενίσχυσης του σήματος (Gain), τον συντελεστή a της βαθμονόμησης (Slope), τον συντελεστή b της βαθμονόμησης (Offset), τον τύπο της μέτρησης (Meas.Type). Επίσης, την συχνότητα δειγματοληψίας και των αριθμό δειγμάτων (Sampling Frequency hz – Number of Samples), την χρονική απόσταση μεταξύ κάθε δειγματοληψίας (Acquisition Time Interval (msec)), το επίπεδο εμπιστοσύνης % που θα υπολογίζεται το σφάλμα των steady measurements, τον αριθμό σημείων για τη δημιουργία του φάσματος ισχύος με τη μέθοδο FFT (Fast response measurements NFFT).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.9) παρουσιάζεται το αρχείο εισόδου του λογισμικού.

Steady-Fast Response Use Flag							
1	1						
0:Bipolar 1:Unipolar Flag Option from Automation and Measurements							
0							
Steady Measurements Settings							
Start-Stop Channel							
0	25						
Sampling Frequency-Number of Samples							
1000	1000						
Channel-Position-Units-Range-Gain-Slope-Offset-MeasType(0:Gen,1:E,2:J,3:K,4:R,5:S,6:T,7:B,8:N,9:Freq,10:Rms-Qmin-Qmax							
0	,1_P0-P1,mbar,+5,	1	10.3446	-30.16742	0	0	0
1	,1_P1-P2,mbar,+5,	1	10.50441	-30.41369	0	0	0
2	,2_P2-P4,mbar,+5,	1	10.41567	-30.27009	0	0	0
3	,2_P3-P1,mbar,+5,	1	10.41958	-30.19997	0	0	0

4	,3_P2-P4,mbar,+5,	1	10.42711	-30.14332	0	0	0			
5	,2_P0-P2,mbar,+5,	1	15.45788	-44.67926	0	0	0			
6	,2_P0-P3,mbar,+5,	1	15.48615	-44.79057	0	0	0			
7	,3_P0-P2,mbar,+5,	1	15.48133	-44.83282	0	0	0			
8	,3_P0-P3,mbar,+5,	1	15.51312	-44.98335	0	0	0			
9	,3_P3-P1,mbar,+5,	1	15.50261	-45.0269	0	0	0			
10	,1_P0-Pat,mbar,+5,	1	6.573	-6.475756	0	0	0			
11	,2_P0-Pat,mbar,+5,	1	10.40404	-10.20297	0	0	0			
12	,3_P0-Pat,mbar,+5,	1	26.38434	-25.15882	0	0	0			
13	,Speed1,rpm,+10,	1	351.2136	-5.2722	0	0	0			
14	,Speed2,rpm,+10,	1	326.7443	216.2841	0	0	0			
15	,P01in-P02in,mbar,+10,	1	9.98391	3.367446E-02	0	0	0			
16	,Pat-Pst1,mbar,+10,	1	10.03344	7.530014E-02	0	0	0			
17	,Pst2-Pst1,mbar,+10,	1	10.05348	-0.1095969	0	0	0			
18	,Pst3-Pst2,mbar,+10,	1	10.36973	-1.985271E-03	0	0	0			
19	,Pamb,mbar,+10,	1	50	600	0	0	0			
20	,Tamb,C,+10,	1	10	-20	0	0	0			
21	,RH,%,+10,	1	10	0	0	0	0			
22	,PotSupply,Volt,+10,	1	1	0	0	0	0			
23	,R1,mm,+10,	1	371.62	-27.411	12	0	0			
24	,Current1,A,+10,	1	8.7313	0	0	0	0			
25	,Voltage1,Volt,+10,	1	37.9147	0	0	0	0			
Card Fast Response Measurements Settings										
Start-Stop Channel										
26	27									
Sampling Frequency-Number of Samples										
10000	8192									
Channel-Position-Units-Range-Gain-Slope-Offset										
26	,vib1-vertical,ms-2,+10,	1	10	0						
27	,vib2-horizontal,ms-2,+10,	1	10	0						
Acquisition Time Interval (msec)										
1000										
Time Interval of Periodic Storage (sec)										
1000										
Steady Measurements Confidense Level										
95										
Fast Response Measurements NFFT										
4096										
Steady-Fast Response Whole Sample Storage Flag										
0	0									

Πίνακας 3.9: Αρχείο εισόδου λογισμικού πρόσκτησης δεδομένων εργαστηρίου.

Σαν δευτερεύοντα αρχεία εισόδου του λογισμικού, αποτελούν τα αρχεία δεδομένων 5holecalib9550101.inp, 5holecalib9550103.inp και 3holecalib.inp τα οποία περιέχουν τους συντελεστές των πολυωνύμων που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση των σωλήνων πίεσης τριών και πέντε οπών. Το λογισμικό χρησιμοποιεί τις καμπύλες βαθμονόμησης των σωλήνων πίεσης, και με δεδομένα τις πιέσεις από τις οπές των σωλήνων πίεσης που διαβάζει από τον ADC, βγάζει στην οθόνη τα μεγέθη της ροής ώστε να γνωρίζουμε σε πραγματικό χρόνο τα χαρακτηριστικά της.

Έτσι, στην οθόνη του Η/Υ κατά λειτουργία του προγράμματος εμφανίζονται τα εξής 4 παράθυρα δίνοντάς μας σε πραγματικό χρόνο, στοιχεία για τα μεγέθη που μετράμε.

1^{ον}) Σχήμα 3.41. Εδώ εμφανίζονται οι τιμές όλων των μεγεθών που καταγράφουμε. Οι τιμές αυτές είναι οι τάσεις εξόδου των οργάνων αλλά και οι τιμές των πραγματικών μεγεθών που προκύπτουν απ' τις καμπύλες βαθμονόμησης τους. Επίσης, φαίνονται και τα μεγέθη της ροής στις θέσεις 1, 2, και 3 που προκύπτουν από τις καμπύλες βαθμονόμησης των probes.

2^{ov}) Σχήμα 3.42. Εδώ εμφανίζεται το διάγραμμα της χρονοσειράς του σήματος των καναλιών που κάνουμε χρονικά μόνιμες μετρήσεις (Steady measurements). Μπορούμε να επιλέξουμε οποιοδήποτε από τα κανάλια αυτά να προβληθεί στο διάγραμμα.

3^{ov}) Σχήμα 3.43. Εδώ εμφανίζεται το διάγραμμα της χρονοσειράς του σήματος των καναλιών που κάνουμε μετρήσεις στις οποίες μας ενδιαφέρει η συχνότητα εμφάνισης του μεγέθους (Fast Response measurements). Μπορούμε να επιλέξουμε οποιοδήποτε από τα κανάλια αυτά να προβληθεί στο διάγραμμα.

4^{ov}) Σχήμα 3.44. Εδώ εμφανίζεται το φάσμα ισχύος των Fast Response measurements.

Chan	Position	Volts	Quantity	Units	St.Dev	P.O.R.P
0	1_P0-P1	2.935	0.194	mbar	0.03	2.70
1	1_P1-P2	2.878	-0.180	mbar	0.03	2.30
2	2_P2-P4	2.799	-1.119	mbar	0.03	2.30
3	2_P3-P1	2.921	0.238	mbar	0.03	2.20
4	3_P2-P4	2.836	-0.572	mbar	0.03	2.30
5	2_P0-P2	2.998	1.657	mbar	0.04	2.40
6	2_P0-P3	2.970	1.199	mbar	0.03	2.60
7	3_P0-P2	2.941	0.703	mbar	0.03	2.10
8	3_P0-P3	2.698	-3.130	mbar	0.03	3.00
9	3_P3-P1	3.209	4.726	mbar	0.03	2.20
10	1_P0-Pat	0.952	-0.219	mbar	0.03	2.30
11	2_P0-Pat	1.152	1.786	mbar	0.03	2.50
12	3_P0-Pat	0.912	-1.105	mbar	0.03	2.60
13	Speed1	2.617	913.988	rpm	0.04	0.00
14	Speed2	0.017	221.979	rpm	0.01	1.80
15	P01in-P02in	0.106	1.089	mbar	0.02	2.60
16	Pat-Pst1	0.117	1.253	mbar	0.02	2.40
17	Pst2-Pst1	0.135	1.245	mbar	0.03	1.20
18	Pst3-Pst2	-0.022	-0.227	mbar	0.02	2.30
19	Pamb	7.785	989.262	mbar	0.02	2.10
20	Tamb	4.307	23.071	C	0.02	2.00
21	RH	4.130	41.303	%	0.02	1.90
22	PotSupply	7.992	7.992	Volt	0.04	1.70
23	R1	1.920	61.839	mm	0.04	2.20
24	Current1	3.327	29.046	A	0.02	1.30
25	Voltage1	3.375	127.977	Volt	0.03	0.80
			RMSsel	RMS		
26	vib1-vertical	0.091	0.190	ms-2		
27	vib2-horizontal	0.077	0.162	ms-2		

Position 1

PC-Pat 10 [-0.21862] P0-Pat 11 [1.786277] P0-Pat 12 [-1.10537]

PC-PL 0 [0.194350] P0-P2 5 [1.656832] P0-P2 7 [0.702863]

PL-PR 1 [-0.18008] P0-P3 6 [1.198936] P0-P3 8 [-3.13035]

Tt 20 [23.07122] P2-P4 2 [-1.11937] P2-P4 4 [-0.57233]

Tamb 20 [23.07122] P3-P1 3 [0.238327] P3-P1 9 [4.726321]

Pamb 19 [989.2615] Tt 20 [23.07122] Tt 20 [23.07122]

RH 21 [41.30323]

ao(deg) 0 ao(deg) 0 ao(deg) 0

Calibration Curves

calib. 3hole 9550101 calib. 5hole 9550103 calib. 5hole 9550103

b final(deg) 0.000000 b final(deg) -9.127149 b final(deg) -1410.552287

a (deg) -18.389828 a (deg) 2.734248 a (deg) -1516.601858

a final (deg) -18.389828 a final (deg) 2.734248 a final (deg) -1516.601858

q(mbar) 0.203274 q(mbar) 1.424947 q(mbar) 0.000000

Pt(mbar) 989.065332 Pt(mbar) 991.151154 Pt(mbar) 988.862214

Ps(mbar) 988.862058 Ps(mbar) 989.726207 Ps(mbar) 988.862214

Mach 0.017138 Mach 0.045346 Mach 0.000000

V(m/s) 5.925161 V(m/s) 15.674437 V(m/s) 0.000000

Vax(m/s) 5.622575 Vax(m/s) 15.458360 Vax(m/s) 0.000000

Vu(m/s) -1.869273 Vu(m/s) 0.738259 Vu(m/s) 0.000000

Vr(m/s) 0.000000 Vr(m/s) -2.486372 Vr(m/s) 0.000000

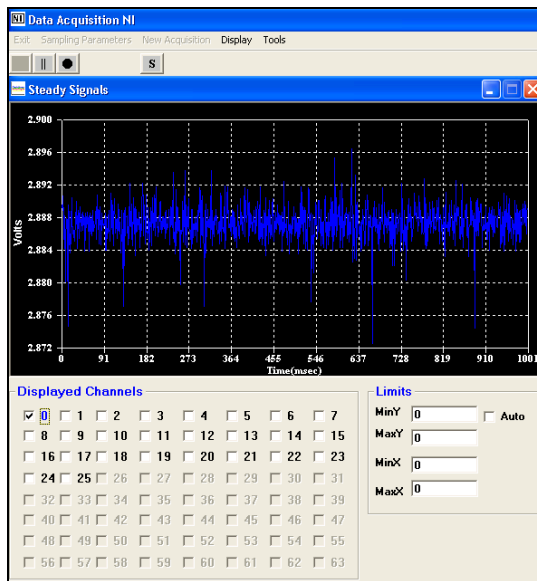
A1[m2] 0.16689711 m1(kg/s) 1.086583

Reset

Position 2

Position 3

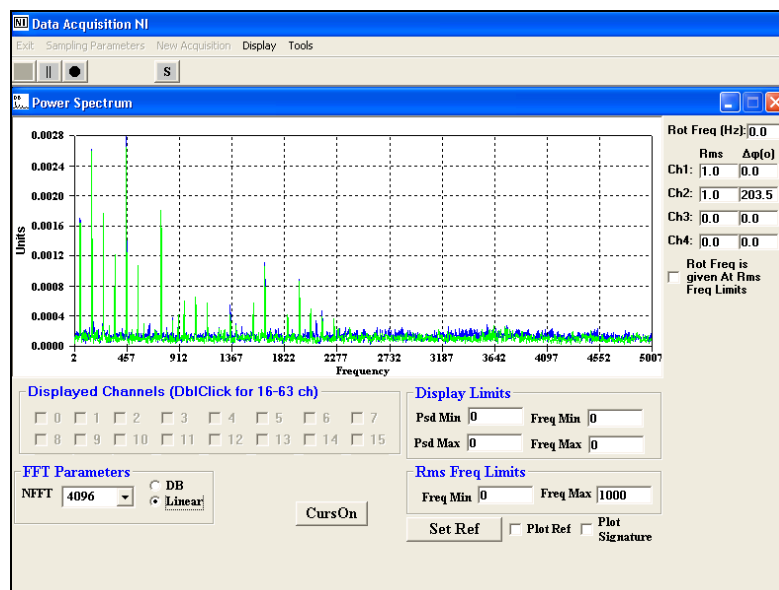
Σχήμα 3.41: Παράθυρο εμφάνισης των τιμών των μεγεθών μέτρησης και της ροής.



Σχήμα 3.42: Παράθυρο εμφάνισης της χρονοσειράς του σήματος των καναλιών του ADC (Steady Measurements).



Σχήμα 3.43: Παράθυρο εμφάνισης της χρονοσειράς του σήματος των καναλιών του ADC (Fast Response Measurements).



Σχήμα 3.44: Παράθυρο εμφάνισης του φάσματος ισχύος των καναλιών που κάνουμε Fast Response Measurements (συνήθως κραδασμοί και ηχητικές εκπομπές).

Όλα τα παραπάνω διαγράμματα υπάρχουν για λόγους εποπτείας των μετρήσεων και ειδικότερα των μετρήσεων που αφορούν στην ομαλή λειτουργία της διάταξης, όπως για παράδειγμα είναι οι κραδασμοί. Επίσης, τα μεγέθη της ροής υπάρχουν ώστε να βλέπουμε τις γωνίες των διανυσμάτων της ταχύτητας στις διάφορες θέσεις. Έτσι, μπορούμε να περιστρέφουμε τους probe στην κατάλληλη γωνία ώστε η γωνία της απόλυτης ταχύτητας της ροής με τον άξονα της κεντρικής οπής του probe, να είναι μέσα στα όρια βαθμονόμησής του.

Όταν λοιπόν θέλουμε να καταγράψουμε όλα τα μεγέθη που βλέπουμε, πατάμε το κουμπί Rec. όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.41. Μόλις το πατήσουμε εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο εισάγουμε ένα σχόλιο για την συγκεκριμένη μέτρηση. Σαν σχόλιο στις δικές μας μετρήσεις εισάγουμε τις θέσεις και τις γωνίες των 5-hole probes που διαβάζουμε από τις οθόνες των controller τους, καθώς και τον αύξον αριθμό του σημείου λειτουργίας το οποίο αναφέρεται σε σταθερές στροφές πτερωτών και σταθερή παροχή.

Όλες οι καταγραφές αποθηκεύονται στο αρχείο εξόδου το οποίο είναι αρχείο βάσης δεδομένων της Microsoft Office (Access) και έχει το όνομα που του έχουμε δώσει εμείς Name.mdb. Να σημειώσουμε ότι στο αρχείο αυτό αποθηκεύονται όλα τα πραγματικά μεγέθη που περιγράψαμε παραπάνω που προκύπτουν από τις βαθμονομήσεις, και όχι οι τάσεις εξόδου των οργάνων.

3.10.2 Τρόπος εκτέλεσης μετρήσεων.

Ο Η/Υ της καμπίνας είναι συνδεδεμένος στο εσωτερικό δίκτυο υπολογιστών του εργαστηρίου, με αποτέλεσμα να μπορούμε να τον χειριζόμαστε από οποιονδήποτε Η/Υ στο εργαστήριο με χρήση απομακρυσμένης επιφάνειας εργασίας. Έτσι λοιπόν, κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης, ο χρήστης για λόγους ασφαλείας δεν χειρίζεται άμεσα τον υπολογιστή που βρίσκεται μέσα στην καμπίνα, αλλά από άλλον υπολογιστή που βρίσκεται στο δωμάτιο ελέγχου (Control Room), δίπλα από το χώρο που είναι εγκατεστημένη η διάταξη και η καμπίνα. Στο δωμάτιο ελέγχου είναι εγκατεστημένα και τα τηλεχειριστήρια ελέγχου των κινητήρων της διάταξης και των probe carriages. Άρα, κατά τη διάρκεια της μέτρησης, ο χρήστης ελέγχει την διάταξη και έχει επίβλεψη των μετρήσεων από το δωμάτιο ελέγχου (βλ. και Σχήμα 3.45).



Σχήμα 3.45: Δωμάτιο ελέγχου (Control Room) της μετρητικής διάταξης .

Πριν την εκτέλεση μιας μέτρησης πρέπει να ελέγξουμε αν όλα τα όργανα τροφοδοτούνται από ρεύμα. Αυτό φαίνεται για τα περισσότερα όργανα εξωτερικά. Για τα όργανα που δεν φαίνεται εξωτερικά πρέπει να ελέγξουμε αν οι τιμές που εξάγει το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων είναι λογικές.

Επίσης, πριν εκκινήσουμε τους κινητήρες δεν θα έπρεπε να έχουμε καμία ένδειξη στα μεγέθη που μετράμε, αφού ο αέρας και οι πτερωτές είναι ακίνητα. Όμως, έχουμε ένα offset στις ενδείξεις των οργάνων το οποίο έχει να κάνει με τα κυκλώματά τους, τη θερμοκρασία κλπ. Έτσι, όταν οι κινητήρες είναι ακόμα απενεργοποιημένοι, πρέπει να μηδενίζουμε τις ενδείξεις των οργάνων στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων αφαιρώντας τα offset τους. Αυτό γίνεται μέσω μιας επιλογής στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων και πρέπει να γίνεται κάθε φορά πριν ξεκινήσουμε να μετράμε.

Κατά τη διάρκεια της μέτρησης πρέπει να προσέχουμε το εξής : Από το δωμάτιο ελέγχου δεν βλέπουμε ούτε ακούμε την διάταξη να λειτουργεί, με αποτέλεσμα αν συμβεί μια ανωμαλία στη λειτουργία να μην μπορούμε να το καταλάβουμε. Για το λόγο αυτό πρέπει να ελέγχουμε συνεχώς αν ο αριθμός στροφών είναι αυτός που έχουμε ρυθμίσει και αν το επίπεδο κραδασμών είναι στα φυσιολογικά επίπεδα τα οποία γνωρίζουμε για τη διάταξη. Έτσι, πρέπει στο λογισμικό πρόσκτησης δεδομένων, τα παράθυρα με τα διαγράμματα χρονοσειράς και φάσματος ισχύος κραδασμών να είναι συνέχεια ανοιχτά και να παρατηρούνται συνεχώς. Αν διαπιστωθεί κάποια ανωμαλία στη λειτουργία, μηδενίζουμε τις στροφές των κινητήρων και αναζητούμε με ασφάλεια πλέον την αιτία.

4

Μετρήσεις και υπολογισμός επιδόσεων της διάταξης.

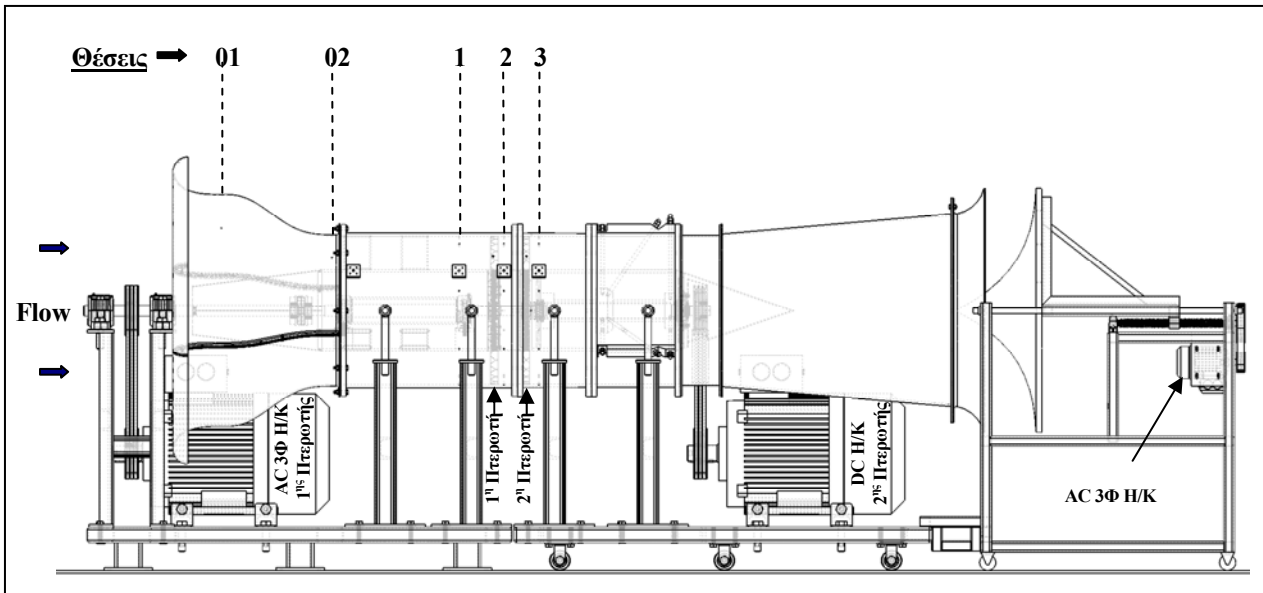
Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρουμε αρχικά τα μεγέθη που μετράμε και τον ορισμό των πρόσημων που χρησιμοποιούμε στους υπολογισμούς. Στη συνέχεια, αναπτύσσουμε τις εξισώσεις και τη χρήση τους μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων, ώστε να προκύψουν τα μεγέθη αυτά. Έπειτα, αναλύουμε τον τρόπο και το είδος των μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε και τέλος παραθέτουμε τα αποτελέσματα και τον σχολιασμό τους, καθώς και τις συγκρίσεις τους με το υπολογιστικό μοντέλο ροής (Κώδικας BLADE).

4.1 Μετρούμενα μεγέθη – θέσεις μέτρησης.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάσαμε αναλυτικά όλα τα μεγέθη που μετράμε στην εγκατάσταση. Τα μεγέθη αυτά μας επιτρέπουν τον προσδιορισμό των μεγεθών της ροής, ώστε να χαρτογραφήσουμε τη συμπεριφορά της διάταξης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών. Τα μεγέθη της ροής που υπολογίσουμε από τις μετρήσεις στις διάφορες θέσεις, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1), και στο Σχήμα 4.1 οι θέσεις μέτρησης. Τα μεγέθη που συνοδεύονται από (R) είναι συναρτήσεως της ακτίνας μέτρησης και προκύπτουν από τις ακτινικές σαρώσεις με τους σωλήνες πίεσης, και τα μεγέθη με παύλα (-) δηλώνουν μέση τιμή και προκύπτουν από ολοκλήρωση των ακτινικών σαρώσεων. Η επεξήγηση και αναγωγή των μεγεθών αυτών, καθώς και τα οι σχέσεις επιδόσεων που προκύπτουν από αυτά, αναλύονται στο κεφάλαιο 4.3.

Θέση 01	Θέση 02	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Περιβάλλον (atm)
P_{Sw01}	P_{Sw02}	P_{Sw1}	P_{Sw2}	P_{Sw3}	P_{atm} (mbar)
\dot{m}_0 (kg/s)		\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	T_{atm} (°C)
-	-	$P_{t1}(R)$	$P_{t2}(R)$	$P_{t3}(R)$	RH (%)
-	-	$P_{s1}(R)$	$P_{s2}(R)$	$P_{s3}(R)$	ρ (kg/m ³)
-	-	\bar{P}_{t1}	\bar{P}_{t2}	\bar{P}_{t3}	γ (ισεντροπικός εκθέτης)
-	-	\bar{P}_{s1}	\bar{P}_{s2}	\bar{P}_{s3}	R (kJ/kgK)
-	-	\vec{V}_1	\vec{V}_2	\vec{V}_3	-
-	-	\vec{W}_1	$\vec{W}_{21}, \vec{W}_{22}$	\vec{W}_1	-
-	-	\vec{U}_1	$\vec{U}_{21}, \vec{U}_{22}$	\vec{U}_3	-
-	-	$\rho_1(R)$	$\rho_2(R)$	$\rho_3(R)$	-

Πίνακας 4.1: Μεγέθη ροής και θέσεις στις οποίες υπολογίζονται.



Σχήμα 4.1: Αρίθμηση θέσεων μέτρησης μεγεθών ροής.

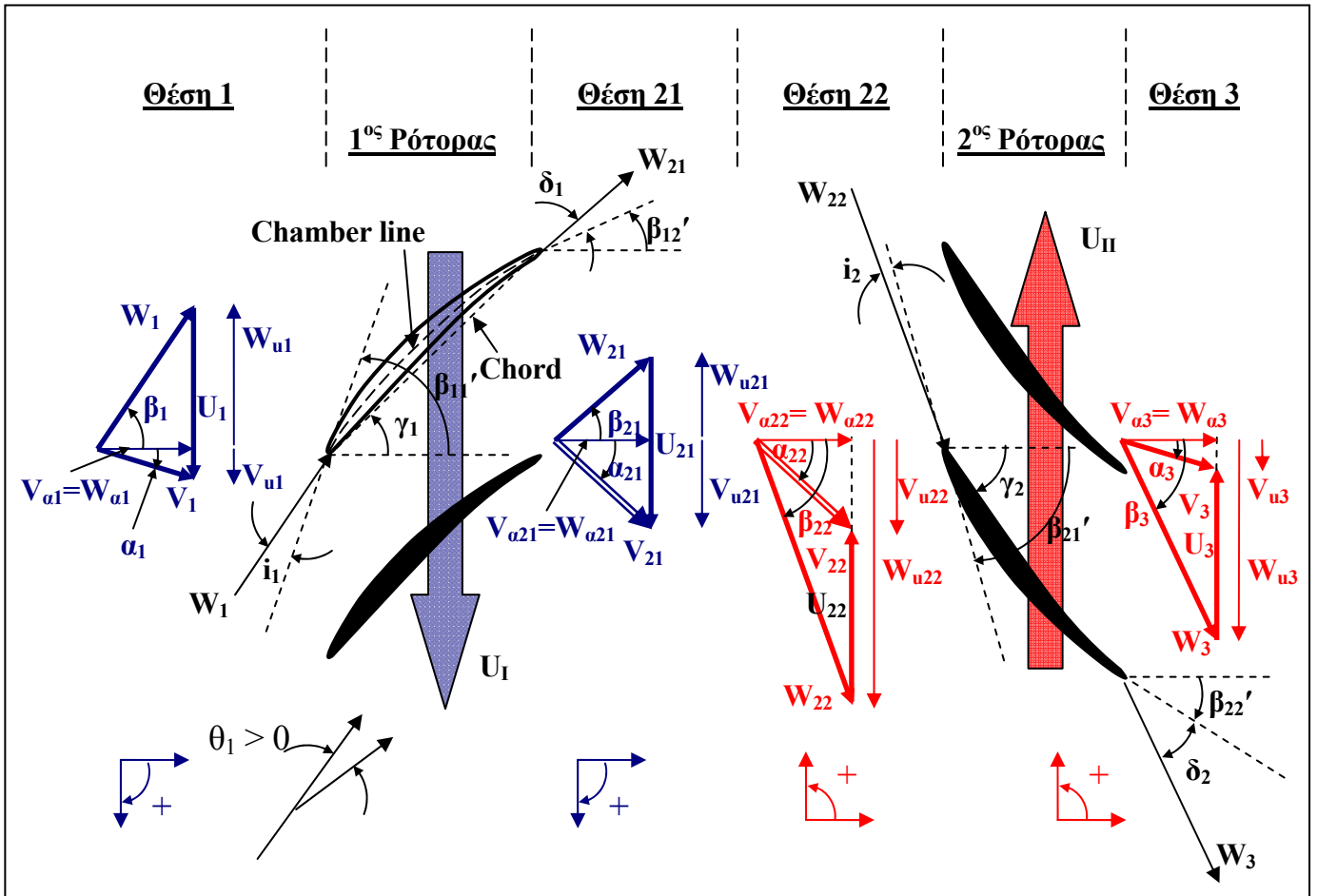
4.2 Σύμβαση προσήμανσης γωνιών ροής και γωνιών Probes.

Τα τρίγωνα ταχύτητας σε μια τυπική διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών και κατά συνέπεια και στη δική μας διάταξη, φαίνονται στο Σχήμα 4.2. Η απόλυτη, σχετική και περιφερειακή ταχύτητα V , W και U αντίστοιχα, όπως και η γωνία α της απόλυτης ταχύτητας και β της σχετικής ταχύτητας με την αξονική κατεύθυνση, αλλά και οι γωνίες μετάλλου β_1' και β_2' και οι γωνίες πρόσπτωσης i και παρέκκλισης δ , συνδέονται μέσω των σχέσεων (4.1) έως (4.9).

Οι δείκτες των μεγεθών της ροής στις θέσεις 1, 2, 3 έχουν ως εξής : Στη θέση 1 όλοι οι δείκτες έχουν την τιμή 1. Στη θέση 2, τα μεγέθη έχουν δείκτη i, j όπου το i αναφέρεται στην κύρια θέση και παίρνει πάντα την τιμή 2, και το j παίρνει την τιμή 1 για τα μεγέθη που αναφέρονται στα κατάντι της 1^{ης} πτερύγωσης, ή την τιμή 2 για τα μεγέθη που αναφέρονται στα ανάντι της 2^{ης} πτερύγωσης. Στη θέση 3 όλοι οι δείκτες έχουν την τιμή 3. Για τις γωνίες μετάλλου χρησιμοποιούμε τους δείκτες i, j όπου το i αναφέρεται στην πτερύγωση και παίρνει την τιμή 1 για την 1^η πτερύγωση και την τιμή 2 για τη 2^η πτερύγωση, και το j παίρνει την τιμή 1 για την είσοδο στην πτερύγωση και την τιμή 2 για την έξοδο από αυτήν. Οι γωνίες πρόσπτωσης (i) και παρέκκλισης (δ) έχουν δείκτη 1 για την 1^η πτερύγωση και 2 για τη 2^η.

Κάθε ρότορας έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων στο οποίο τις θετικές φορές καθορίζουν η φορά της αξονικής V_a και περιφερειακής U ταχύτητας. Έτσι, οι συνιστώσες των V , W στην αξονική κατεύθυνση (V_a , W_a) θα είναι πάντα θετικές, ενώ οι συνιστώσες στην περιφερειακή κατεύθυνση V_u , W_u λαμβάνουν θετικό πρόσημο εάν έχουν τη φορά της U . Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, η γωνία α_{21} της απόλυτης ταχύτητας εξόδου από την 1^η πτερύγωση (V_2) παίρνει θετική τιμή αφού η V_{u21}

έχει τη φορά της U_{21} , ενώ η ίδια γωνία (α_{22}) παίρνει αρνητική τιμή στο τρίγωνο ταχύτητας εισόδου στη 2^η περυγώση, αφού η V_{u22} έχει αντίθετη φορά της U_{22} .



Σχήμα 4.2: Τρίγωνα ταχυτήτων διάταξης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U} \tag{4.1}$$

$$V_u = W_u + U, \text{ Αλγεβρικά.} \tag{4.2}$$

$$V_a = W_a \tag{4.3}$$

$$\tan(\beta) = \frac{W_u}{V_a} = \frac{W_u}{W_a}, \text{ Αλγεβρικά.} \tag{4.4}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{V_u}{V_a} = \frac{V_u}{W_a}, \text{ Αλγεβρικά.} \tag{4.5}$$

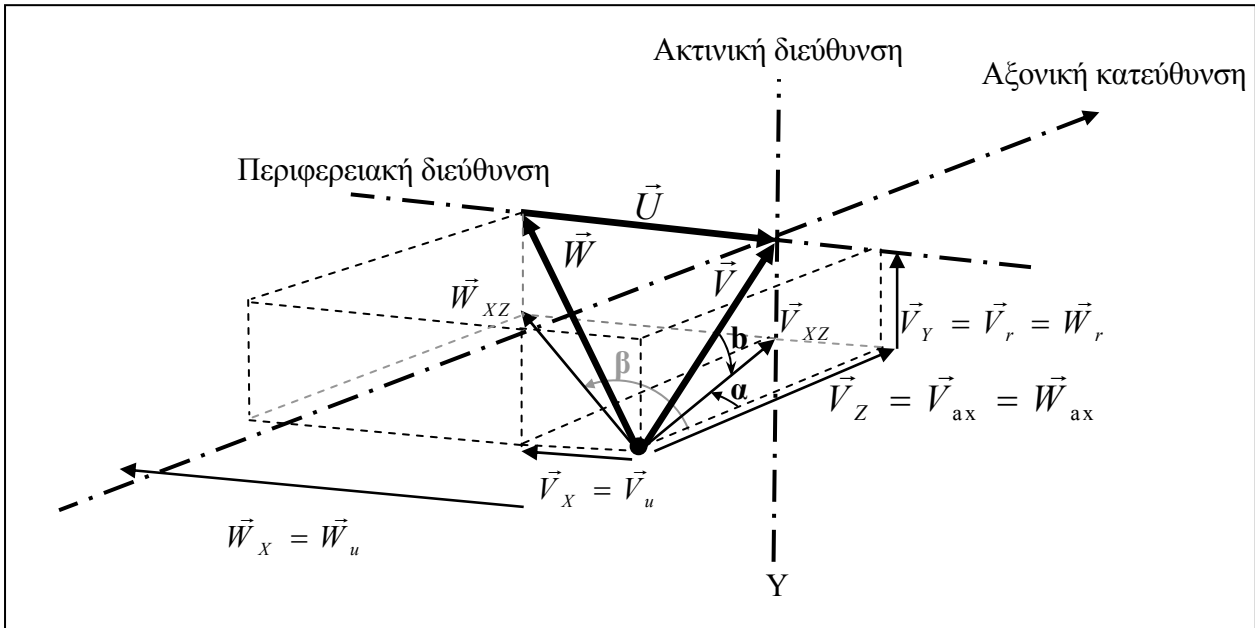
$$\text{Γωνίες πρόσπτωσης: } i_1 = -\beta_1 - |\beta_{11}'|, i_2 = -\beta_{22} - |\beta_{21}'|, \text{ Αλγεβρικά.} \tag{4.6}$$

$$\text{Γωνίες παρέκκλισης: } \delta_1 = -\beta_{21} - |\beta_{12}'|, \delta_2 = -\beta_3 - |\beta_{22}'|, \text{ Αλγεβρικά.} \tag{4.7}$$

$$\text{Γωνίες απόκλισης: } \theta_1 = -(\beta_1 - \beta_{21}), \theta_2 = -(\beta_{22} - \beta_3), \text{ Αλγεβρικά.} \tag{4.8}$$

$$V_{21} = V_{22} = V_2, V_{a21} = W_{a21} = V_{a22} = W_{a22}, U_1 = U_{21} = U_I, U_{22} = U_3 = U_{II}, \alpha_{22} = -\alpha_{21} \quad (4.9)$$

Πρέπει να σημειώσουμε ότι τα παραπάνω τρίγωνα ταχύτητας (Σχήμα 4.2) για τις θέσεις 2 και 3 αναφέρονται στις προβολές V_{XZ} , W_{XZ} των διανυσμάτων ταχύτητας V και W πάνω σε επίπεδο (XZ) , το οποίο είναι παράλληλο στην αξονική κατεύθυνση και περιέχει το διάνυσμα της ταχύτητας U . Αυτό ισχύει επειδή στις θέσεις 2 και 3 μετράμε με 5-hole Probe την απόλυτη ταχύτητα V στον χώρο (3Δ) (βλ. και Σχήμα 3.7 κεφάλαιο 3.2.3). Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται το τρίγωνο ταχύτητας στο χώρο.



Σχήμα 4.3: Τρίγωνο ταχύτητας στον χώρο (3Δ).

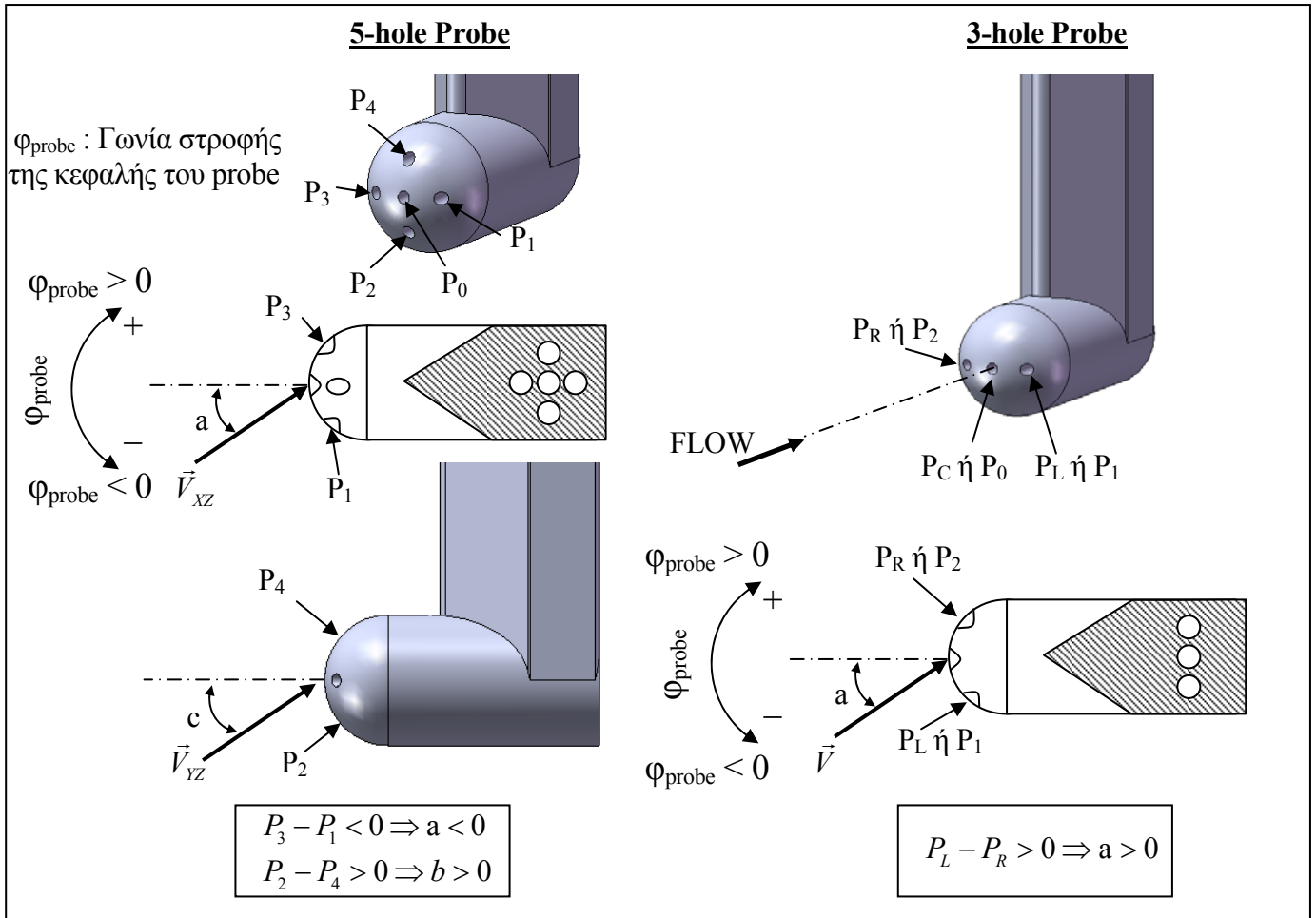
Έτσι, από τις βαθμονομήσεις των 5-hole Probes, παίρνουμε την ταχύτητα V καθώς και τις V_{ax} , V_u , V_r από τις σχέσεις (3.9) έως (3.11). Αφού λοιπόν η περιφερειακή ταχύτητα U είναι γνωστή για δεδομένες σ.α.λ. N και ακτίνα R , τότε από τις σχέσεις (4.2), (4.3), (4.10) προκύπτει ότι η σχετική ταχύτητα W στον χώρο δίνεται από τη σχέση (4.11).

$$W_{XZ} = \sqrt{W_u^2 + W_{ax}^2}, \text{ όπου } W_u = V_u - U, \text{ αλγεβρικά.} \quad (4.10)$$

$$W = \sqrt{W_{XZ}^2 + W_r^2}, \text{ όπου } W_r = V_r \quad (4.11)$$

Το επόμενο θέμα που προκύπτει είναι η προσήμανση των γωνιών a και b και της γωνίας στροφής ϕ_{pr} των σωλήνων πίεσης (3 & 5 hole Probes). Όπως έχουμε αναφέρει και στα κεφάλαια 3.2.2 και 3.2.4, οι γωνίες a και b των 5-hole probes είναι θετικές όταν $P_3 - P_1 > 0$ και $P_2 - P_4 > 0$ αντίστοιχα, και για τον 3-hole probe η a είναι θετική όταν $P_L - P_R > 0$. Επίσης, όπως έχουμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 3.6.3, οι controllers των 5-hole probe carriages δείχνουν θετική γωνία στροφής (ϕ_{pr}) της κεφαλής του probe όταν περιστρέφεται δεξιόστροφα, κοιτώντας τον από τα σωληνάκια προς την κεφαλή του. Για την γωνία στροφής (ϕ_{pr}) της κεφαλής του 3-hole probe ορίζουμε εμείς τη θετική φορά να

είναι αντίστοιχη με αυτήν των 5-hole probes. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4 στο οποίο περιέχεται και ένα παράδειγμα για την προσήμανση των γωνιών a και b .

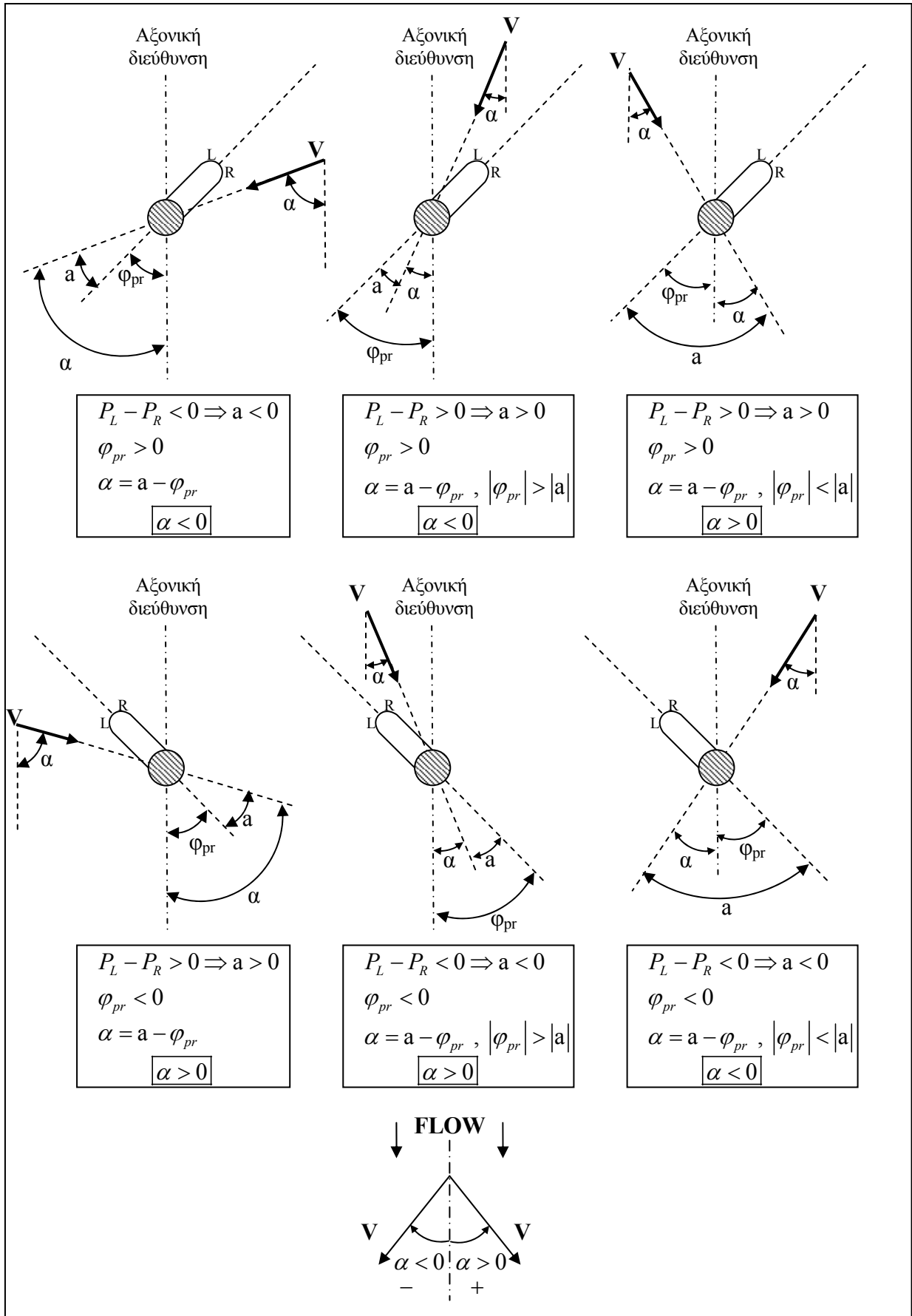


Σχήμα 4.4: Προσήμανση γωνιών a , b 3 & 5 hole Probes.

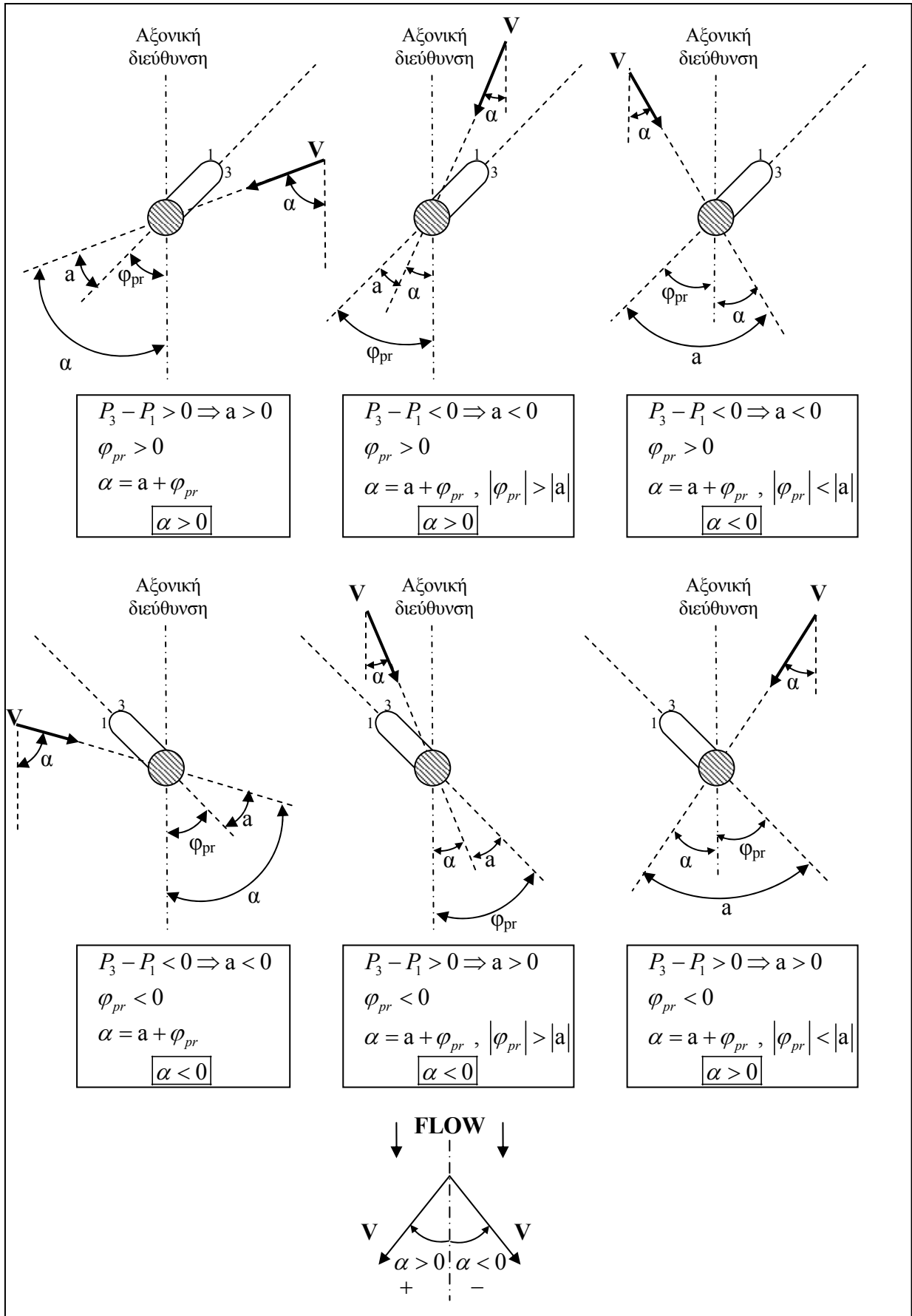
Στον υπολογισμό των μεγεθών της ροής όμως, μας ενδιαφέρει η γωνία α η οποία είναι η γωνία της απόλυτης ταχύτητας V με την αξονική κατεύθυνση. Η γωνία α είναι το αλγεβρικό άθροισμα των γωνιών a και φ_{pr} και το πρόσημό της πρέπει να συμβαδίζει με τα συστήματα συντεταγμένων για τις θέσεις 1, 21, 22, 3 που ορίσαμε παραπάνω. Έτσι, πρέπει αρχικά να βρούμε τις θετικές φορές των γωνιών a που προκύπτουν στο σύστημα συντεταγμένων κάθε probe και στη συνέχεια να προσαρμόσουμε το πρόσημο της γωνίας α ώστε να συμβαδίζει με το σύστημα συντεταγμένων των θέσεων που ορίσαμε παραπάνω. Οι θετικές φορές των γωνιών α στο σύστημα συντεταγμένων των 3 και 5-hole probes φαίνονται στο Σχήμα 4.5 και στο Σχήμα 4.6 αντίστοιχα, και οι τιμές των γωνιών α στο σ.σ. αυτό δίνονται από τις σχέσεις (4.12) και (4.13) αντίστοιχα.

Για τον 3-hole Probe : $\alpha = a - \varphi_{pr}$, αλγεβρικά. (4.12)

Για τους 5-hole Probes : $\alpha = a + \varphi_{pr}$, αλγεβρικά. (4.13)

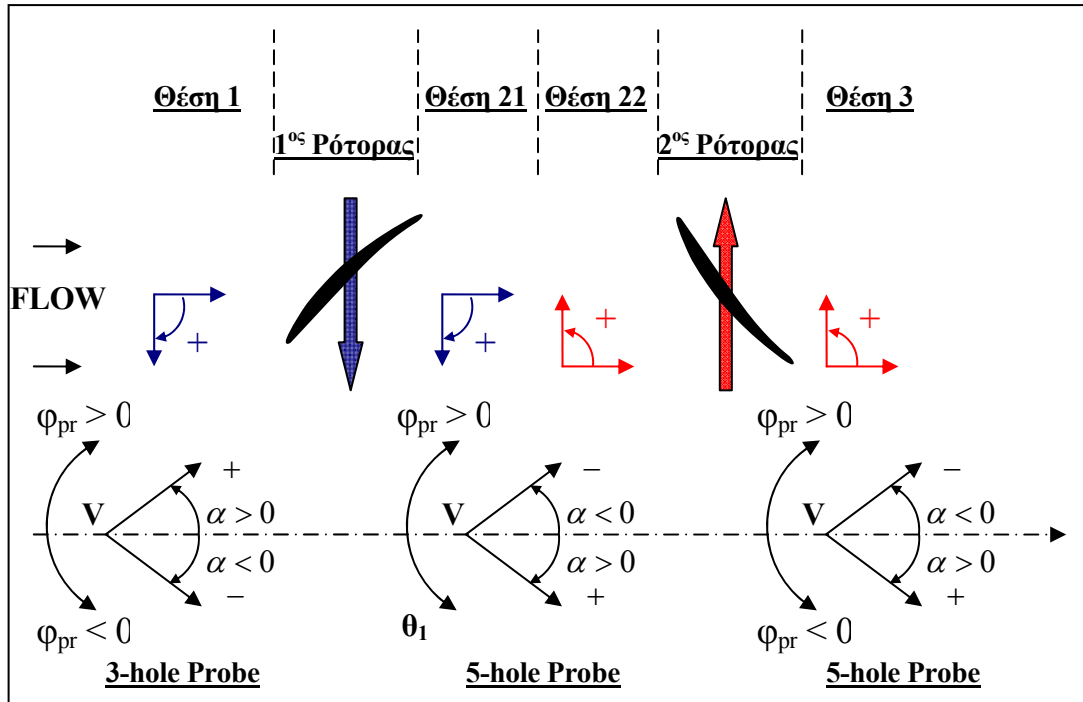


Σχήμα 4.5: Προσήμανση γωνίας α στο σύστημα συντεταγμένων του 3-hole Probe.



Σχήμα 4.6: Προσέλιση γωνίας α στο σύστημα συντεταγμένων των 5-hole Probes.

Έτσι λοιπόν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7, για να συμβαδίζουν οι γωνίες α στα δύο συστήματα συντεταγμένων, πρέπει στη θέση 1 να αλλάξουμε το πρόσημο της γωνίας α , στη θέση 21 το κρατάμε ως έχει, στις θέσεις 22 και 3 το αλλάζουμε. Άρα οι απόλυτες γωνίες στις θέσεις 1, 21, 22 και 3 δίνονται από τις σχέσεις (4.14) έως (4.17) στις οποίες οι γωνίες α και φ_{pr} αναφέρονται στον κάθε probe κάθε φορά.



Σχήμα 4.7: Συστήματα συντεταγμένων πτερυγώσεων και σωλήνων πίεσης.

$$\alpha_1 = -(a - \varphi_{pr}), \text{ αλγεβρικά.} \quad (4.14)$$

$$\alpha_{21} = a + \varphi_{pr}, \text{ αλγεβρικά.} \quad (4.15)$$

$$\alpha_{22} = -\alpha_{21} = -(a + \varphi_{pr}), \text{ αλγεβρικά.} \quad (4.16)$$

$$\alpha_3 = -(a + \varphi_{pr}), \text{ αλγεβρικά.} \quad (4.17)$$

Να υπενθυμίσουμε ότι για τη γωνία φ_{pr} που στρέφουμε τον probe χρησιμοποιούμε το πρόσημο που διαβάζουμε από τους controllers των probe carriages, και ότι η γωνία α προκύπτει από τις βαθμονομήσεις των probes.

Όσον αφορά στο πρόσημο της γωνίας b , είναι θετικό όταν το διάνυσμα της απόλυτης ταχύτητας "κοιτάει" προς μεγαλύτερη ακτίνα.

Όσον αφορά στο πρόσημο της γωνίας πρόσπτωσης i και της γωνίας παρέκκλισης δ είναι θετικό όταν $|\beta_{i,j}| > |\beta'_{i,j}|$.

4.3 Αναγωγή των αποτελεσμάτων.

Η αναγωγή των αποτελεσμάτων για την χαρτογράφηση της ροής στο συμπιεστή, προκύπτει 1^{ov}) από τον υπολογισμό των τοπικών μεγεθών, αναφερόμενοι σε ποσότητες που υπολογίζονται σε κάθε ακτίνα, κάθε θέσης, και 2^{ov}) με ακτινική ολοκλήρωση ή μέση τιμή των τοπικών μεγεθών από την οποία προκύπτουν οι ολικές επιδόσεις του συμπιεστή. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται με χρήση ενός υπολογιστικού κώδικα σε Fortran που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής (CRCALC), του οποίου τα αρχεία εξόδου χρησιμοποιούνται από ένα δεύτερο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε VBA και το οποίο παρουσιάζει τα επιθυμητά διαγράμματα.

4.3.1 Υπολογισμός τοπικών μεγεθών.

Ο υπολογισμός των τοπικών μεγεθών γίνεται με χρήση των αποτελεσμάτων των πιέσεων από τις οπές των σωλήνων πίεσης που βρίσκονται στις θέσεις 1,2 και 3, και με τις τιμές των P_{at} , T_{at} και RH από τον αισθητήρα συνθηκών περιβάλλοντος.

Ξεκινώντας τη διαδικασία υπολογισμού κάνουμε την εξής **βασική παραδοχή** : Λόγω του μικρού αριθμού βαθμίδων (2) που συνεπάγεται μικρή ανύψωση πίεσης, και των χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής των πτερωτών που συνεπάγεται μικρές ταχύτητες εισόδου και εξόδου από τις πτερυγώσεις (έως 50m/s), θεωρούμε ότι η **ολική θερμοκρασία διατηρείται** (σχέση (4.18)) κατά το πέρασμα του αέρα μέσα από τον συμπιεστή, και ισούται με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα. Αυτό, βέβαια παραβιάζει τον 1^o θερμοδυναμικό αξίωμα καθώς για τη μεταβολή της ολικής ενθαλπίας που προκαλεί η πτερύγωση ισχύει η σχέση $\Delta h_f = C_p \cdot \Delta T_t$, που σημαίνει ότι έχουμε μεταβολή ολικής θερμοκρασίας. Όμως αν αναλογιστούμε ότι η ολική θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση $T_t = T + V^2 / (2 \cdot C_p)$ και ότι η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να έχουμε είναι $V = 50\text{m/s}$ και η ειδική θερμοχωρητικότητα για τον αέρα είναι περίπου $C_p = 1000\text{J/kgK}$, τότε η ολική θερμοκρασία θα έχει μεταβληθεί κατά 1.25°C που είναι πολύ μικρή ποσότητα και αν δεν τη λάβουμε υπ' όψιν μας, προκαλεί για θερμοκρασία περιβάλλοντος $T = 295\text{K}$, ένα σχετικό σφάλμα 1% το οποίο είναι πολύ μικρό. Έτσι κι αλλιώς, τη μεταβολή της ενθαλπίας μπορούμε και την υπολογίζουμε από τη σχέση $\Delta h_f = \Delta P / \rho$ θεωρώντας ότι έχουμε **ασυμπίεστη ροή** και ισεντροπική (αφού $M < 0.3$ (ή $V < 100\text{m/s}$)), ενώ για το συνεκτικό ρευστό υπολογίζεται από τη σχέση του Euler $\Delta h_f = U \cdot \Delta V_u$. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγουμε τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του συμπιεστή.

$$T_{t01} = T_{t02} = T_{t1} = T_{t2} = T_{t3} = T_{atm} \quad \cdot \text{Παραδοχή.} \quad (4.18)$$

Στη συνέχεια μέσω των καμπύλων βαθμονόμησης των σωλήνων πίεσης, υπολογίζουμε σε κάθε ακτίνα, κάθε θέσης τα εξής :

Θέση 1 (3-hole Probe)

Οι καμπύλες βαθμονόμησης και οι παράμετροι υπολογισμού παρουσιάζονται στα κεφάλαια 3.2.1 και 3.2.2. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της αλληλουχίας των παρακάτω σχέσεων με χρήση του κώδικα CRCALC.

$$q = P_C - P_L + \frac{P_L - P_R}{2} \quad (4.19)$$

$$P_d = \frac{P_L - P_R}{q} \quad (4.20)$$

$a_1 = a_1(P_d)$. Πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού.

$P_p = P_p(a_1)$. Πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού.

$P_q = P_q(a_1)$. Πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού.

$$P_C - P_{t1} = P_p \cdot q_1 \quad (4.21)$$

$$P_{t1} = (P_C - P_{at}) + P_{amb} - (P_C - P_{t1}) \cdot \text{Ολική πίεση στη θέση 1} \quad (4.22)$$

$$P_{s1} = P_{t1} - q_1 \cdot \text{Στατική πίεση στη θέση 1} \quad (4.23)$$

$$\alpha_1 = -(a_1 - \varphi_{pr1}) \cdot \text{Απόλυτη γωνία εισόδου ροής στην 1^η πτερύγωση} \quad (4.24)$$

$$b_1 = 0 \cdot \text{Γωνία ακτινικής συνιστώσας απόλυτης ταχύτητας εισόδου} \quad (4.25)$$

Στο σημείο αυτό του προγράμματος CRCALC καλείται η υπορουτίνα (Velcalc), η οποία βάση των T_{at} , P_{at} , RH, T_{t1} , P_{t1} , P_{s1} και τη χρήση της υπορουτίνας (therprop), υπολογίζει την στατική πίεση T_1 και τα M_1 , V_1 , V_{ax1} , V_{ul} , V_{r1} , ρ_1 , v_1 .

Η διαδικασία υπολογισμού έχει ως εξής : Η υπορουτίνα therprop με βάση μια θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα, υπολογίζει τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του αέρα ως αέριο μίγμα που περιέχει στις τυπικές αναλογίες αέρα τα συστατικά O_2 , N_2 , H_2O , CO_2 , Ar, Ne ανάλογα βέβαια με την υγρασία. Τα θερμοδυναμικά μεγέθη που υπολογίζει είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα C_p , η ειδική ενθαλπία h , η συνάρτηση εντροπίας Φ , η σταθερά του αέρα R και ο ισεντροπικός εκθέτης γ . Τα C_p , h και Φ είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας και υπολογίζονται για κάθε συστατικό από τις σχέσεις (4.27), (4.28) και (4.29) αντίστοιχα. Στις σχέσεις αυτές, οι συντελεστές c_0, c_1, \dots, c_{10} είναι γνωστοί από τη βιβλιογραφία και σταθεροί για κάθε συστατικό του μίγματος. Τα C_p , h και Φ του μίγματος (αέρας) υπολογίζονται μέσω της σχέσης (4.30). Η σταθερά R του μίγματος των αέριων συστατικών που συνιστούν τον αέρα, υπολογίζεται μέσω της σχέσης (4.26) και συνδέεται με τον ισεντροπικό εκθέτη γ και την ειδική θερμοχωρητικότητα C_p του μίγματος (αέρας) μέσω της γνωστής σχέσης $\gamma = C_p / (C_p - R)$. Η διαδικασία αυτή αναλύεται και στο [17].

Σταθερά μίγματος, i συστατικών αερίων

$$R = R_u \sum \xi_i / M_i, \text{ [J/kgK]} \quad (4.26)$$

Όπου

R_u : Η παγκόσμια σταθερά τελείων αερίων $R_u = 8314.3 \text{ J/kmoleK}$.

ξ_i : Η περιεκτικότητα του μίγματος στο i συστατικό ($\sum \xi_i = 1$).

M_i : Το μοριακό βάρος του i συστατικού σε kg/kmole.

Ειδική Θερμοχωρητικότητα $C_p = C_p(T)$

$$C_p = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + \dots + c_8 T^8 \quad (4.27)$$

Ειδική ενθαλπία $h = h(T)$

$$h = \int_0^T C_p \cdot dT = c_9 + c_0 T + \frac{c_1}{2} T^2 + \dots + \frac{c_8}{9} T^9 \quad (4.28)$$

Συνάρτηση εντροπίας $\Phi = \Phi(T)$

$$\Phi = \int_0^T \frac{C_p}{T} \cdot dT = c_{10} + c_0 \ln T + c_1 T + \frac{c_2}{2} T^2 + \dots + \frac{c_8}{8} T^8 \quad (\text{Κατά Keenan-Kaye}) \quad (4.29)$$

Θερμοδυναμικό μέγεθος μίγματος i συστατικών

$$A = \sum \xi_i A_i$$

Όπου

A : Το μέγεθος (C_p , ή h , ή Φ) του μίγματος. (4.30)

ξ_i : Η περιεκτικότητα του μίγματος στο i συστατικό ($\sum \xi_i = 1$).

A_i : Το μέγεθος (C_p , ή h , ή Φ) του i συστατικού.

Έτσι λοιπόν, η υπορουτίνα Velcalc καλεί την therprop ώστε να υπολογίσει το Φ_{total} με βάση την ολική θερμοκρασία T_{t1} . Ως γνωστόν, η μεταβολή static \rightarrow total είναι ισεντροπική, άρα η T_1 μπορεί να βρεθεί από την επίλυση της εξίσωσης του Gibbs αφού οι πιέσεις P_{t1} , P_{s1} είναι γνωστές και η σταθερά R έχει υπολογιστεί. Η εξίσωση αυτή δίνεται από τη σχέση (4.31) και επιλύεται αριθμητικά με εύρεση της ρίζας της συνάρτησης $f(T_s)$ (σχέση (4.32)) με τη μέθοδο της τέμνουσας (Secant) με χρήση του σχήματος της σχέσης (4.33). Στην επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού της ρίζας, καλείται συνεχώς η υπορουτίνα therprop για την εύρεση του νέου Φ_{static} .

Εξίσωση Gibbs για μη-στοιχειώδη μεταβολή $1 \rightarrow 2$

$$s_2 - s_1 = \Phi_2 - \Phi_1 - R \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \xrightarrow[\text{isentropic}]{1 \rightarrow 2 = \text{static} \rightarrow \text{total} \Rightarrow s_1 = s_2} 0 = \Phi_{total} - \Phi_{static} - R \cdot \ln \left(\frac{P_t}{P_s} \right) \quad (4.31)$$

Συνάρτηση $f(T_s)$ για εύρεση ρίζας (T_s)

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_{total} = \Phi(T_t) \Rightarrow \Phi_{total} : const \\ \Phi_{static} = \Phi(T_s) \end{array} \right\} f = f(T_s) = \Phi_{total} - \Phi_{static}(T_s) - R \cdot \ln\left(\frac{P_t}{P_s}\right) \quad (4.32)$$

Σχήμα μεθόδου τέμνουσας (Secant) για εύρεση ρίζας (T_s) της συνάρτησης $f(T_s)$

$$T_s^{(i)} = T_s^{(i-1)} - \frac{f(T_s^{(i-1)}) \cdot (T_s^{(i-1)} - T_s^{(i-2)})}{f(T_s^{(i-1)}) - f(T_s^{(i-2)})}, \text{ όπου: } f(T_s^{(i)}) = \Phi_{total} - \Phi_{static}(T_s^{(i)}) - R \cdot \ln\left(\frac{P_t}{P_s}\right) \quad (4.33)$$

Όπου i : Ο αριθμός επανάληψης.

Στη συνέχεια, η υπορουτίνα Velcalc, βάσει της σχέσης του Mach και των ισηντροπικών σχέσεων, υπολογίζει την απόλυτη ταχύτητα V_1 , όπως φαίνεται από τις σχέσεις (4.34) και (4.35), και από τις σχέσεις (4.36) έως (4.38) την αξονική, περιφερειακή και ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας V όπως δείξαμε και στο κεφάλαιο 3.2.3. Ακόμα, υπολογίζει και την πυκνότητα ρ βάση της καταστατικής εξίσωσης (σχέση (4.39)).

$$\frac{P_{t1}}{P_{s1}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \Rightarrow M_1 = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_{t1}}{P_{s1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (4.34)$$

$$M_1 = \frac{V_1}{\sqrt{\gamma R T_1}} \Rightarrow V_1 = M_1 \cdot \sqrt{\gamma R T_1} \quad (4.35)$$

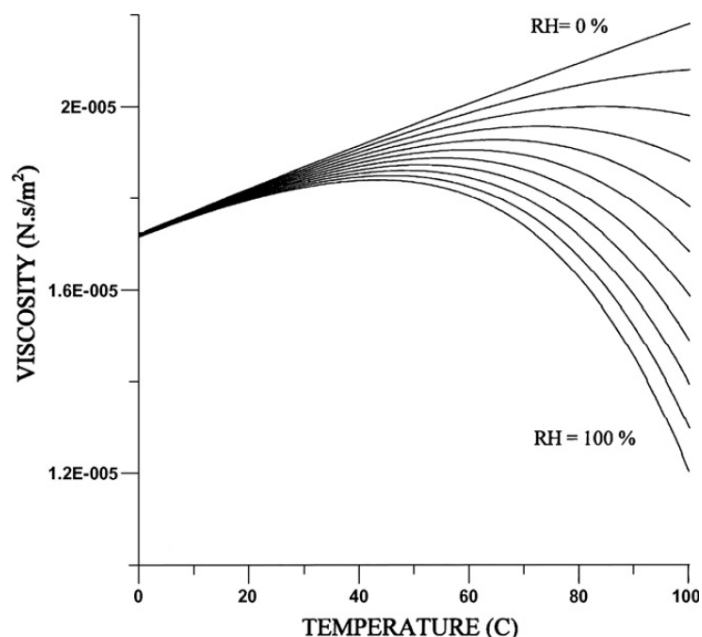
$$V_{ax1} = V_1 \cos(a_1) \cos(b_1) \quad (4.36)$$

$$V_{u1} = V_1 \sin(a_1) \cos(b_1) \quad (4.37)$$

$$V_{r1} = V_1 \sin(b_1) = 0 \quad (4.38)$$

$$\rho_1 = \frac{P_{s1}}{R \cdot T_1} \quad (4.39)$$

Τέλος, με την υπορουτίνα Velcalc, υπολογίζουμε και την κινηματική συνεκτικότητα του αέρα (ν) η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την υγρασία και την πυκνότητα του αέρα. Όμως, στη διάταξη η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 15 – 25 °C, και όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8 που αντλήθηκε από το [14], η επίδρασης της υγρασίας είναι πολύ μικρή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έτσι, χρησιμοποιήσαμε τη σχέση του Sutherland^[13], η οποία για ξηρό αέρα δίνει τη δυναμική συνεκτικότητα του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας (σχέση (4.40)). Άρα, με χρήση της πυκνότητας η κινηματική συνεκτικότητα δίνεται από τη σχέση (4.41).



Σχήμα 4.8^[14]: Η δυναμική συνεκτικότητα μ του αέρα συν/σει υγρασίας και θερμοκρασίας.

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \text{ .Σχέση Sutherland για τη δυναμική συνεκτικότητα,} \quad (4.40)$$

όπου:

C : Σταθερά Suhterland. Για αέρα C=120.

T₀ : Θερμοκρασία αναφοράς. T₀=291.15K

μ_0 : Δυναμική συνεκτικότητα στην T₀. Για αέρα $\mu_0=18.27 \cdot 10^{-6}$ Pa.s.

T : Στατική θερμοκρασία υπολογισμού της μ .

$$\nu_1 = \frac{\mu_1}{\rho_1} \text{ . Κινηματική συνεκτικότητα (m}^2\text{/s)} \quad (4.41)$$

Συνολικά λοιπόν η υπορουτίνα Velcalc εξάγει τα μεγέθη : $M_1, V_1, V_{ax1}, V_{u1}, V_{r1}, \rho_1, \nu_1$.

Συνεχίζοντας, ο κώδικας CRCALC υπολογίζει :

$$W_{u1} = V_{u1} - U_1 \quad (4.42)$$

$$\beta_1 = \arctan \left(\frac{W_{u1}}{V_{ax1}} \right) \quad (4.43)$$

$$W_1 = \sqrt{W_{u1}^2 + V_{ax1}^2} \quad (4.44)$$

$$Re_{c1} = \frac{W_1 \cdot c}{\nu_1} \text{ . Reynolds 1}^{ης} \text{ πτερύγωσης βασισμένος στη χορδή } c=39\text{mm.} \quad (4.45)$$

$$i_1 = -\beta_1 - \left| \beta_{11}' \right| \quad (4.46)$$

Η γωνία μετάλλου στην είσοδο της πρώτης περύγωσης β_{11}' υπολογίζεται (1^{ov}) βάσει του πολυωνύμου το οποίο συναρτήσσει της ακτίνας, δίνει την ακτίνα καμπυλότητας του τόξου του κύκλου της μέσης γραμμής κυρτότητας της αεροτομής ,για μοναδιαίο μήκος χορδής, (2^{ov}) βάσει του πολυωνύμου το οποίο συναρτήσσει της ακτίνας δίνει την γωνία συστροφής (twist angle) του πτερυγίου, (3^{ov}) βάση της γωνίας κλίσης του πτερυγίου γ (stagger angle) η οποία αναφέρεται στη μέση ακτίνα. Η ανάλυση για την ανάλυση των γωνιών μετάλλου παρουσιάζεται στο παράρτημα Π2.3.5.

Θέση 2 (5-hole Probe 9550101)

Οι καμπύλες βαθμονόμησης και οι παράμετροι υπολογισμού παρουσιάζονται στα κεφάλαια 3.2.3 και 3.2.4. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της αλληλουχίας των παρακάτω σχέσεων με χρήση του κώδικα CRCALC.

$$P_0 = (P_0 - P_{at})_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 2} + P_{amb} \quad (4.47)$$

$$\Delta P = P_0 - \frac{2(P_0 - (P_0 - P_3)_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 2} - (P_3 - P_1)_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 2})}{2} \quad (4.48)$$

$$K_a = \frac{(P_3 - P_1)_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 2}}{\Delta P} \quad (4.49)$$

$$K_b = \frac{(P_2 - P_4)_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 2}}{\Delta P} \quad (4.50)$$

$a_2 = a_2(K_a, K_b)$. Πολυώνυμο μορφής σχέσεως (3.21) με $L=M=7$.

$b_2 = b_2(K_a, K_b)$. Πολυώνυμο μορφής σχέσεως (3.21) με $L=M=7$.

$K_q = K_q(a_2, b_2)$. Πολυώνυμο μορφής σχέσεως (3.22) με $L=M=7$.

$K_{pt} = K_{pt}(a_2, b_2)$. Πολυώνυμο μορφής σχέσεως (3.22) με $L=M=7$.

$$q_2 = \frac{\Delta P}{K_q} \quad (4.51)$$

$$(P_{t2} - P_0) = K_{pt} \cdot q_2 \quad (4.52)$$

$$P_{t2} = (P_{t2} - P_0) + P_0 \text{ . Ολική πίεση στη θέση 2} \quad (4.53)$$

$$P_{s2} = P_{t2} - q_2 \text{ . Στατική πίεση στη θέση 2} \quad (4.54)$$

$$\alpha_{21} = a_2 + \varphi_{pr2} \text{ . Απόλυτη γωνία εξόδου ροής από την 1^η περύγωση} \quad (4.55)$$

$$\alpha_{22} = -\alpha_{21} \text{ . Απόλυτη γωνία εισόδου ροής στην 2^η περύγωση} \quad (4.56)$$

$$b_2 = b_2 \text{ . Γωνία ακτινικής συνιστώσας απόλυτης ταχύτητας} \quad (4.57)$$

Αντίστοιχα, όπως και στη θέση 1, καλούμε και εδώ την υπορουτίνα Velcalc η οποία εξάγει τα μεγέθη : $M_2, V_2, V_{ax2}, V_{u2}, V_{r2}, \rho_2, v_2$.

Συνεχίζοντας, ο κώδικας CRCALC υπολογίζει :

$$W_{u21} = V_{u21} - U_{21}, V_{u21} = V_{u2} \quad (4.58)$$

$$\beta_{21} = \arctan\left(\frac{W_{u21}}{V_{ax2}}\right) \quad (4.59)$$

$$W_{21XZ} = \sqrt{W_{u21}^2 + V_{ax2}^2} \quad (4.60)$$

$$W_{21} = \sqrt{W_{21XZ}^2 + V_{r2}^2} \quad (4.61)$$

$$W_{u22} = W_{u21}, \beta_{22} = \beta_{21}, W_{22} = W_{21}, \boxed{if - U_{22} = U_3 = 0} \quad (4.62)$$

$$W_{u22} = -V_{u21} - U_{22} = V_{u22} - U_{22} \quad (4.63)$$

$$\beta_{22} = \arctan\left(\frac{W_{u22}}{V_{ax2}}\right) \quad (4.64)$$

$$W_{22XZ} = \sqrt{W_{u22}^2 + V_{ax2}^2} \quad (4.65)$$

$$W_{22} = \sqrt{W_{22XZ}^2 + V_{r2}^2} \quad (4.66)$$

$$Re_{C2} = \frac{W_{22} \cdot c}{v_2} . \text{ Reynolds } 2^{ns} \text{ πτερύγωσης βασισμένος στη χορδή } c=39\text{mm}. \quad (4.67)$$

$$\delta_1 = -\beta_{21} - |\beta_{12}'| \quad (4.68)$$

$$\theta_1 = \beta_1 - \beta_{21} . \text{ Γωνία απόκλισης } 1^{ns} \text{ Πτερύγωσης } \theta_2 = \beta_{22} - \beta_3 \quad (4.69)$$

$$i_2 = -\beta_{22} - |\beta_{21}'| \quad (4.70)$$

Θέση 3 (5-hole Probe 9550103)

Οι καμπύλες βαθμονόμησης και οι παράμετροι υπολογισμού παρουσιάζονται στα κεφάλαια 3.2.3 και 3.2.4. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της αλληλουχίας των παρακάτω σχέσεων με χρήση του κώδικα CRCALC, κατ' αντιστοιχία με τη θέση 2.

$$P_0 = (P_0 - P_{at})_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 3} + P_{amb} \quad (4.71)$$

$$\Delta P = P_0 - \frac{2(P_0 - (P_0 - P_3)_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 3} - (P_3 - P_1)_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 3})}{2} \quad (4.72)$$

$$K_a = \frac{(P_3 - P_1)_{\theta \acute{\epsilon} \sigma \eta 3}}{\Delta P} \quad (4.73)$$

$$K_b = \frac{(P_2 - P_4)_{\theta \epsilon \sigma \eta 3}}{\Delta P} \quad (4.74)$$

$a_3 = a_3(K_a, K_b)$. Πολυώνυμο μορφής σχέσεως (3.21) με $L=M=7$.

$b_3 = b_3(K_a, K_b)$. Πολυώνυμο μορφής σχέσεως (3.21) με $L=M=7$.

$K_q = K_q(a_3, b_3)$. Πολυώνυμο μορφής σχέσεως (3.22) με $L=M=7$.

$K_{pt} = K_{pt}(a_3, b_3)$. Πολυώνυμο μορφής σχέσεως (3.22) με $L=M=7$.

$$q_3 = \frac{\Delta P}{K_q} \quad (4.75)$$

$$(P_{i3} - P_0) = K_{pt} \cdot q_3 \quad (4.76)$$

$$P_{i3} = (P_{i3} - P_0) + P_0 \text{ . Ολική πίεση στη θέση 3} \quad (4.77)$$

$$P_{s3} = P_{i3} - q_3 \text{ . Στατική πίεση στη θέση 3} \quad (4.78)$$

$$\alpha_3 = -\left(a_3 + \varphi_{pr3}\right) \text{ . Απόλυτη γωνία εξόδου ροής από την 2^η πτερύγωση} \quad (4.79)$$

$$b_3 = b_3 \text{ . Γωνία ακτινικής συνιστώσας απόλυτης ταχύτητας εξόδου} \quad (4.80)$$

Αντίστοιχα, όπως και στη θέση 2, καλούμε και εδώ την υπορουτίνα Velcalc η οποία εξάγει τα μεγέθη : $M_3, V_3, V_{ax3}, V_{u3}, V_{r3}, \rho_3, v_3$.

Συνεχίζοντας, ο κώδικας CRCALC υπολογίζει :

$$W_{u3} = \beta_3 = W_3 = 0, \boxed{\text{if } -U_{22} = U_3 = 0} \quad (4.81)$$

$$W_{u3} = V_{u3} - U_3 \quad (4.82)$$

$$\beta_3 = \arctan\left(\frac{W_{u3}}{V_{ax3}}\right) \quad (4.83)$$

$$W_{3XZ} = \sqrt{W_{u3}^2 + V_{ax3}^2} \quad (4.84)$$

$$W_3 = \sqrt{W_{3XZ}^2 + V_{r3}^2} \quad (4.85)$$

$$\delta_2 = -\beta_3 - \left|\beta_{22}'\right| \quad (4.86)$$

$$\theta_2 = \beta_{22} - \beta_3 \text{ . Γωνία απόκλισης 2^{ης} Πτερύγωσης} \quad (4.87)$$

Στη συνέχεια, ο κώδικας CRCALC υπολογίζει τα παρακάτω τοπικά μεγέθη επιδόσεων των πτερυγώσεων :

$$P_{tr1} = P_{s1} + \frac{\rho_1}{2} W_1^2 \text{ : Περιστερομένη ολική πίεση θέσης 1.} \quad (4.88)$$

$$P_{tr21} = P_{s2} + \frac{\rho_2}{2} W_{21}^2 : \text{Περιστρεφόμενη ολική πίεση θέσης 21.} \quad (4.89)$$

$$\bar{\omega}_1 = \frac{P_{tr1} - P_{tr21}}{\frac{\rho_1}{2} W_1^2} : \text{Συντελεστής απωλειών 1ης πτερύγωσης.} \quad (4.90)$$

$$P_{tr22} = P_{s2} + \frac{\rho_2}{2} W_{22}^2 : \text{Περιστρεφόμενη ολική πίεση θέσης 22.} \quad (4.91)$$

$$P_{tr3} = P_{s3} + \frac{\rho_3}{2} W_3^2 : \text{Περιστρεφόμενη ολική πίεση θέσης 3.} \quad (4.92)$$

$$\bar{\omega}_2 = \frac{P_{tr22} - P_{tr3}}{\frac{\rho_2}{2} W_{22}^2} : \text{Συντελεστής απωλειών 2ης πτερύγωσης.} \quad (4.93)$$

$$\bar{\omega}_2 = \frac{P_{t2} - P_{t3}}{\frac{\rho_2}{2} V_2^2} : \text{Συντελεστής απωλειών 2ης πτερύγωσης (αν είναι στάτορας).} \quad (4.94)$$

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ολικές – προς – ολικές συνθήκες 1ης πτερύγωσης.

$$\eta_{is,t-t1} = \frac{h_{t2is} - h_{t1}}{h_{t2} - h_{t1}} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{P_{t2} - P_{t1}}{\rho_1 U_1 (V_{u2} - V_{u1})} \quad (4.95)$$

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ολικές – προς – ολικές συνθήκες 2ης πτερύγωσης.

$$\eta_{is,t-t2} = \frac{h_{t3is} - h_{t2}}{h_{t3} - h_{t2}} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{P_{t3} - P_{t2}}{\rho_2 U_{22} (V_{u3} - V_{u22})} \quad (4.96)$$

Μέτρηση παροχής μέσω της διαφοράς πιέσεων $P_{Swt01} - P_{Swt02}$ στον αγωγό εισόδου (Μέθοδος Συγκλίνοντος Ακροφυσίου)^[26]

Η απευθείας μέτρηση της παροχής που αναρροφά ο συμπιεστής μπορεί και γίνεται με απευθείας μέτρηση της διαφοράς πιέσεων $P_{Swt01} - P_{Swt02}$ στον αγωγό εισόδου, με τον εξής τρόπο :

Οι οπές μέτρησης στατικής πίεσης επάνω στον αγωγό εισόδου βρίσκονται στις θέσεις 01 και 02. Στη θέση 01 η διατομή του αγωγού εισόδου είναι A_{01} και στη θέση 02 είναι A_{02} και προφανώς ισχύει $A_{01} > A_{02}$. Έτσι, για το ατριβές και ασυμπιεστο ρευστό με χρήση της εξίσωσης Bernoulli μεταξύ των διατομών 01 και 02, καταλήγουμε στη σχέση (4.97). Μέσω της εξίσωσης της συνέχειας καταλήγουμε στη σχέση (4.98) και μέσω των εξισώσεων αυτών καταλήγουμε στην εξίσωση (4.99) για την παροχή. Παρατηρούμε ότι η εξίσωση αυτή για την παροχή είναι μια γραμμική συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του γινομένου $2 \cdot \rho \cdot (P_{Swt01} - P_{Swt02})$. Βέβαια, επειδή η ροή είναι πρακτικά συνεκτική δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (4.99), αλλά επειδή ισχύει η γραμμικότητα της συνάρτησης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (4.100).

Έτσι, για να έχουμε απευθείας μέτρηση της παροχής αρκεί να γνωρίζουμε τους συντελεστές a και b της συνάρτησης (4.100). Για την εύρεση των συντελεστών a και b έγινε η βαθμονόμηση της παροχής η οποία αναλύεται στη συνέχεια.

$$P_{01} + \frac{\rho}{2} u_{01}^2 = P_{02} + \frac{\rho}{2} u_{02}^2 \Rightarrow P_{01} - P_{02} = \frac{\rho}{2} (u_{02}^2 - u_{01}^2) \quad (4.97)$$

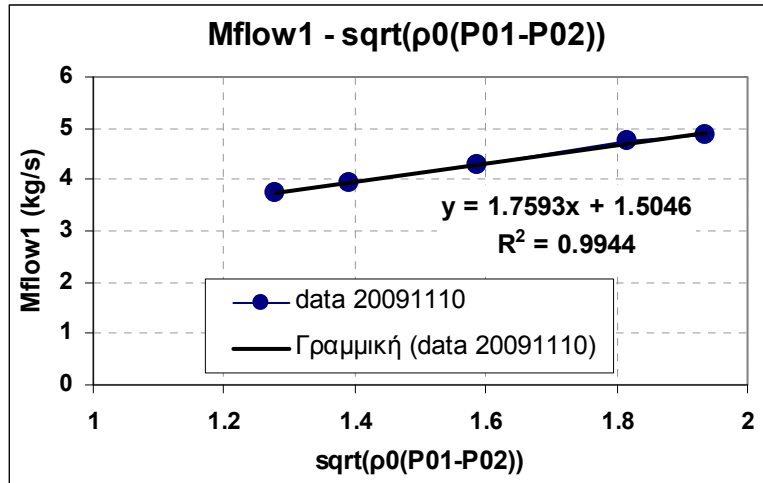
$$\dot{m}_0 = \dot{m}_{01} = \dot{m}_{02} = \rho u_{01} A_{01} = \rho u_{02} A_{02} \Rightarrow \boxed{\frac{u_{01}}{u_{02}} = \frac{A_{02}}{A_{01}}} \quad (4.98)$$

$$P_{01} - P_{02} = \frac{\dot{m}_0^2}{2 \rho A_{02}^2} \left(1 - \left(\frac{A_{02}}{A_{01}} \right)^2 \right) \Rightarrow \boxed{\dot{m}_0} = \frac{A_{02}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_{02}}{A_{01}} \right)^2}} \sqrt{2 \rho (P_{01} - P_{02})} \quad (4.99)$$

$$\dot{m}_0 = a \cdot \sqrt{2 \rho (P_{01} - P_{02})} + b \quad (4.100)$$

Για τη βαθμονόμηση χρειαζόμαστε τους συντελεστές a και b . Για την εύρεσή τους χρειαζόμαστε τουλάχιστον 2 σημεία, όπου το κάθε ένα αντιστοιχεί σε μια τριάδα τιμών παροχής m πυκνότητας ρ και διαφοράς πίεσης $P_{Swt01} - P_{Swt02}$. Αυτό που έγινε είναι το εξής : Για διάφορα σετ σ.α.λ. των περωτών εκτελούσαμε ακτινικές σαρώσεις με τον 3-hole Probe στη θέση 1 ώστε να πάρουμε το προφίλ της αξονικής ταχύτητας, με την ολοκλήρωση του οποίου υπολογίζαμε την παροχή m . Παράλληλα, για κάθε σετ σ.α.λ. των περωτών, μετρούσαμε την πυκνότητα ρ_0 από τις συνθήκες περιβάλλοντος (βλ. και κεφάλαιο 4.3.1), αλλά και την διαφορά πίεσης $P_{Swt01} - P_{Swt02}$, μεγέθη τα οποία για σταθερές στροφές και σταθερή παροχή παραμένουν σταθερά. Έτσι, υπολογίζοντας τις μέσες τιμές των ρ_0 , $P_{Swt01} - P_{Swt02}$ για κάθε σετ στροφών, καταφέραμε να έχουμε για κάθε σετ στροφών τριάδες m , ρ_0 , $P_{Swt01} - P_{Swt02}$. Η κάθε τριάδα δημιουργεί ένα σημείο για τη συνάρτηση (4.100) και έτσι "περάσαμε" από τα σημεία αυτά μια γραμμική συνάρτηση της μορφής της σχέσης (4.100), προσδιορίζοντας έτσι τους συντελεστές a και b .

Η καμπύλη βαθμονόμησης της παροχής και οι συντελεστές a και b φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Καμπύλη βαθμονόμησης της παροχής.

Έτσι λοιπόν, ο κώδικας CRCALC για κάθε μέτρηση σε κάθε σημείο λειτουργίας, υπολογίζει μέσω της συνάρτησης (function) Qflow την παροχή από τα ρ_0 , $P_{Swt01}-P_{Swt02}$.

Επίσης, ο κώδικας CRCALC για κάθε μέτρηση σε κάθε σημείο λειτουργίας υπολογίζει και τα $P_{Swt01}-P_{Swt02}$, $P_{at}-P_{Swt1}$, $P_{Swt2}-P_{Swt1}$, $P_{Swt3}-P_{Swt2}$, $P_{Swt3}-P_{Swt1}$ τα οποία είναι σχεδόν σταθερά για κάθε σημείο λειτουργίας αφού η παροχή και οι στροφές μένουν σταθερά.

4.3.2 Υπολογισμός ολικών επιδόσεων.

Ο υπολογισμός των ολικών επιδόσεων γίνεται 1^{ov} με τις μέσες τιμές μεγεθών που σε κάθε σημείο λειτουργίας (σταθερές στροφές και παροχή) παραμένουν σχεδόν σταθερά, και 2^{ov} με την αριθμητική ολοκλήρωση των τοπικών μεγεθών που υπολογίστηκαν παραπάνω από τις ακτινικές σαρώσεις. Βέβαια, αν σε κάποια πείραμα δεν εκτελούμε ακτινικές σαρώσεις αλλά παίρνουμε πολλές μετρήσεις σε σταθερή ακτίνα, τότε ο κώδικας υπολογίζει τις ολικές επιδόσεις βάση της μέσης τιμής των μεγεθών αυτών.

Τα μεγέθη που σε κάθε σημείο λειτουργίας παραμένουν σχεδόν σταθερά, και των οποίων υπολογίζουμε τη μέση τιμή είναι 1^{ov} οι σ.α.λ. των πτερωτών RPM1 και RPM2, 2^{ov} η πυκνότητα στις θέσεις amb (θέση 0), 1, 2 και 3, 3^{ov} οι διαφορές στατικών πιέσεων από τις οπές του κελύφους $P_{Swt01}-P_{Swt02}$, $P_{at}-P_{Swt1}$, $P_{Swt2}-P_{Swt1}$, $P_{Swt3}-P_{Swt2}$, $P_{Swt3}-P_{Swt1}$, 4^{ov} οι συνθήκες περιβάλλοντος P_{at} , T_{at} και 5^{ov} η παροχή μάζας m_0 που μετράμε μέσω της διαφοράς πιέσεων $P_{Swt01}-P_{Swt02}$ στον αγωγό εισόδου (Bellmouth).

Ο κώδικας CRCALC υπολογίζει τις μέσες τιμές αλλά και τις τυπικές αποκλίσεις των μεγεθών αυτών καλώντας την υπορουτίνα MV η οποία με τη σειρά της καλεί την υπορουτίνα MVSD για να υπολογιστούν οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις. Έτσι, έχουμε τις μέσες τιμές των εξής μεγεθών :

$$\overline{P_{Sw101} - P_{Sw102}}, \overline{P_{at} - P_{Sw1}}, \overline{P_{Sw2} - P_{Sw1}}, \overline{P_{Sw3} - P_{Sw2}}, \overline{P_{Sw3} - P_{Sw1}},$$

$$\overline{m_0}, \overline{\rho_0}, \overline{\rho_1}, \overline{\rho_2}, \overline{\rho_3}, \overline{P_{at}}, \overline{T_{at}}, \overline{RPM1}, \overline{RPM2} \quad (4.101)$$

Τέλος, ο κώδικας CRCALC καλεί την υπορουτίνα CRPERF για τον υπολογισμό των υπόλοιπων μεγεθών που συνθέτουν τις ολικές επιδόσεις του συμπιεστή. Μέσα στον CRPERF, υπάρχει και η υπορουτίνα INTEGRAL που υπολογίζει τα ολοκληρώματα με τη μέθοδο του τραπεζίου.

Μέσα στην υπορουτίνα CRPERF υπολογίζονται για κάθε σημείο λειτουργίας τα εξής μεγέθη :

$$\dot{m}_1 = \int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_1 V_{a1} R dR : \text{Παροχή Θέσης 1.} \quad (4.102)$$

$$\dot{m}_2 = \int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_2 V_{a2} R dR : \text{Παροχή Θέσης 2.} \quad (4.103)$$

$$\dot{m}_3 = \int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_3 V_{a3} R dR : \text{Παροχή Θέσης 3.} \quad (4.104)$$

$$\overline{P}_{t1} = \frac{\int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_1 V_{a1} P_{t1} R dR}{\dot{m}_1} : \text{Μέση ολική πίεση θέσης 1.} \quad (4.105)$$

$$\overline{P}_{t2} = \frac{\int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_2 V_{a2} P_{t2} R dR}{\dot{m}_2} : \text{Μέση ολική πίεση θέσης 2.} \quad (4.106)$$

$$\overline{P}_{t3} = \frac{\int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_3 V_{a3} P_{t3} R dR}{\dot{m}_3} : \text{Μέση ολική πίεση θέσης 3.} \quad (4.107)$$

$$\overline{P}_{s1} = \frac{\int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_1 V_{a1} P_{s1} R dR}{\dot{m}_1} : \text{Μέση στατική πίεση θέσης 1.} \quad (4.108)$$

$$\overline{P}_{s2} = \frac{\int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_2 V_{a2} P_{s2} R dR}{\dot{m}_2} : \text{Μέση στατική πίεση θέσης 2.} \quad (4.109)$$

$$\overline{P}_{s3} = \frac{\int_{R_H}^{R_T} 2\pi\rho_3 V_{a3} P_{s3} R dR}{\dot{m}_3} : \text{Μέση στατική πίεση θέσης 3.} \quad (4.110)$$

Συντελεστής Παροχής 1^{ης} Πτερωτής

$$\Phi_1 = \frac{V_{a1}}{U_{m1}} = \frac{\dot{m}_1}{\bar{\rho}_1 \pi (R_T^2 - R_H^2) U_{m1}}, \text{ όπου : } U_{m1} = \frac{\pi RPM1}{30} R_m \quad (4.111)$$

Συντελεστής Παροχής 2^{ης} Πτερωτής

$$\Phi_2 = \frac{V_{a2}}{U_{m2}} = \frac{\dot{m}_2}{\bar{\rho}_2 \pi (R_T^2 - R_H^2) U_{m2}}, \text{ όπου : } U_{m2} = \frac{\pi RPM2}{30} R_m \quad (4.112)$$

Ισεντροπικός συντελεστής Φόρτισης 1^{ης} Πτερωτής ολικές – προς – ολικές συνθήκες.

$$\Psi_{1, is, t-t} = \frac{\bar{h}_{t2is} - \bar{h}_{t1}}{U_{m1}^2} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{\bar{P}_{t2} - \bar{P}_{t1}}{\bar{\rho}_1 U_{m1}^2} \quad (4.113)$$

Ισεντροπικός συντελεστής Φόρτισης 2^{ης} Πτερωτής ολικές – προς – ολικές συνθήκες.

$$\Psi_{2, is, t-t} = \frac{\bar{h}_{t3is} - \bar{h}_{t2}}{U_{m2}^2} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{\bar{P}_{t3} - \bar{P}_{t2}}{\bar{\rho}_2 U_{m2}^2} \quad (4.114)$$

Ισεντροπικός συντελεστής Φόρτισης 1^{ης} Πτερωτής στατικές – προς – στατικές συνθήκες.

$$\Psi_{1, is, s-s} = \frac{\bar{h}_{2is} - \bar{h}_1}{U_{m1}^2} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{\bar{P}_{s2} - \bar{P}_{s1}}{\bar{\rho}_1 U_{m1}^2} \quad (4.115)$$

Ισεντροπικός συντελεστής Φόρτισης 2^{ης} Πτερωτής στατικές – προς – στατικές συνθήκες.

$$\Psi_{2, is, s-s} = \frac{\bar{h}_{3is} - \bar{h}_2}{U_{m2}^2} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{\bar{P}_{s3} - \bar{P}_{s2}}{\bar{\rho}_2 U_{m2}^2} \quad (4.116)$$

Ισεντροπικός συντελεστής Φόρτισης 1^{ης} Πτερωτής στατικές – προς – ολικές συνθήκες.

$$\Psi_{1, is, s-t} = \frac{\bar{h}_{2is} - \bar{h}_{t1}}{U_{m1}^2} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{\bar{P}_{s2} - \bar{P}_{t1}}{\bar{\rho}_1 U_{m1}^2} \quad (4.117)$$

Ισεντροπικός συντελεστής Φόρτισης 2^{ης} Πτερωτής στατικές – προς – ολικές συνθήκες.

$$\Psi_{2, is, s-t} = \frac{\bar{h}_{3is} - \bar{h}_{t2}}{U_{m2}^2} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{\bar{P}_{s3} - \bar{P}_{t2}}{\bar{\rho}_2 U_{m2}^2} \quad (4.118)$$

Συντελεστής Φόρτισης – Ισεντροπικός συντελεστής Φόρτισης.

$$\Psi = \frac{\Psi_{is}}{\eta_{is}}, \text{ } \eta_{is} : \text{ αντίστοιχος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης.} \quad (4.119)$$

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης 1^{ης} Πτερωτής ολικές – προς – ολικές συνθήκες.

$$\eta_{1, is, t-t} = \frac{\bar{h}_{t2is} - \bar{h}_{t1}}{\bar{h}_{t2} - \bar{h}_{t1}} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{\bar{P}_{t2} - \bar{P}_{t1}}{\bar{\rho}_1 U_1 (V_{u2} - V_{u1})} = \frac{(\bar{P}_{t2} - \bar{P}_{t1}) \dot{m}_1}{\bar{\rho}_1 \int_{R_H}^{R_T} 2\pi \rho_1 V_{a1} U_1 (V_{u2} - V_{u1}) R dR} \quad (4.120)$$

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης 2^{ης} Πτερωτής ολικές – προς – ολικές συνθήκες.

$$\eta_{2, is, t-t} = \frac{\bar{h}_{t3is} - \bar{h}_{t2}}{\bar{h}_{t3} - \bar{h}_{t2}} \stackrel{\rho=const}{=} \frac{\bar{P}_{t3} - \bar{P}_{t2}}{\bar{\rho}_2 U_3 (V_{u3} - V_{u2})} = \frac{(\bar{P}_{t3} - \bar{P}_{t2}) \dot{m}_2}{\bar{\rho}_2 \int_{R_H}^{R_T} 2\pi \rho_2 V_{a2} U_3 (V_{u3} - V_{u2}) R dR} \quad (4.121)$$

$$\pi_{c1} = \frac{\bar{P}_{t2}}{\bar{P}_{t1}} : \text{Λόγος πίεσης 1^{ης} Πτερωτής.} \quad (4.122)$$

$$\pi_{c2} = \frac{\bar{P}_{t3}}{\bar{P}_{t2}} : \text{Λόγος πίεσης 2^{ης} Πτερωτής.} \quad (4.123)$$

$$\pi_c = \frac{\bar{P}_{t3}}{\bar{P}_{t1}} : \text{Συνολικός λόγος πίεσης.} \quad (4.124)$$

$$\theta = \frac{\bar{T}_{at}}{T_{ref}} : \text{Συντελεστής διόρθωσης } \theta, T_{ref} = 288.15\text{K} \text{ Θερμοκρασία αναφοράς.} \quad (4.125)$$

$$\delta = \frac{\bar{P}_{t1}}{P_{ref}} : \text{Συντελεστής διόρθωσης } \delta, P_{ref} = 101325\text{Pa} \text{ Πίεση αναφοράς.} \quad (4.126)$$

$$\dot{m}_{0cor} = \dot{m}_0 \frac{\sqrt{\theta}}{\delta} : \text{Διορθωμένη Παροχή.} \quad (4.127)$$

$$N_{1cor} = \frac{RPM1}{\sqrt{\theta}} : \text{Διορθωμένες στροφές 1^{ης} Πτερωτής.} \quad (4.128)$$

$$N_{2cor} = \frac{RPM2}{\sqrt{\theta}} : \text{Διορθωμένες στροφές 2^{ης} Πτερωτής.} \quad (4.129)$$

Υπενθυμίζουμε ότι σε περίπτωση που δεν κάνουμε ακτινικές σαρώσεις αλλά μετράμε συνεχώς σε σταθερή ακτίνα, ο κώδικας CRCALC υπολογίζει τις μέσες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις όλων των παραπάνω μεγεθών.

4.3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας συμπιεστή.

Το πεδίο λειτουργίας ενός συμπιεστή παρουσιάζεται συνήθως σε μορφή χαρακτηριστικών καμπύλων που δίνουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συμπιεστή σε συνάρτηση με την παροχή μάζας. Σαν παράμετρος χρησιμοποιείται κάθε φορά ο αριθμός στροφών.

Στη διάταξή μας, τα χαρακτηριστικά μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι 1^{ov}) ο λόγος πίεσης της κάθε βαθμίδας (κάθε ρότορα) ξεχωριστά, αλλά και των δύο βαθμίδων μαζί, ολόκληρου δηλαδή του συμπιεστή και 2^{ov}) ο βαθμός απόδοσης της κάθε βαθμίδας. Βέβαια, επειδή ο λόγος πίεσης του συμπιεστή μας είναι πολύ μικρός της τάξης του 1.004, χρησιμοποιούμε και την αύξηση της ολικής πίεσης. Σαν παραμέτρους χρησιμοποιούμε τον αριθμό στροφών και την γωνία κλίσης (stagger) των πτερυγίων της κάθε πτερωτής.

Παράλληλα, μας ενδιαφέρουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες των αδιάστατων μεγεθών τα οποία είναι ο συντελεστής παροχής Φ και ο συντελεστής φόρτισης Ψ . Οι αδιάστατες αυτές καμπύλες είναι ανεξάρτητες από τις συνθήκες εισόδου του συμπιεστή (πίεση και θερμοκρασία) και έχει παρατηρηθεί ότι δε μεταβάλλονται με τις σ.α.λ. του συμπιεστή για σταθερή γωνία εισόδου α_1 και γωνία εξόδου β_2 . Κάθε ζεύγος τιμών Φ , Ψ αντιστοιχεί σε σταθερές γωνίες ροής, έτσι ένα σύνολο αδιάστατων παραμέτρων Φ , Ψ συνεπάγεται τρίγωνα με σταθερές γωνίες, άρα όμοια τρίγωνα ταχύτητας, με το βαθμό απόδοσης να μένει σταθερό^{[15],[22]}.

Επίσης, μας ενδιαφέρουν και οι χαρακτηριστικές καμπύλες λόγου πίεσης (ή διαφοράς πίεσης) με την διορθωμένη παροχή m_{cor} για διορθωμένες στροφές N_{cor} . Οι καμπύλες αυτές είναι ανεξάρτητες από τις συνθήκες εισόδου του συμπιεστή (πίεση και θερμοκρασία) για σταθερές διορθωμένες στροφές. Έτσι, αν θέλουμε να επαναλάβουμε μια μέτρηση αρκεί να ρυθμίσουμε τις στροφές έτσι ώστε οι διορθωμένες στροφές να είναι ίδιες με τις διορθωμένες στροφές της προηγούμενης μέτρησης.

Πρακτικά όμως στις μετρήσεις είναι πολύ σπάνιο να πετύχουμε τον ακριβή αριθμό σ.α.λ. που επιθυμούμε να έχουν οι πτερωτές, είτε οι σ.α.λ. είναι διορθωμένες είτε όχι. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορούμε να συγκρίνουμε με σιγουριά δύο χαρακτηριστικές όπου η μία είναι λ.χ. για 1187rpm και η άλλη για 2014rpm Έτσι, το ζήτημα είναι να μπορέσουμε για κάθε σ.λ. μιας χαρακτηριστικής να αναγάγουμε τις διορθωμένες στροφές, τη διορθωμένη παροχή και το λόγο πίεσης που έχουμε, σε έναν επιθυμητό λόγο στροφών ο οποίος αντιστοιχεί σε μια διορθωμένη παροχή και σε έναν λόγο πίεσης διαφορετικό από τον μετρούμενο. Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με το προηγούμενο παράδειγμα, αν θέλουμε να αναγάγουμε τις διορθωμένες στροφές στις 2000 τότε θα έχουμε έναν νέο λόγο πίεσης και μια νέα διορθωμένη παροχή που αντιστοιχούν στις νέες διορθωμένες στροφές. Αυτό μπορεί να γίνει με την εύρεση του αντίστοιχου σ.λ. στο οποίο θα έχουμε όμοια τρίγωνα ταχύτητας και σταθερό βαθμό απόδοσης. Έτσι, μέσω των αδιάστατων παραμέτρων Φ και Ψ , για ένα γνωστό σ.λ. (Α) με συνθήκες εισόδου P_{tA} , T_{tA} και ταχύτητα περιστροφής U_A , μπορεί να προσδιοριστεί το σ.λ. (Β) για συνθήκες εισόδου P_{tB} , T_{tB} και ταχύτητα περιστροφής U_B . Η σύνδεση του λόγου πίεσης π_c με το Ψ γίνεται μέσω της σχέσης^[22] (4.130). Η σύνδεση του Φ με την ανηγμένη παροχή γίνεται (προσεγγιστικά) μέσω της σχέσης^[22] (4.131) η οποία ισχύει για μικρές μεταβολές στις σ.α.λ. μεταξύ των αντίστοιχων σ.λ..

$$\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 + \eta_{is} \Psi (\gamma - 1) \left(\frac{U_{Rm}}{\sqrt{\gamma RT_{t,inlet}}} \right)^2 \quad (4.130)$$

$$\dot{m} \frac{\sqrt{\gamma RT_{t,inlet}}}{P_{t,inlet}} = \gamma \cdot \Phi \cdot A \cdot \frac{U_{Rm}}{\sqrt{\gamma RT_{t,inlet}}}, A : \text{Εμβαδόν διατομής εισόδου συμπιεστή} \quad (4.131)$$

Λύνοντας τη σχέση (4.130) ως προς Ψ και τη σχέση (4.131) ως προς Φ , αν λάβουμε υπ' όψιν ότι $\Psi_A = \Psi_B$, $\Phi_A = \Phi_B$ και $\eta_{is,A} = \eta_{is,B}$, και ενσωματώνοντας στη σχέση τις διορθωμένες στροφές N_{cor} και τη διορθωμένη παροχή m_{cor} αντίστοιχα (όπως ορίζονται από τις σχέσεις (4.128) και (4.127) αντίστοιχα), καταλήγουμε στη σχέση (4.132) για τον υπολογισμό της πίεσης $\pi_{c,B}$, και στη σχέση (4.133) για τον υπολογισμό της διορθωμένης παροχής $m_{cor,B}$ μεγέθη τα οποία αντιστοιχούν στο αντίστοιχο σ.λ. (B) και μπορούν να υπολογιστούν αν γνωρίζουμε τα $\pi_{c,A}$, $N_{cor,A}$ και $m_{cor,A}$ του σ.λ. (A) και φυσικά το επιθυμητό $N_{cor,B}$.

$$\pi_{c,B} = \left[\left(\pi_{c,A}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \frac{N_{cor,B}^2}{N_{cor,A}^2} + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4.132)$$

$$\dot{m}_{cor,B} = \dot{m}_{cor,A} \frac{N_{cor,B}}{N_{cor,A}} \quad (4.133)$$

Συνολικά λοιπόν οι καμπύλες που προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά των βαθμίδων και του συμπιεστή, και οι οποίες θα παρουσιασθούν παρακάτω ως αποτελέσματα των μετρήσεων, είναι οι εξής :

$$\begin{aligned} & \left[(\bar{P}_{t2} - \bar{P}_{t1}) - \eta_{1is,t-t} - \dot{m}_1 \right] \left[(\bar{P}_{t3} - \bar{P}_{t2}) - \eta_{2is,t-t} - \dot{m}_2 \right] \left[(\bar{P}_{t3} - \bar{P}_{t1}) - \dot{m}_0 \right] \\ & \left[\pi_{c1} - \eta_{1is,t-t} - \dot{m}_1 \right] \left[\pi_{c2} - \eta_{2is,t-t} - \dot{m}_2 \right] \left[\pi_c - \dot{m}_1 \right] \\ & \left[(\bar{P}_{s2} - \bar{P}_{s1}) - \eta_{1is,t-t} - \dot{m}_1 \right] \left[(\bar{P}_{s3} - \bar{P}_{s2}) - \eta_{2is,t-t} - \dot{m}_2 \right] \left[(\bar{P}_{s3} - \bar{P}_{s1}) - \dot{m}_0 \right] \\ & \left[(\overline{P_{swt2}} - \overline{P_{swt1}}) - \dot{m}_1 \right] \left[(\overline{P_{swt3}} - \overline{P_{swt2}}) - \dot{m}_2 \right] \left[(\overline{P_{swt3}} - \overline{P_{swt1}}) - \dot{m}_0 \right] \\ & \left[\Psi_{1, is, t-t} - \eta_{1is, t-t} - \Phi_1 \right] \left[\Psi_{2, is, t-t} - \eta_{2is, t-t} - \Phi_2 \right] \\ & \left[\Psi_{1, is, s-s} - \eta_{1is, t-t} - \Phi_1 \right] \left[\Psi_{2, is, s-s} - \eta_{2is, t-t} - \Phi_2 \right] \\ & \left[\Psi_{1, is, s-t} - \eta_{1is, t-t} - \Phi_1 \right] \left[\Psi_{2, is, s-t} - \eta_{2is, t-t} - \Phi_2 \right] \\ & \left[(\bar{P}_{t2} - \bar{P}_{t1}) - \eta_{1is, t-t} - \dot{m}_{0cor} \right] \left[(\bar{P}_{t3} - \bar{P}_{t2}) - \eta_{2is, t-t} - \dot{m}_{0cor} \right] \left[(\bar{P}_{t3} - \bar{P}_{t1}) - \dot{m}_{0cor} \right] \quad \text{για } N_{1cor}, N_{2cor} \\ & \left[\pi_{c1,B} - \eta_{1is, t-t} - \dot{m}_{0cor,B} \right] \left[\pi_{c2,B} - \eta_{2is, t-t} - \dot{m}_{0cor,B} \right] \left[\pi_{c,B} - \dot{m}_{0cor} \right] \quad \text{για } N_{1cor,B}, N_{2cor,B} \end{aligned}$$

4.3.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες πτερύγωσης βαθμίδας συμπίεστή.

Κινούμενοι πάνω σε μια χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας (σταθερός αριθμός στροφών) μιας βαθμίδας, ή ολόκληρου του συμπίεστή, παρατηρούμε ότι η παροχή αλλάζει, άρα αλλάζει και η αξονική ταχύτητα, ενώ η περιφερειακή ταχύτητα παραμένει σταθερή για σταθερή ακτίνα. Άρα, η σχετική γωνία εισόδου της ροής στην πτερύγωση αλλάζει. Παράλληλα, έχουμε αλλαγές και σε άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη της πτερύγωσης, των οποίων η συμπεριφορά μας ενδιαφέρει. Βέβαια, τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται ακτινικά, γι' αυτό και υπολογίζουμε τα ακτινικά προφίλ τους.

Έτσι λοιπόν, η κάθε χαρακτηριστική καμπύλη του συμπίεστή αποτελείται από κάποια σημεία λειτουργίας, όπου σε κάθε σημείο λειτουργίας αποτυπώνουμε τα ακτινικά προφίλ των χαρακτηριστικών μεγεθών της πτερύγωσης, ώστε να έχουμε εποπτεία της μεταβολής των προφίλ αυτών καθώς αλλάζουμε σημείο λειτουργίας, αλλά και για να τα συσχετίσουμε με τις ολικές επιδόσεις των βαθμίδων.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των οποίων υπολογίζουμε τα ακτινικά προφίλ είναι τα εξής :

$$\begin{aligned}
& [\alpha_1 - R] \quad [\alpha_2 - R] \quad [\alpha_3 - R] \quad [b_2 - R] \quad [b_3 - R] \quad [\beta_1 - R] \quad [\beta_{21} - R] \quad [\beta_{22} - R] \quad [\beta_3 - R] \\
& [\theta_1 - R] \quad [\theta_2 - R] \quad [i_1 - R] \quad [i_2 - R] \quad [\delta_1 - R] \quad [\delta_2 - R] \\
& [V_1 - R] \quad [V_2 - R] \quad [V_3 - R] \quad [W_1 - R] \quad [W_2 - R] \quad [W_3 - R] \\
& [V_{a1} - R] \quad [V_{a2} - R] \quad [V_{a3} - R] \quad [V_{u1} - R] \quad [V_{u2} - R] \quad [V_{u3} - R] \quad [V_{r2} - R] \quad [V_{r3} - R] \\
& [P_{t1} - R] \quad [P_{t2} - R] \quad [P_{t3} - R] \quad [P_{s1} - R] \quad [P_{s2} - R] \quad [P_{s3} - R] \\
& [P_{at} - R] \quad [P_{swt1} - R] \quad [P_{swt2} - R] \quad [P_{swt3} - R] \\
& [(P_{t2} - P_{t1}) - R] \quad [(P_{t3} - P_{t2}) - R] \quad [(P_{t3} - P_{t1}) - R] \\
& [(P_{s2} - P_{s1}) - R] \quad [(P_{s3} - P_{s2}) - R] \quad [(P_{s3} - P_{s1}) - R] \\
& [(P_{swt2} - P_{swt1}) - R] \quad [(P_{swt3} - P_{swt2}) - R] \quad [(P_{swt3} - P_{swt1}) - R] \\
& [\text{Re}_{C1} - R] \quad [\text{Re}_{C2} - R] \quad [\bar{\omega}_1 - R] \quad [\bar{\omega}_2 - R] \quad [\eta_{is,t-t1} - R] \quad [\eta_{is,t-t2} - R] \\
& [\bar{\omega}_1 - \eta_{is,t-t1} - R] \quad [\bar{\omega}_2 - \eta_{is,t-t2} - R] \quad [i_1 - \bar{\omega}_1 - R] \quad [i_2 - \bar{\omega}_2 - R] \\
& [\delta_1 - \bar{\omega}_1 - R] \quad [\delta_2 - \bar{\omega}_2 - R] \quad [\text{Re}_{C1} - \bar{\omega}_1 - R] \quad [\text{Re}_{C2} - \bar{\omega}_2 - R] \\
& [i_1 - \theta_1 - R] \quad [i_2 - \theta_1 - R] \quad [\delta_1 - \text{Re}_{C1} - R] \quad [\delta_2 - \text{Re}_{C2} - R] \\
& \left[\frac{W_{21}}{W_1} - \bar{\omega}_1 - R \right] \quad \left[\frac{W_3}{W_{22}} - \bar{\omega}_2 - R \right]
\end{aligned}$$

4.3.5 Ανάπτυξη κώδικα υπολογισμού μεγεθών (CRCALC).

Για τον υπολογισμό όλων των μεγεθών που αναλύθηκαν παραπάνω στα κεφάλαια 4.3.1 και 4.3.2, αναπτύχθηκε ένας κώδικας σε Fortran με το όνομα CRCALC (Contra Rotating Calculation). Οι βασικοί υπολογισμοί και διαδικασίες που πραγματοποιούνται στον κώδικα έχουν ήδη περιγραφεί στα κεφάλαια 4.3.1 και 4.3.2. Το διάγραμμα ροής του και τα αρχεία εισόδου και εξόδου του παρουσιάζονται στο παράρτημα Π3.1.

4.3.6 Ανάπτυξη κώδικα παρουσίασης των αποτελεσμάτων (CRCHART).

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις σε μορφή διαγραμμάτων είναι μια χρονοβόρος διαδικασία, ειδικότερα στην περίπτωση μας όπου θέλουμε να έχουμε συνολική άποψη για όλες τις χαρακτηριστικές καμπύλες των πτερυγώσεων και ολόκληρου του συμπιεστή, τις οποίες αναφέραμε παραπάνω στα κεφάλαια 4.3.3 και 4.3.4.

Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της εργασίας αυτής αναπτύξαμε έναν κώδικα σε VBA ο οποίος είναι ενσωματωμένος μέσα σε ένα αρχείο excel CRCHARTSVBA.xls στο οποίο δημιουργεί όλα τα διαγράμματα που αναφέραμε παραπάνω. Ο τρόπος που λειτουργεί ο κώδικας CRCHART είναι ο εξής :

Τα δεδομένα εισόδου του κώδικα είναι τα δεδομένα εξόδου του κώδικα CRCALC τα οποία είναι ουσιαστικά τα αποτελέσματα μιας σειράς μετρήσεων. Έτσι λοιπόν, μέσα στο αρχείο CRCHARTSVBA.xls υπάρχει ένα φύλλο με όνομα CRCALC στο οποίο εισάγουμε τα δεδομένα του αρχείου εξόδου CRCALC.xls του κώδικα CRCALC. Στη συνέχεια κάνουμε το ίδιο στο φύλλο CRPERF παίρνοντας τα δεδομένα από το αρχείο εξόδου CRPERF.xls του κώδικα CRCALC. Έπειτα, στο πρώτο φύλλο του αρχείου CRCHARTSVBA.xls υπάρχει μια φόρμα μέσα στην οποία εισάγουμε τον κωδικό αναγνώρισης της μέτρησης ο οποίος είναι συνήθως η ημερομηνία διεξαγωγής της μέτρησης, ώστε να εμφανίζεται σαν σχόλιο στην περιγραφή κάθε καμπύλης. Επίσης, εισάγουμε τις επιθυμητές διορθωμένες στροφές στις οποίες θέλουμε την δημιουργία των διαγραμμάτων λόγου πίεσης – παροχής. Στην ίδια φόρμα, επιλέγουμε ποια διαγράμματα θέλουμε να δημιουργηθούν και επιλέγουμε το μέγεθος που θέλουμε να έχουν. Τέλος, πατάμε το κουμπί που δημιουργεί τα διαγράμματα, τα οποία εμφανίζονται στα υπόλοιπα φύλλα του αρχείου CRCHARTSVBA.xls.

Τα διαγράμματα που δημιουργούνται σε κάθε φύλλο έχουν την εξής ταξινόμηση: Εάν πρόκειται για ακτινικά προφίλ μεγεθών, τότε για κάθε μέγεθος δημιουργούνται διαγράμματα για κάθε θέση κάθε σημείου λειτουργίας, όπου στην πρώτη σειρά διαγραμμάτων αντιστοιχούν αυτά του πρώτου σ.λειτουργίας, με το τελευταίο διάγραμμα

της σειράς να έχει μαζί τις καμπύλες όλων των θέσεων. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να συγκρίνουμε τα προφίλ μεταξύ των θέσεων. Η τελευταία σειρά διαγραμμάτων έχει μαζί τις καμπύλες όλων των σ.λειτουργίας για κάθε μια θέση. Με τον τρόπο αυτόν έχουμε πλήρη εποπτεία της αλλαγής του προφίλ του μεγέθους σε κάθε θέση καθώς αλλάζει η παροχή. Το τελευταίο διάγραμμα της τελευταίας σειράς έχει μαζί τις καμπύλες όλων των θέσεων όλων των σ.λειτουργίας για μια μαζικότερη εικόνα. Έτσι λοιπόν, σε κάθε φύλλο ακτινικού προφίλ μεγέθους έχουμε 4 διαγράμματα ανά σειρά και $Nop+1$ σειρές όπου Nop είναι ο αριθμός των σημείων λειτουργίας, άρα συνολικά **$4 \cdot (Nop+1)$ διαγράμματα σε κάθε φύλλο**. Συνολικά έχουμε 27 φύλλα που περιέχουν ακτινικά προφίλ, άρα έχουμε συνολικά **$27 \cdot 4 \cdot (Nop+1) = 108 \cdot (Nop+1)$ διαγράμματα**.

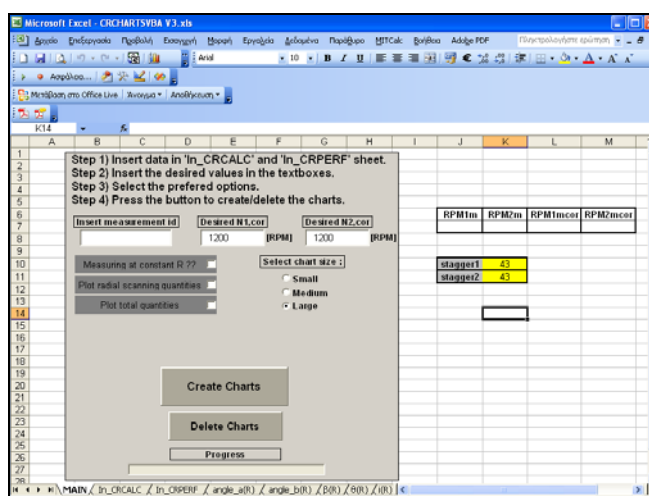
Εάν πρόκειται για διαγράμματα καμπύλων βαθμίδας και συμπιεστή, τότε για κάθε μέγεθος δημιουργούνται 2 διαγράμματα για κάθε βαθμίδα ένα για όλον τον συμπιεστή και τέλος ένα που περιέχει και τις τρεις καμπύλες. Έτσι, έχουμε συνολικά 4 διαγράμματα σε κάθε φύλλο. Συνολικά έχουμε 8 τέτοια φύλλα, άρα συνολικά 32 διαγράμματα.

Συνολικά λοιπόν, έστω ότι εκτελέσαμε ένα πείραμα το οποίο έχει **5 σ.λειτουργίας**, τότε θα δημιουργηθούν **$108 \cdot (5+1) + 32 = 680$ διαγράμματα**. Ο χρόνος που χρειάζεται ο κώδικας ώστε να δημιουργηθεί μια τέτοια ποσότητα διαγραμμάτων είναι 2 λεπτά. Ένα άλλο παράδειγμα είναι για **15 σ.λειτουργίας**, όπου συνολικά δημιουργούνται **1760 διαγράμματα** μέσα σε 6 λεπτά. Ας αναλογιστούμε όμως ότι η δημιουργία τόσων διαγραμμάτων χειροκίνητα θα κόστιζε πολύ περισσότερο χρόνο.

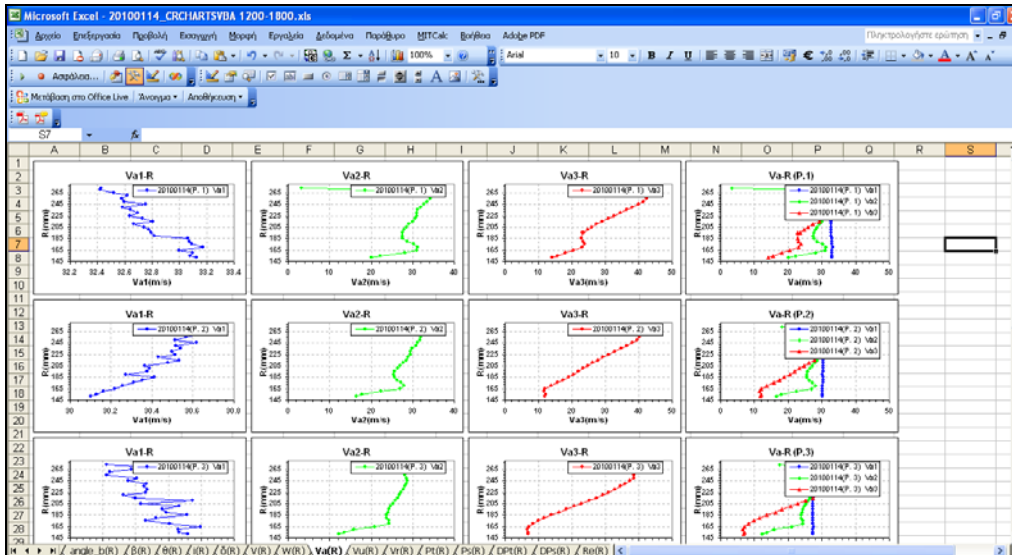
Ο κώδικας CRCHART αναγνωρίζει από τα δεδομένα εισόδου τον αριθμό των σ.λειτουργίας και τον αριθμό των ακτινικών μετρήσεων σε κάθε σάρωση, με αποτέλεσμα να δημιουργεί τον κατάλληλο αριθμό διαγραμμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες εικόνες του αρχείου CRCHARTSVBA.xls.

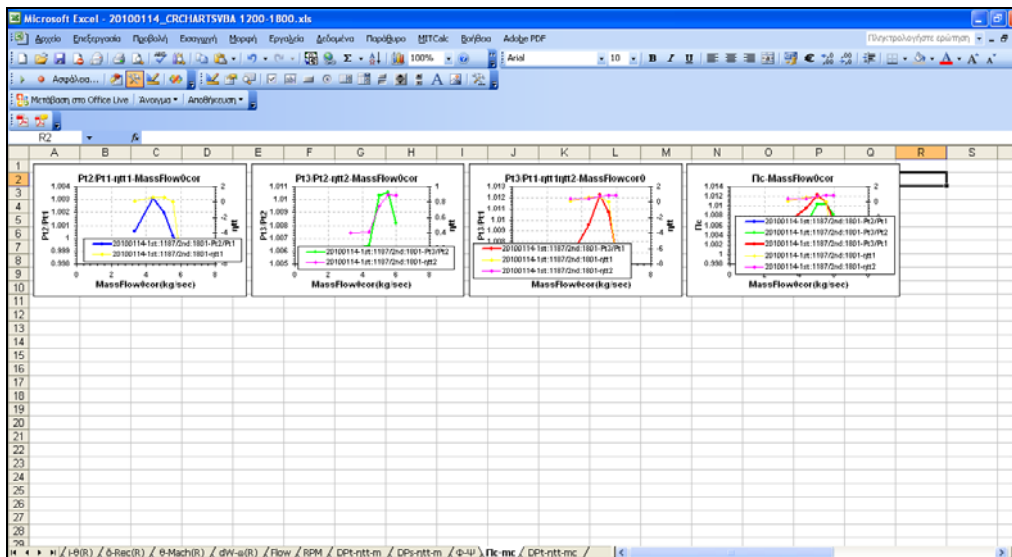
Το διάγραμμα ροής του κώδικα CRCHART παρουσιάζεται στο παράρτημα Π3.2.



Σχήμα 4.10: 1ο φύλλο αρχείου CRCHARTSVBA.xls .



Σχήμα 4.11: Φύλλο αρχείου CRCHARTSVBA.xls ακτινικού προφίλ μεγέθους.



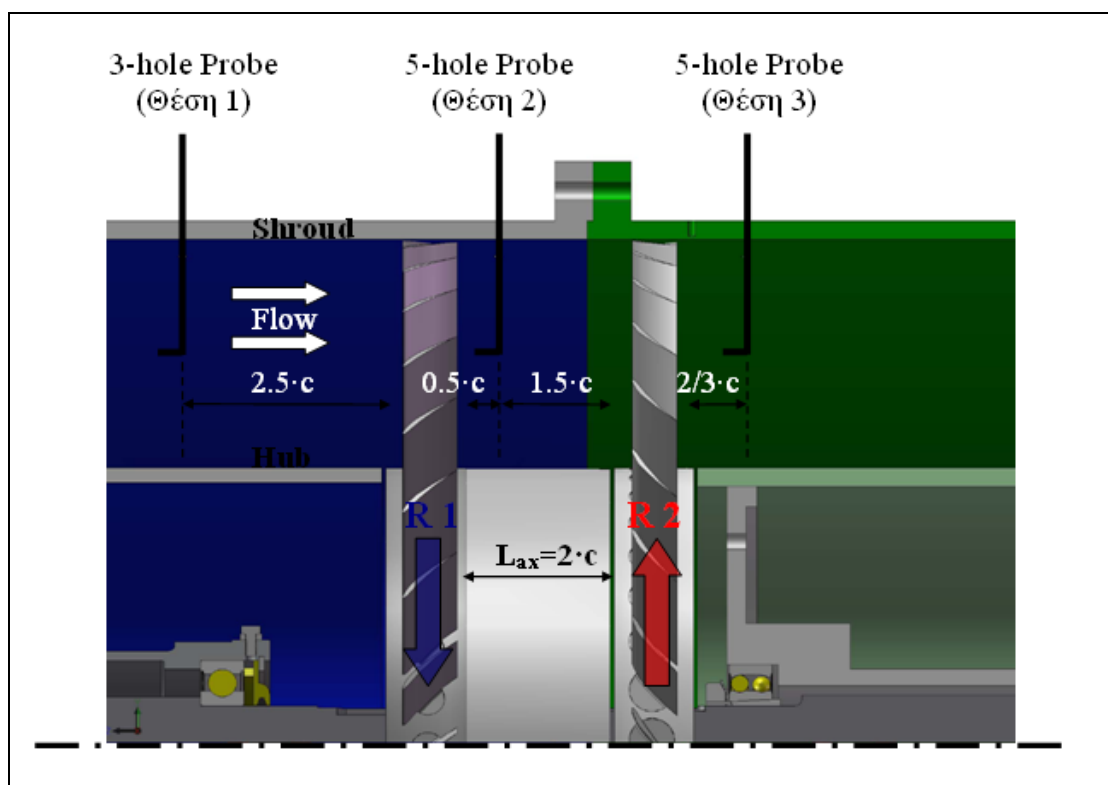
Σχήμα 4.12: Φύλλο αρχείου CRCHARTSVBA.xls καμπύλων λειτουργίας συμπιεστή.

4.4 Διεξαγωγή των μετρήσεων.

Οι μετρήσεις που διεξήχθησαν αφορούν 1^{ov}) στον πειραματισμό για την εξομάλυνση της ροής εισόδου στον συμπιεστή και 2^{ov}) στην παραμετρική μελέτη λειτουργίας της εγκατάστασης με παραμέτρους το λόγο στροφών των περωτών και τις γωνίες κλίσεις (stagger) των περυγίων τους. Η διερεύνηση της ορθότητας των αποτελεσμάτων μας οδηγεί στην πιστοποίηση της ορθότητας και ποιότητας των μετρήσεων, με αποτέλεσμα να μπορούμε να συνεχίσουμε μελλοντικά σε περισσότερες μετρήσεις. Παράλληλα, η διερεύνηση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των πρώτων αυτών μετρήσεων που παρουσιάζοντα στο κεφάλαιο 4.5, μας οδηγεί σε μια

πρώτη επαφή με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιομορφίες της δική μας διάταξης, αλλά και σε γενικότερα συμπεράσματα για μια διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

Να σημειώσουμε ότι στη διάταξη υπάρχει η δυνατότητα να μεταβάλουμε το αξονικό διάκενο μεταξύ των πτερωτών. Στην πρώτη όμως αυτή διερεύνηση, όλες οι μετρήσεις έγιναν για αξονικό διάκενο ίσο με δύο χορδές, ήτοι $L_{ax}=2\cdot c$, όπου c η χορδή των αεροτομών. Η χορδή είναι $c\approx 39\text{mm}$, άρα το αξονικό διάκενο προκύπτει $L_{ax}=78\text{mm}$ και φαίνεται και στο σχέδιο ΔΙΑ02 1/2 του παραρτήματος Π6, αλλά και παρακάτω στο Σχήμα 4.13. Στο ίδιο σχέδιο και στο Σχήμα 4.13 φαίνονται επίσης και οι αποστάσεις των σωλήνων πίεσης από τις πτερωτές. Να επαναλάβουμε ότι ο 3-hole Probe (θέση 1) βρίσκεται σε απόσταση $2.5\cdot c$ ανάντι της 1^{ης} πτερωτής, ο 5-hole Probe 9550101 (θέση 2) βρίσκεται σε απόσταση $0.5\cdot c$ κατάντι της 1^{ης} πτερωτής και ο 5-hole Probe 9550103 (θέση 3) βρίσκεται σε απόσταση $2/3\cdot c$ κατάντι της 2^{ης} πτερωτής. Όπως γνωρίζουμε οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται τουλάχιστον σε απόσταση $1\cdot c$ επειδή η ροή σε τέτοια απόσταση είναι περισσότερο διαμορφωμένη. Όμως, όπως προαναφέραμε, οι θέσεις των σωλήνων πίεσης επιλέχθηκαν βάση των γεωμετρικών περιορισμών του κελύφους, αλλά και βάση της ανάγκης για μελλοντική μείωση του αξονικού διακένου μεταξύ των πτερωτών σε απόσταση $1\cdot c$.



Σχήμα 4.13: Αποστάσεις θέσεων μέτρησης από πτερωτές και αξονικό διάκενο.

4.4.1 Εξομάλυνση ροής εισόδου 1^{ης} πτερωτής.

Η προσπάθεια εξομάλυνσης της ροής εισόδου της πρώτης πτερωτής έγινε με διάφορες δοκιμές συνδυασμών χρήσης η μη συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth), εξομαλυντή ροής (Honeycomb) και φίλτρου ανάντι του honeycomb. Τελικά, επιλέχθηκε εκείνος ο συνδυασμός ο οποίος έδωσε το πιο κατακόρυφο και πιο ομοιόμορφο προφίλ αξονικής ταχύτητας V_a , απόλυτης γωνίας εισόδου α , γωνίας β ακτινικής συνιστώσας ταχύτητας εισόδου, και ολικής πίεσης P_t .

Οι ακτινικές σαρώσεις έγιναν με χρήση του 5-hole Probe (κωδ. : 9550103) ο οποίος τοποθετήθηκε εναλλάξ στις θέσεις 02 (έξοδος Bellmouth) και 1 (είσοδος πρώτης πτερωτής). Η απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων είναι περίπου 600mm και η ροή από τη θέση 02 έως τη θέση 1 είναι άεργη.

Σε κάθε ακτινική σάρωση πήραμε 25 σημεία ανά 5mm από τη από το εσωτερικό κέλυφος (Hub) έως το εξωτερικό κέλυφος (Shroud ή Tip) τα οποία δημιουργούν ένα κανάλι ροής ύψους 125mm.

Σε όλες τις μετρήσεις η γωνία της κεφαλής του probe ϕ_{pr} με τον άξονα συμμετρίας του συμπιεστή είναι μηδέν, άρα $\alpha = a$.

Οι σ.α.λ. των πτερωτών σε όλους τους συνδυασμούς είναι 1200 rpm για την 1^η πτερωτή και 600 rpm για τη 2^η.

Οι 12 συνδυασμοί χρήσης των συνιστωσών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2).

Περίπτωση	Bellmouth	Honeycomb/Θέση	Φίλτρο	Θέση Probe	Κωδική ονομασία περίπτωσης
Case 1	No	No	No	02	N B – N H – N F – Pr P02
Case 2	No	Yes/02	No	02	N B – Y H P02– N F – Pr P02
Case 3	Yes	No	No	02	Y B – N H – N F – Pr P02
Case 4	Yes	Yes/02	No	02	Y B – Y H P02– N F – Pr P02
Case 5	Yes	Yes/01	Yes	02	Y B – Y H P01– Y F – Pr P02
Case 6	Yes	Yes/01	No	02	Y B – Y H P01– N F – Pr P02
Case 7	Yes	No	No	01	Y B – N H – N F – Pr P01
Case 8	Yes	Yes/02	No	01	Y B – Y H P02– N F – Pr P01
Case 9	Yes	Yes/01 & 02	No	01	Y B – Y H P01&02– N F – Pr P01
Case 10	Yes	Yes/01 & 02	Yes	01	Y B – Y H P01&02– Y F – Pr P01
Case 11	Yes	Yes/01	Yes	01	Y B – Y H P01– Y F – Pr P01
Case 12	Yes	Yes/01	No	01	Y B – Y H P01– N F – Pr P01

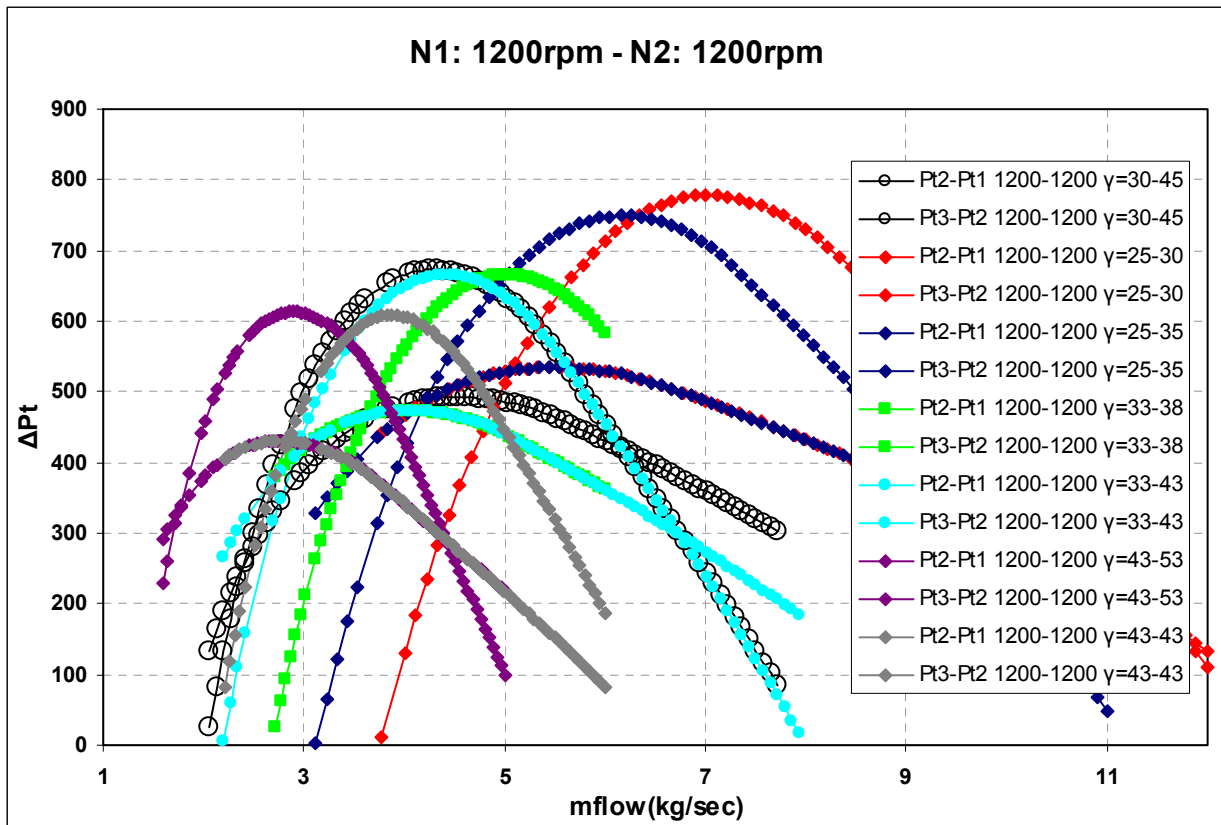
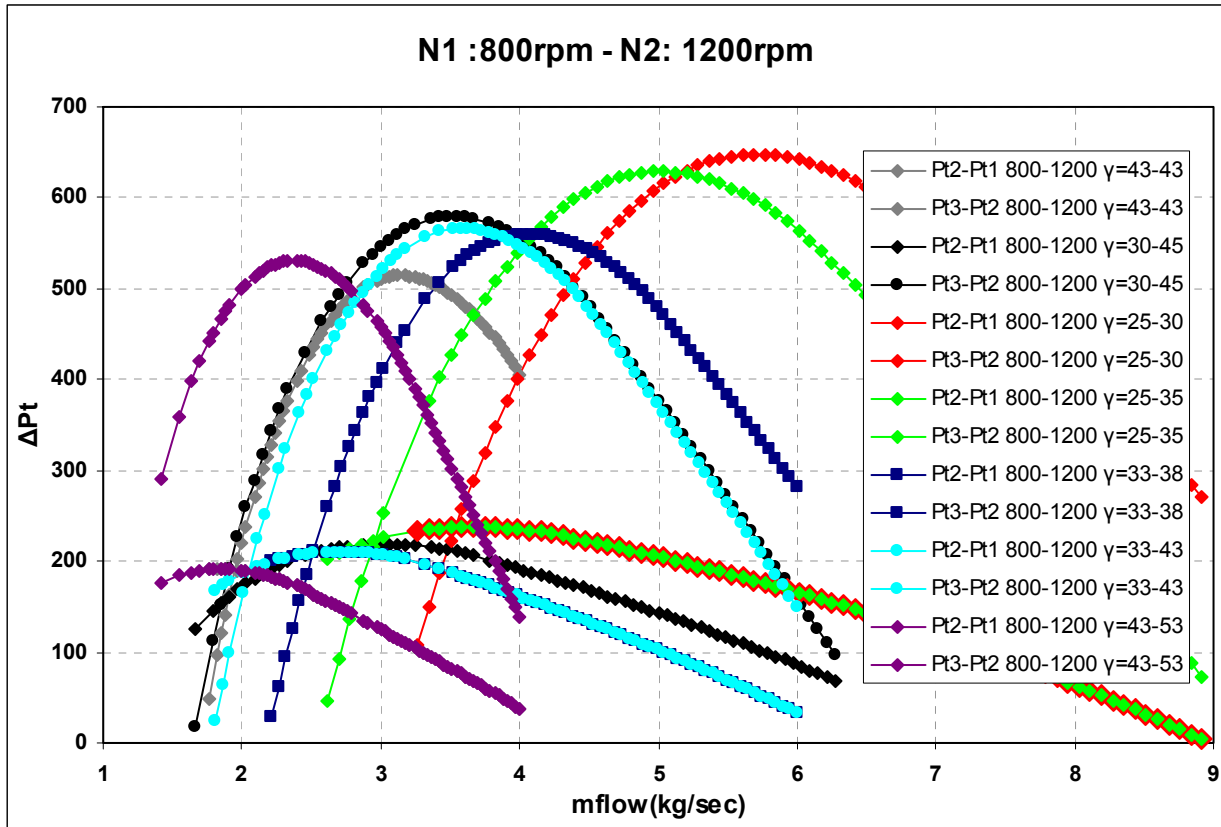
Πίνακας 4.2: Συνδυασμοί χρήσης ή μη Bellmouth, Honeycomb και φίλτρου.

4.4.2 Παραμετρική μελέτη συμπίεστή.

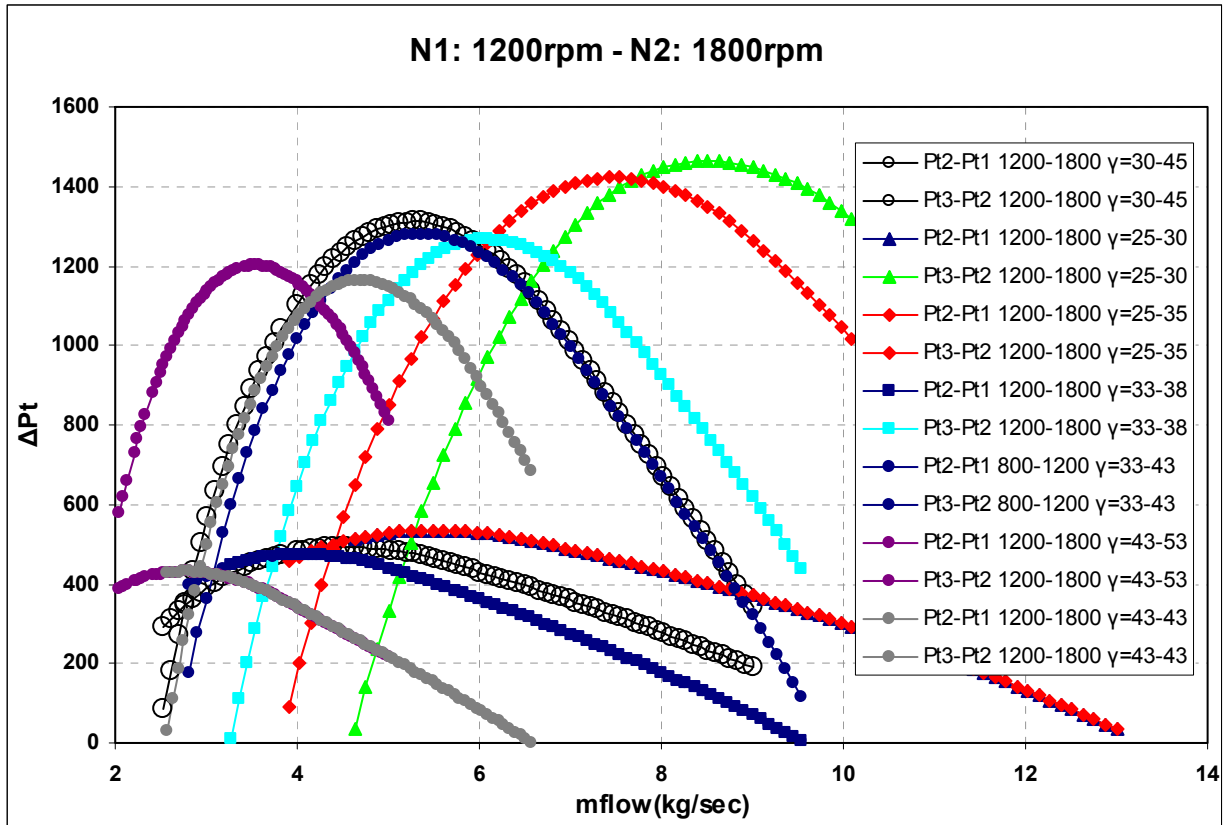
Η μελέτη της συμπεριφοράς του συμπίεστή έγινε με παραμέτρους των αριθμό σ.α.λ. των πτερωτών και των γωνιών κλίσης γ (stagger) των πτερυγίων τους. Συγκεκριμένα, έγιναν μετρήσεις για ζεύγη γωνιών κλίσης $43^\circ - 53^\circ$, $43^\circ - 43^\circ$ και $30^\circ - 43^\circ$ για τα πτερύγια της 1^{ης} και 2^{ης} πτερωτής αντίστοιχα. Για κάθε ζεύγος γωνιών κλίσης έγιναν μετρήσεις για ζεύγη σ.α.λ. 800–1200, 1200–1200 και 1200–1800 για την 1^η και 2^η πτερωτή αντίστοιχα που αντιστοιχούν σε λόγους σ.α.λ. R_U 1.5, 1 και 1.5 αντίστοιχα, όπου $R_U = N_{II}/N_I$ ο λόγος σ.α.λ.. Συνολικά λοιπόν, έγιναν 9 περιπτώσεις μετρήσεων.

Η επιλογή των ζευγαριών των σ.α.λ. αυτών βασίστηκε στο ότι η διάταξη λειτουργεί για πρώτη φορά και οι σ.α.λ. πρέπει να είναι αρχικά χαμηλές για λόγους ασφαλείας, αλλά και για λόγους οργάνωσης, δηλαδή ξεκινάμε δοκιμές από χαμηλές στροφές και σταδιακά ανεβάζουμε για εκτέλεση παρόμοιων μετρήσεων.

Η επιλογή του ζευγαριών των γωνιών κλίσης γ 43 – 53 βασίστηκε στα αποτελέσματα του θεωρητικού μονοδιάστατου μοντέλου (κώδικας BLADE) που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη διπλωματική εργασία^[20] που αφορά στην ίδια διάταξη. Το ζεύγος 43 – 43 επιλέχθηκε για μελέτη σε ίδιες γωνίες κλίσης. Το ζεύγος 30 – 43 επιλέχθηκε ώστε να αυξηθεί η παροχή, ενώ παράλληλα βασιστήκαμε σε αποτελέσματα του κώδικα blade κατά τη διερεύνηση για ταυτόχρονη αποκόλληση των πτερωτών, ώστε να μπορούμε να μετρήσουμε την πλήρη χαρακτηριστική και των δύο. Τα αποτελέσματα του κώδικα για διάφορες γωνίες κλίσης γ σε ζεύγη στροφών 800-1200, 1200-1200 και 1200-1800 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.14 σε μορφή διαγραμμάτων διαφοράς ολικής πίεσης κάθε βαθμίδας συναρτήσει της παροχής. Στα διαγράμματα αυτά είναι εμφανές ότι για ζεύγος γωνιών κλίσης 30-45 έχουμε για την ίδια σχεδόν παροχή αποκόλληση (μέγιστο καμπύλης) της ροής και για τους δύο ρότορες.



Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα κώδικα BLADE. Χαρακτηριστικές καμπύλες πτερωτών 1 και 2 για διάφορους συνδυασμούς γωνιών κλίσης γ , για ζεύγη σ.α.λ. πτερωτών στα οποία θα κάνουμε μετρήσεις.



(Σχήμα 4.14 συνέχεια): Αποτελέσματα κώδικα BLADE. Χαρακτηριστικές καμπύλες πτερωτών 1 και 2 για διάφορους συνδυασμούς γωνιών κλίσης γ , για ζεύγη σ.α.λ. πτερωτών στα οποία θα κάνουμε μετρήσεις.

Σε κάθε μέτρηση σκοπός μας είναι να μπορέσουμε να έχουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη του κάθε ρότορα ξεχωριστά, αλλά και των δύο μαζί, και παράλληλα να μπορούμε να έχουμε εποπτεία της κατανομής των τοπικών μεγεθών σε όλο το ύψος του καναλιού της ροής, δηλαδή σε κάθε ακτίνα. Για να γίνει λοιπόν αυτό, για κάθε περίπτωση μέτρησης, έγινε λήψη 5 σημείων λειτουργίας (σ.λ. συντομογραφικά), με 26 ακτινικές μετρήσεις για κάθε τραβέρσα στις θέσεις 1, 2 και 3 με χρήση των σωλήνων πίεσης. Το πρώτο σ.λ. αντιστοιχεί σε τελειώς ανοιχτή βάνα (μέγιστη παροχή) και το τελευταίο σ.λ. αντιστοιχεί σε παροχή τέτοια στη οποία σε τουλάχιστον μία πτερωτή έχουμε αποκόλληση της ροής.

Όταν σε κάποια από τις πτερωτές η ροή αποκολληθεί αυτό συνεπάγεται υψηλές γωνίες ροής και πολύ χαμηλές ταχύτητες, ακόμα και αναστροφή της ροής και έντονη μη μονιμότητα του πεδίου ροής ειδικά κοντά στα κελύφη (εσωτερικό :Hub και εξωτερικό :Shroud), με αποτέλεσμα να μην έχει νόημα η μέτρηση υπό αυτές τις συνθήκες, καθώς επίσης και για την αποφυγή καταστροφής των πτερυγίων καθώς η αποκόλληση προκαλεί ταλαντώσεις στα πτερύγια. Για το λόγο αυτό το τελευταίο σ.λ. αντιστοιχεί κάθε φορά σε παροχή αμέσως πριν την αποκόλληση. Η εκτίμηση του δε, γίνεται κάθε φορά με το σταδιακό κλείσιμο της βάνας έως ότου παρουσιασθούν τα χαρακτηριστικά της αποκόλλησης που αναφέραμε προηγουμένως. Να υπενθυμίσουμε ότι τα πραγματικά

μεγέθη ροής (ταχύτητες, γωνίες, πιέσεις κλπ) τα βλέπουμε απευθείας την ώρα της μέτρησης μέσω του προγράμματος πρόσκτησης δεδομένων, όπως έχουμε περιγράψει στο κεφάλαιο 3.10.1. Έτσι, έχουμε άμεση αίσθηση του πεδίου ροής την ώρα της μέτρησης και μπορούμε να καταλάβουμε την αποκόλληση.

Όταν λοιπόν δούμε ότι η ροή έχει αποκολληθεί, σημειώνουμε την τιμή της παροχής η οποία προκύπτει από τη διαφορά στατικών πιέσεων στο bellmouth ($P_{S_{wt01}} - P_{S_{wt02}}$) και υπολογίζεται άμεσα από το πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων. Η διαφορά της παροχής αυτής από τη παροχή για πλήρως ανοιχτή βάννα μας δίνει το εύρος της παροχής στο οποίο γίνεται η μέτρηση. Έτσι, διαιρώντας το εύρος παροχής αυτό με την τιμή ($N_{op} - 1$) όπου N_{op} είναι ο αριθμός των σ.λ., έχουμε το βήμα της παροχής με το οποίο κάνουμε λήψη των σ.λ..

Να αναφέρουμε ότι ο αριθμός των σ.λ. που λαμβάνονται πρέπει να είναι σίγουρα μεγαλύτερος από τα 5 που λάβαμε εμείς, ώστε να "πιάσουμε" την χαρακτηριστική με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης, για τον έλεγχο της επαναληψιμότητας, κάθε σ.λ. και κάθε ακτινική μέτρηση πρέπει να λαμβάνεται τουλάχιστον τρεις φορές, και όχι μία που λάβαμε εμείς. Τέλος, για μεγαλύτερη εποπτεία θα έπρεπε να γίνουν μετρήσεις για περισσότερα ζεύγη σ.α.λ. των πτερωτών και γωνιών κλίσης πτερυγίων. Παρ' όλα αυτά, λόγω της χρονοβόρου διαδικασίας των μετρήσεων, του όγκου δουλειάς και του χρονικού ορίου της διπλωματικής αυτής εργασίας, πορευτήκαμε κατά αυτόν τον τρόπο. Έτσι κι αλλιώς, η εργασία αυτή αποσκοπεί σε μια πρώτη "επαφή" με τη νέα αυτή διάταξη, η οποία μελλοντικά θα μελετηθεί αναλυτικότερα και εκτενέστερα.

Τα αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο κινούνται στους εξής άξονες :

1. Για ζεύγος σ.α.λ. 1200 – 1200 και ζεύγος γωνιών κλίσης 43 – 53 θα παρουσιάσουμε : 1^{ov}) Όλα τα ακτινικά προφίλ των τοπικών μεγεθών σε όλα τα σ.λ. ώστε να δούμε την μορφή της ακτινικής κατανομής τους και πως αυτή μεταβάλλεται με τη μείωση της παροχής. 2^{ov}) Τις χαρακτηριστικές Φ-Ψ, π_c -m και ΔP_{T-m} ώστε να διακρίνουμε τη μορφή τους και τη συσχέτισή τους με τα ακτινικά προφίλ των τοπικών μεγεθών.
2. **Επίδραση των γωνιών κλίσης γ.** Για ζεύγος σ.α.λ. 1200-1200 θα συγκρίνουμε τις χαρακτηριστικές Φ-Ψ, π_c -m και ΔP_{T-m} για τα ζεύγη γωνιών κλίσης 43°– 53°, 43°– 43° και 30°– 43°.
3. **Επίδραση του λόγου στροφών $R_U = N_{II}/N_I$ για $N_I = 1200 \text{rpm}$.** Για ζεύγος γωνιών κλίσης 43°– 53° και $N_I = 1200 \text{rpm}$ θα συγκρίνουμε τις χαρακτηριστικές Φ-Ψ, π_c -m καθώς και το λόγο πίεσης του συμπιεστή P_{B3}/P_{I1-m} για όλα τα ζεύγη γωνιών κλίσης, για λόγους στροφών R_U 1 και 1.5.
4. **Επίδραση του λόγου στροφών $R_U = N_{II}/N_I$ για $N_{II} = 1200 \text{rpm}$.** Για ζεύγος γωνιών κλίσης 43°– 53° θα συγκρίνουμε τις χαρακτηριστικές Φ-Ψ, π_c -m καθώς και το λόγο πίεσης του συμπιεστή P_{B3}/P_{I1-m} για όλα τα ζεύγη γωνιών κλίσης, για λόγους στροφών R_U 1 και 1.5.

5. **Επίδραση των στροφών για $R_U=N_{II}/N_I=1.5$.** Για ζεύγος γωνιών κλίσης $43^\circ-53^\circ$ και $R_U=1.5$ θα συγκρίνουμε τις χαρακτηριστικές $\Phi-\Psi$, π_c -m καθώς και το λόγο πίεσης του συμπιεστή P_{t3}/P_{t1} -m για όλα τα ζεύγη γωνιών κλίσης, για ζεύγη σ.α.λ. 800 – 1200 και 1200 - 1800.
6. Σύγκριση χαρακτηριστικών καμπύλων που προκύπτουν από ολικά μεγέθη με καμπύλες που προκύπτουν από μεγέθη στη μέση ακτίνα.

4.5 Αποτελέσματα μετρήσεων - Σχολιασμός.

4.5.1 Αποτελέσματα εξομάλυνσης ροής εισόδου 1^{ης} πτερωτής.

Ακτινικά προφίλ αδιάστατης ταχύτητας $V_a/V_a(R_m)$

Τα ακτινικά προφίλ της αδιάστατης ταχύτητας $V_a/V_a(R_m)$ για όλες τις περιπτώσεις του πίνακα (Πίνακας 4.2) παρουσιάζονται ξεχωριστά για κάθε περίπτωση στο Σχήμα 4.15. Τα προφίλ όλων των περιπτώσεων παρουσιάζονται μαζί στο Σχήμα 4.16.

Στο Case 1 όπου δεν χρησιμοποιούμε bellmouth ούτε honeycomb, παρατηρούμε ότι το 1/3 του καναλιού από το shroud και κάτω έχει σχεδόν μηδενικές ταχύτητες. Ουσιαστικά ο συμπιεστής δεν αναρροφά παροχή από αυτόν τον δακτύλιο. Ο λόγος είναι ότι η ροή εισέρχεται στον αγωγό εκτός από αξονικά, και περιφερειακά (λοξά) με αποτέλεσμα να αποκολλάται στα χείλη του αγωγού και να προκαλούνται ανακυκλοφορίες. Βέβαια, από το 1/3 του καναλιού και κάτω το προφίλ είναι αρκετά ομοιόμορφο.

Στο Case 2 όπου δεν χρησιμοποιούμε bellmouth αλλά χρησιμοποιούμε honeycomb στη θέση 02, παρατηρούμε ότι η ροή εισέρχεται σε όλο το ύψος του καναλιού, αλλά το προφίλ είναι ανομοιόμορφο σε όλο το ύψος του καναλιού. Αυτό συμβαίνει επειδή η ροή εισέρχεται λοξά όπως είπαμε και προηγουμένως, με αποτέλεσμα να "βουλώνει" τις κυψέλες του honeycomb σε όλο το ύψος του καναλιού.

Όπως παρατηρούμε στα ζευγάρια περιπτώσεων όπου η μόνη τους διαφορά είναι η θέση τοποθέτησης probe, τα προφίλ αλλάζουν από τη θέση 02 μέχρι τη θέση 1, καθώς η ροή δεν έχει προλάβει να διαμορφωθεί πλήρως. Βέβαια, η θέση στην οποία θέλουμε το καλύτερο προφίλ είναι η θέση 1 (ακριβώς ανάντι της 1^{ης} πτερωτής) και το καλύτερο προφίλ επιλέχθηκε από μετρήσεις σε αυτή τη θέση.

Είναι εμφανές ότι η χρήση του bellmouth είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της ομοιομορφίας της ροής εισόδου στη θέση 1, και αυτό φαίνεται από το Case 7, όπου με τη χρήση μόνο bellmouth το προφίλ βελτιώνεται αμέσως κατά πολύ. Η χρήση bellmouth και honeycomb στη θέση 02 φαίνεται να αλλοιώνει την ομοιομορφία, όπως δείχνει το Case 8. Όμως, η χρήση bellmouth και honeycomb στη θέση 01 του Case 12 φαίνεται να

δίνει καλύτερο προφίλ και από το case 7 στο οποίο δε χρησιμοποιούμε honeycomb. Έτσι, παρατηρούμε ότι η χρήση του honeycomb στη θέση 01 είναι απαραίτητη, ενώ η χρήση honeycomb και στη θέση 01 και στη θέση 02 φαίνεται ότι αλλοιώνει την ομοιομορφία.

Η χρήση φίλτρου σε όλα τα Case που χρησιμοποιούμε φίλτρο, φαίνεται πως αλλοιώνει την ομοιομορφία, και μας οδηγεί στο να απορρίψουμε τη χρήση του. Έτσι κι αλλιώς η χρήση του φίλτρου ενδείκνυται μόνο για την κατακράτηση της σκόνης και των μικρών σωματιδίων του αέρα, ώστε να διατηρηθεί καθαρό το εσωτερικό της μηχανής και να μην βουλώσουν οι οπές των probes. **Βέβαια, η μη χρήση του φίλτρου μας αναγκάζει να πραγματοποιούμε πιο συχνό καθαρισμό του συμπιεστή και των οπών των probes.**

Από όλα λοιπόν τα διαγράμματα αυτά, παρατηρούμε ότι **το πιο κατακόρυφο προφίλ το έχει η περίπτωση Case 12** στην οποία χρησιμοποιούμε bellmouth, honeycomb στη θέση 01 και δε χρησιμοποιούμε φίλτρο. Η χρήση του φίλτρου όπως φαίνεται από το διάγραμμα για την περίπτωση Case11 προκαλεί ανομοιομορφία στη ροή.

Ακτινικά προφίλ ταχύτητας V_a

Τα ακτινικά προφίλ της ταχύτητας V_a για όλες τις περιπτώσεις του πίνακα (Πίνακας 4.2) παρουσιάζονται μαζί στο Σχήμα 4.16. Εδώ, ισχύουν για τα προφίλ ακριβώς αυτά που είπαμε και προηγουμένως για τα προφίλ της αδιάστατης ταχύτητας.

Ο λόγος που παρουσιάζουμε το διάγραμμα αυτό είναι για να παρατηρήσουμε τη λογική μείωση της ταχύτητας (άρα και παροχής) που προκαλείται με τη χρήση φίλτρου μεταξύ δύο περιπτώσεων όπου διαφέρουν μόνο στη χρήση φίλτρου. Ο λόγος που η παροχή μειώνεται με τη χρήση φίλτρου είναι επειδή με τον τρόπο αυτόν μειώνεται η ενεργός διατομή του δικτύου και αυξάνονται και οι απώλειες λόγω αντιστάσεων. Αυτό συμβαίνει επίσης σε μικρότερο βέβαια βαθμό και με τη χρήση του honeycomb.

Ακτινικά προφίλ γωνιών α και β

Τα ακτινικά προφίλ των γωνιών α και β για όλες τις περιπτώσεις του πίνακα (Πίνακας 4.2) παρουσιάζονται μαζί στο Σχήμα 4.17.

Εδώ, παρατηρούμε ότι το πιο ομοιόμορφο προφίλ εμφανίζεται και πάλι στην περίπτωση Case 12. Δεν είναι βέβαια κατακόρυφο όπως τα προφίλ της ταχύτητας, αλλά βλέπουμε ότι το "παίξιμο" των γωνιών α και β για την περίπτωση Case 12 είναι πολύ μικρό, περίπου $\pm 0.5^\circ$ για την γωνία α και $\pm 1.5^\circ$ για την γωνία β . Τα προφίλ αυτά θα μπορούσαν να βελτιωθούν με τη χρήση σήτας κατάντι του honeycomb, η οποία θα ελαχιστοποιούσε τους εναπομείναντες στροβιλισμούς της ροής. Παρ' όλα αυτά, οι αποκλίσεις των γωνιών είναι πολύ μικρές. Ούτως ή άλλως δεν έχουμε απαίτηση για πολύ μικρά επίπεδα τύρβης, καθώς στους συμπιεστές το επίπεδο τύρβης της ροής εισόδου

κυμαίνεται μεταξύ 5-10%^[18], το οποίο δεν είναι μικρό ποσοστό. Βέβαια, το ποσοστό ανομοιομορφίας είναι το "παίξιμο" του ακτινικού προφίλ, ενώ το επίπεδο τύρβης είναι το "παίξιμο" της χρονοσειράς της ταχύτητας σε μια ακτινική θέση, το οποίο είναι διαφορετικό. Μπορούμε όμως να πούμε ότι μεταξύ τους υπάρχει αναλογία.

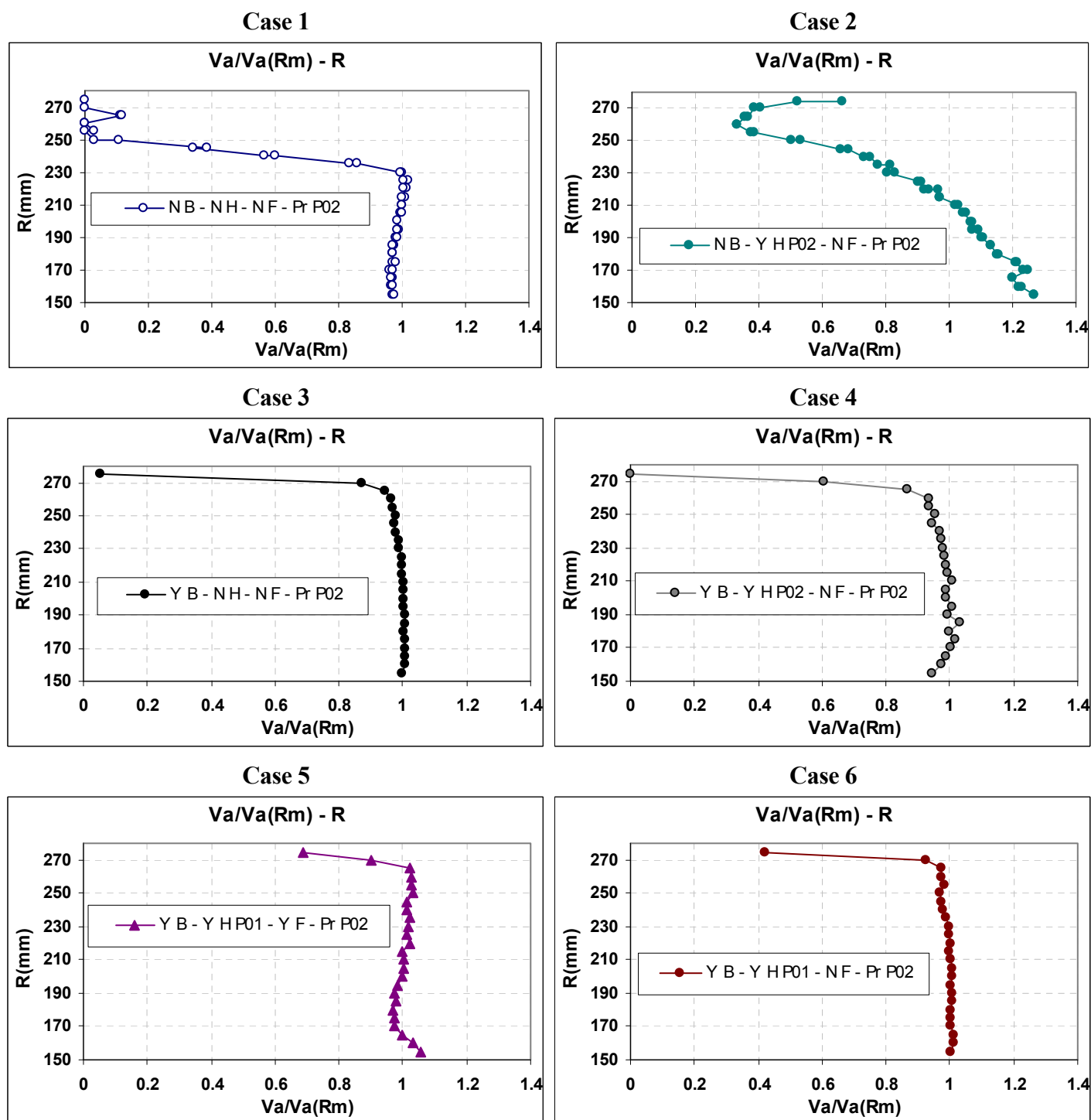
Ακτινικά προφίλ ολικής πίεσης P_t (προφανώς στη μορφή $P_t - P_{amb}$)

Τα ακτινικά προφίλ της απόλυτης πίεσης P_t για όλες τις περιπτώσεις του πίνακα (Πίνακας 4.2) παρουσιάζονται μαζί στο Σχήμα 4.18, προφανώς στη μορφή $P_t - P_{amb}$ καθώς το P_t εξαρτάται από το P_{amb} και το P_{amb} μεταβάλλεται (όχι πολύ) μεταξύ κάθε μέτρησης, δηλαδή το P_{amb} είναι μια πίεση αναφοράς.

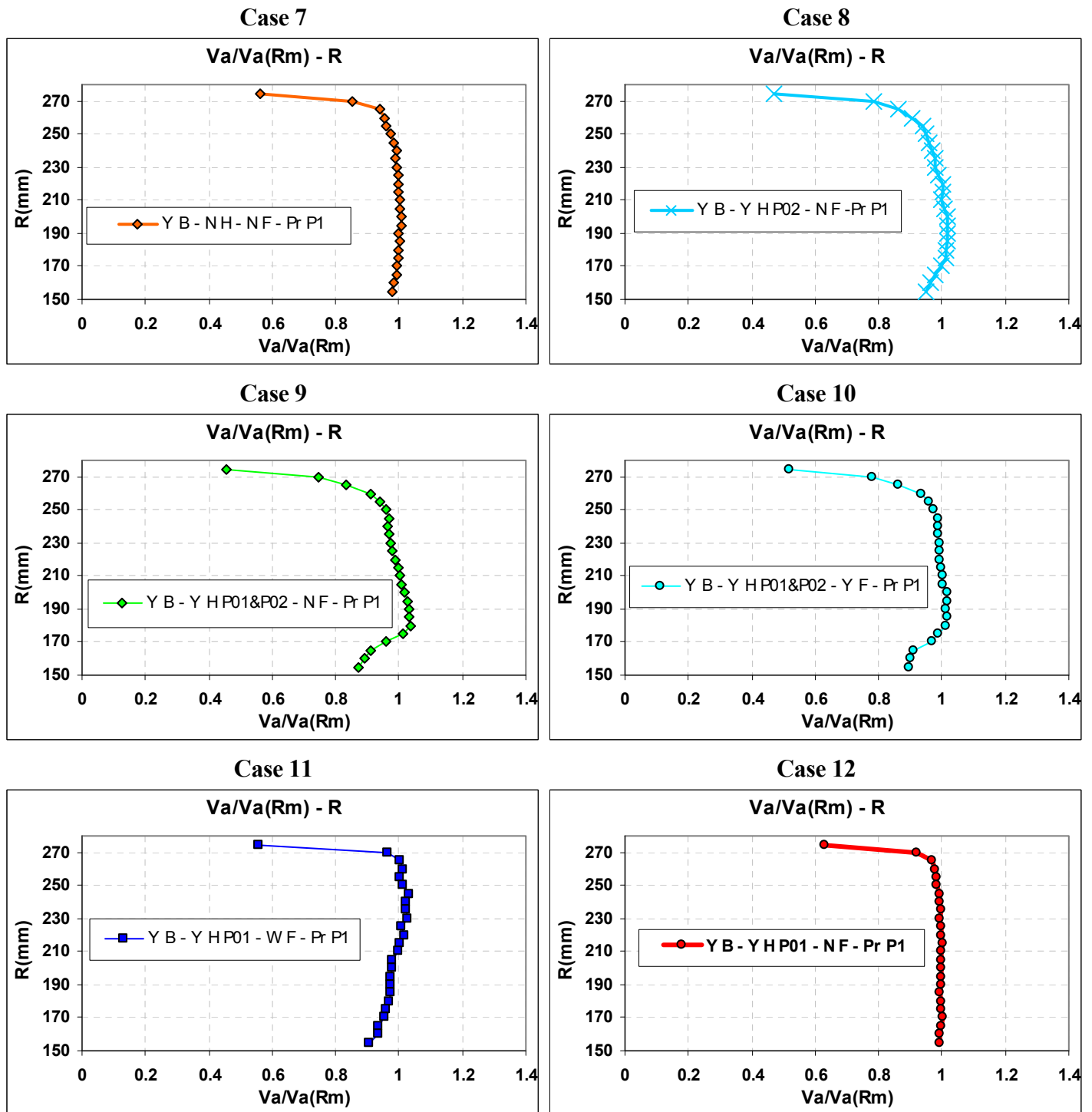
Εδώ, παρατηρούμε ότι το πιο ομοιόμορφο προφίλ εμφανίζεται και πάλι στην περίπτωση Case 12.

Παράλληλα, επιβεβαιώνονται όσα λέγαμε προηγουμένως για τις απώλειες του δικτύου λόγω φίλτρου και honeycomb. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18, η ελάχιστη απώλεια ολικής πίεσης παρατηρείται για την περίπτωση Case 7 (πορτοκαλί καμπύλη) στην οποία δεν χρησιμοποιούμε καθόλου honeycomb ούτε φίλτρο, δηλαδή καθόλου αντιστάσεις). Επίσης, παρατηρούμε ότι για τη περίπτωση Case 12 (κόκκινη καμπύλη, honeycomb θέση 1) έχουμε μικρότερες απώλειες ολικής πίεσης από την περίπτωση Case 9 στην οποία χρησιμοποιούμε honeycomb, στις θέσεις 02 και 1, και αυτή με τη σειρά της έχει μικρότερες απώλειες ολικής πίεσης από την περίπτωση Case 11 στην οποία έχουμε honeycomb και φίλτρο στη θέση 1. Παρόμοιες διαπιστώσεις ισχύουν και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

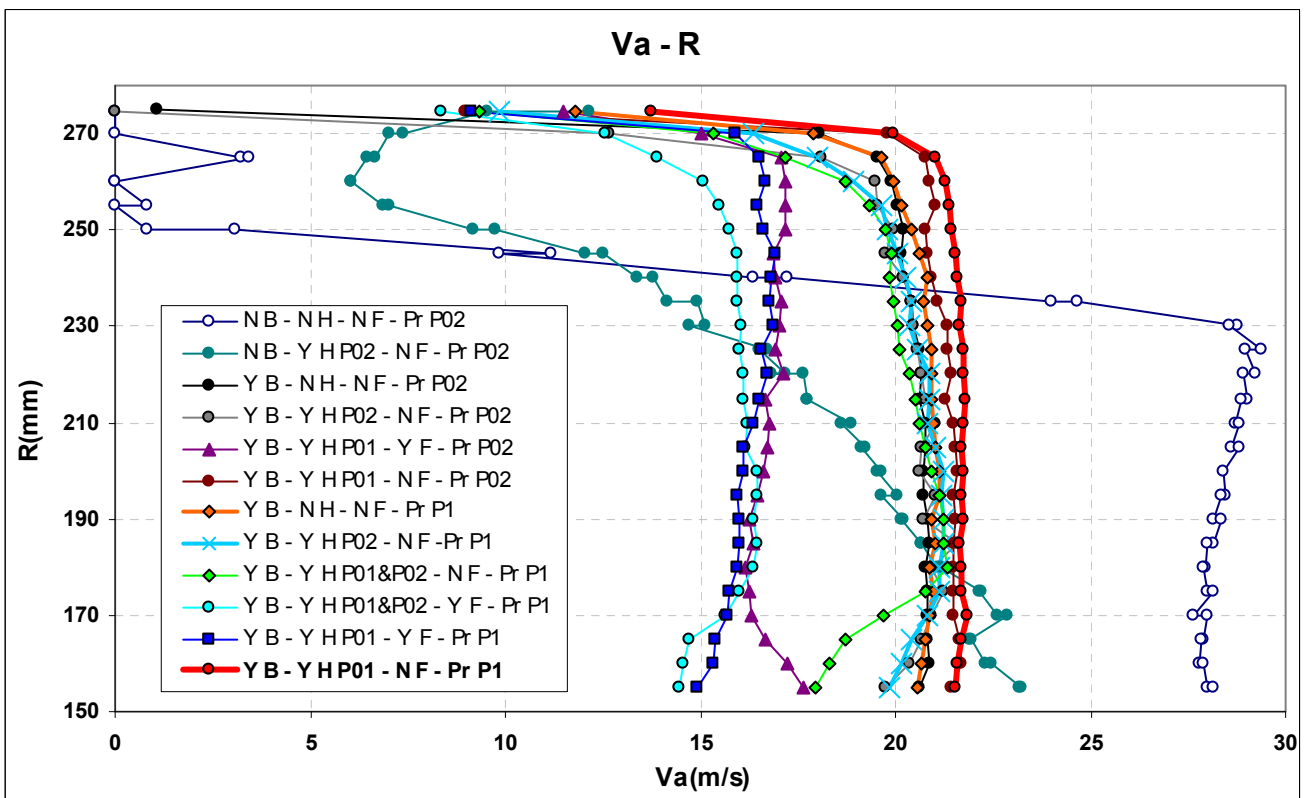
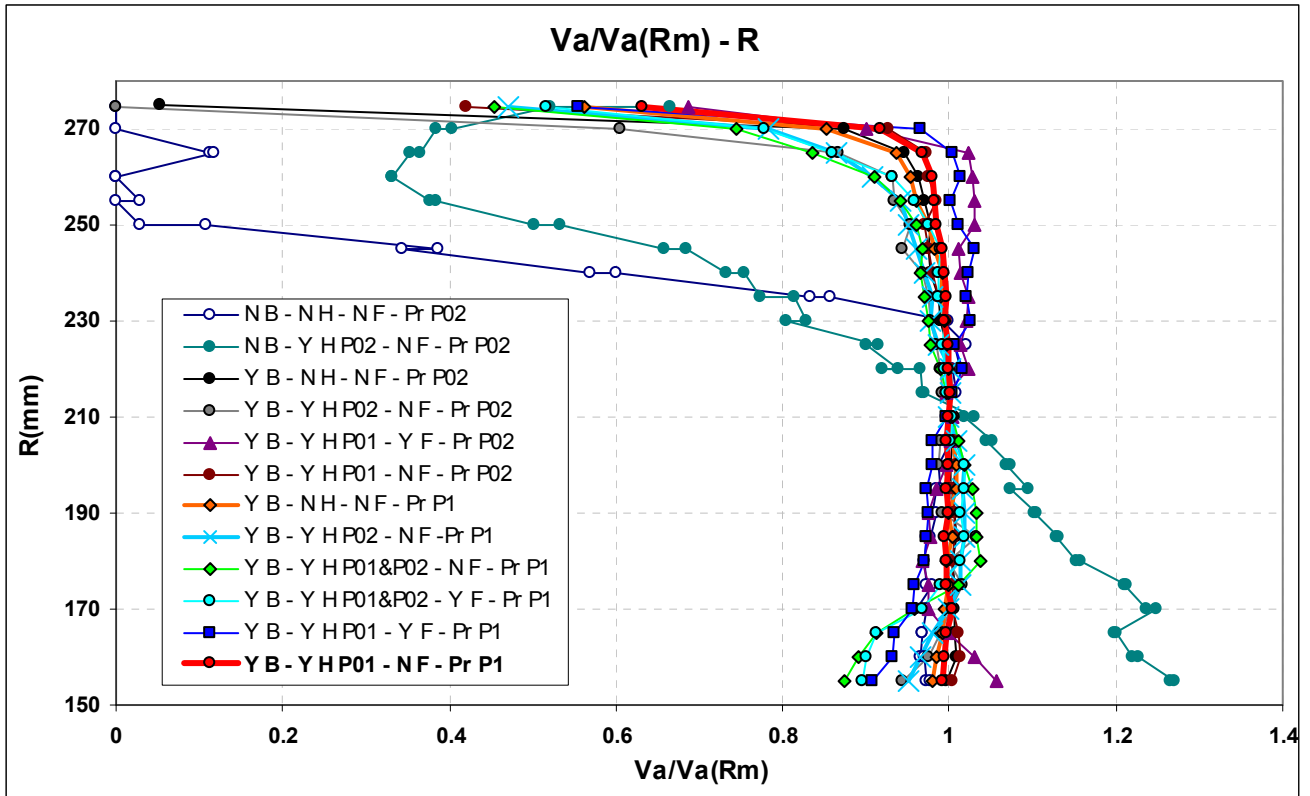
Συμπερασματικά λοιπόν, διαπιστώνουμε ότι η περίπτωση που παρουσιάζει τα καλύτερα ακτινικά προφίλ μεγεθών είναι η Case 12 (κόκκινη καμπύλη στα διαγράμματα), στην οποία χρησιμοποιούμε bellmouth και honeycomb στη θέση 01. Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις που εκτελούμε στη συνέχεια για την παραμετρική μελέτη του συμπιεστή πλέον, γίνονται με τον συνδυασμό συνιστωσών της περίπτωσης Case 12.



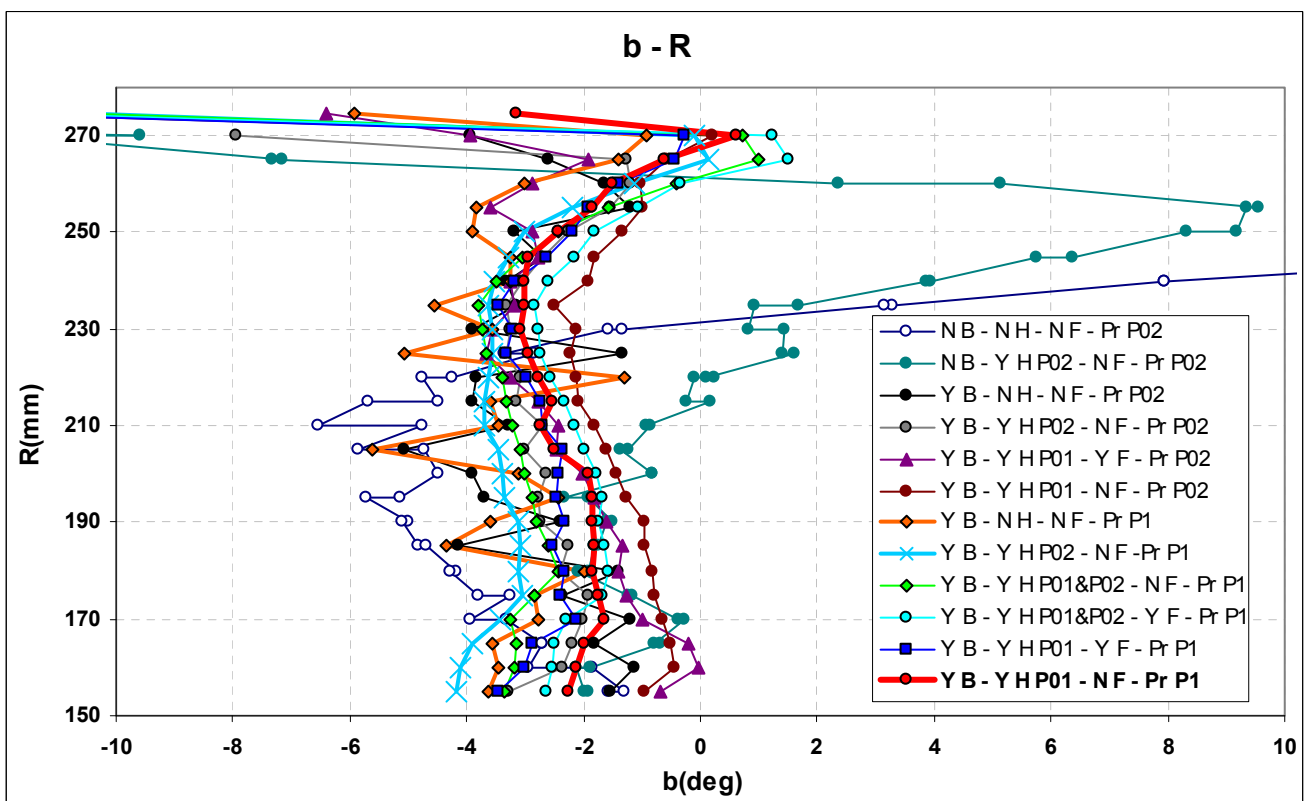
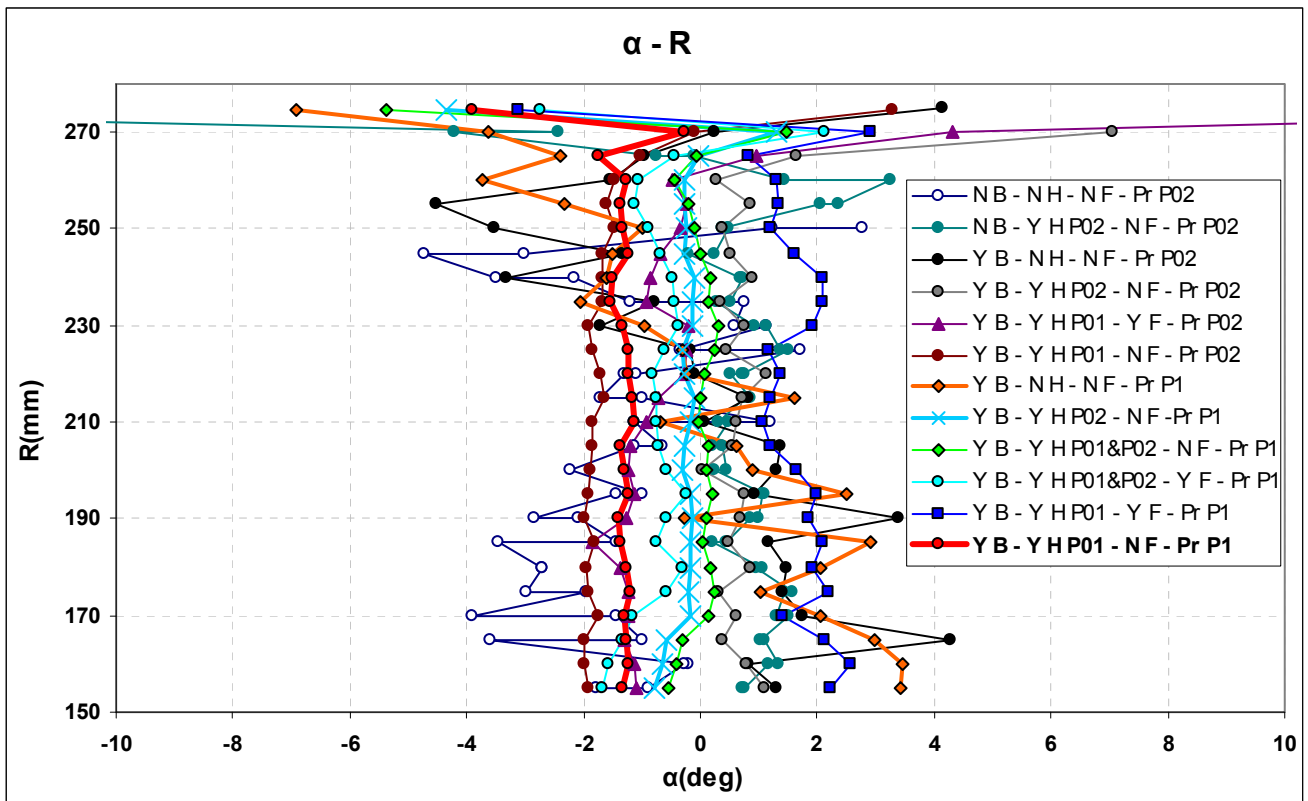
Σχήμα 4.15: Ακτινικά προφίλ αδιάστατης αξονικής ταχύτητας $V_a/V_a(R_m)$ στις θέσεις 02 και 1, για κάθε περίπτωση χρήσης ή μη Bellmouth, Honeycomb και φίλτρου.



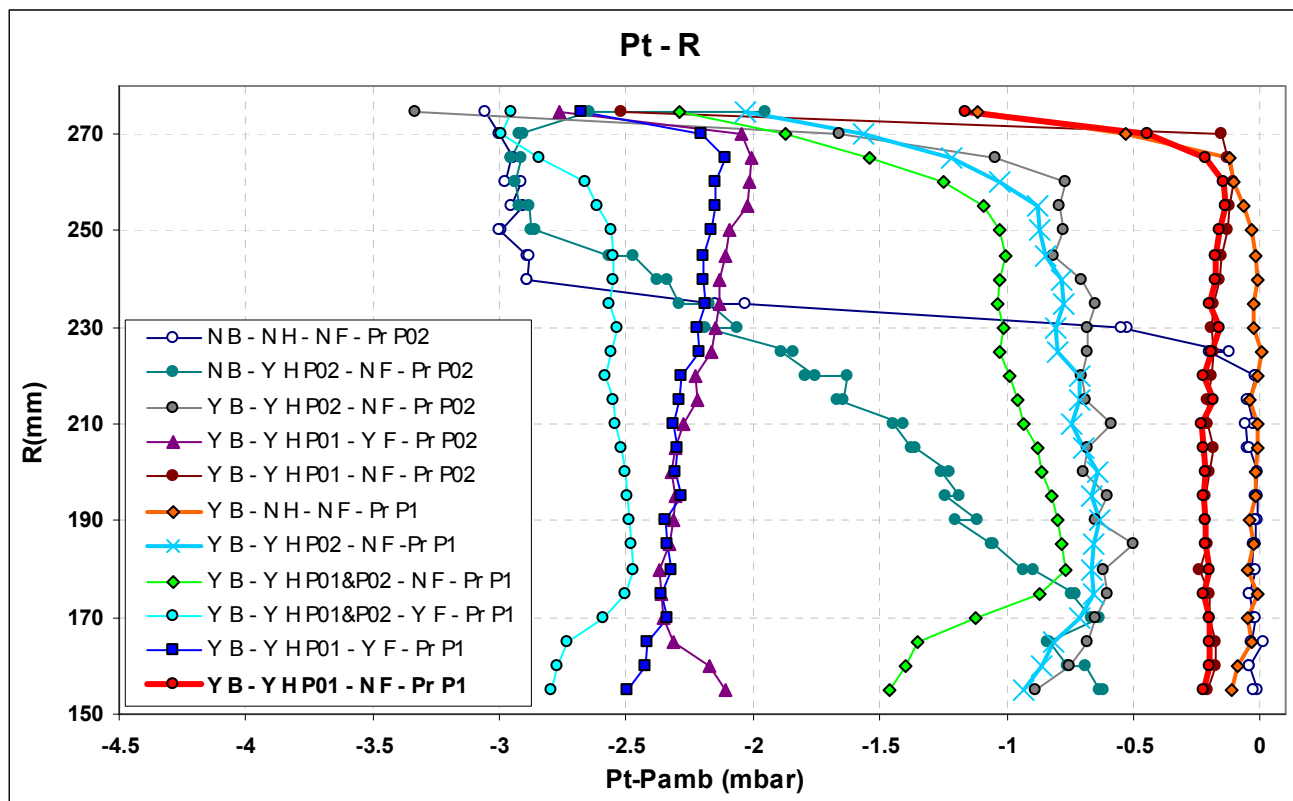
(Σχήμα 4.15 συνέχεια): Ακτινικά προφίλ αδιάστατης αξονικής ταχύτητας στις θέσεις 02 και 1, για κάθε περίπτωση χρήσης ή μη Bellmouth, Honeycomb και φίλτρου.



Σχήμα 4.16: Συγκριτικά διαγράμματα ακτινικών προφίλ αδιάστατης $V_a/V_a(R_m)$ και μη V_a αξονικής ταχύτητας στις θέσεις 02 και 1, για κάθε περίπτωση χρήσης ή μη Bellmouth, Honeycomb και φίλτρου.



Σχήμα 4.17: Συγκριτικά διαγράμματα ακτινικών προφίλ απόλυτης γωνίας α και γωνίας b (ακτινικής συνιστώσας ταχύτητας) στις θέσεις 02 και 1, για κάθε περίπτωση χρήσης ή μη Bellmouth, Honeycomb και φίλτρου.

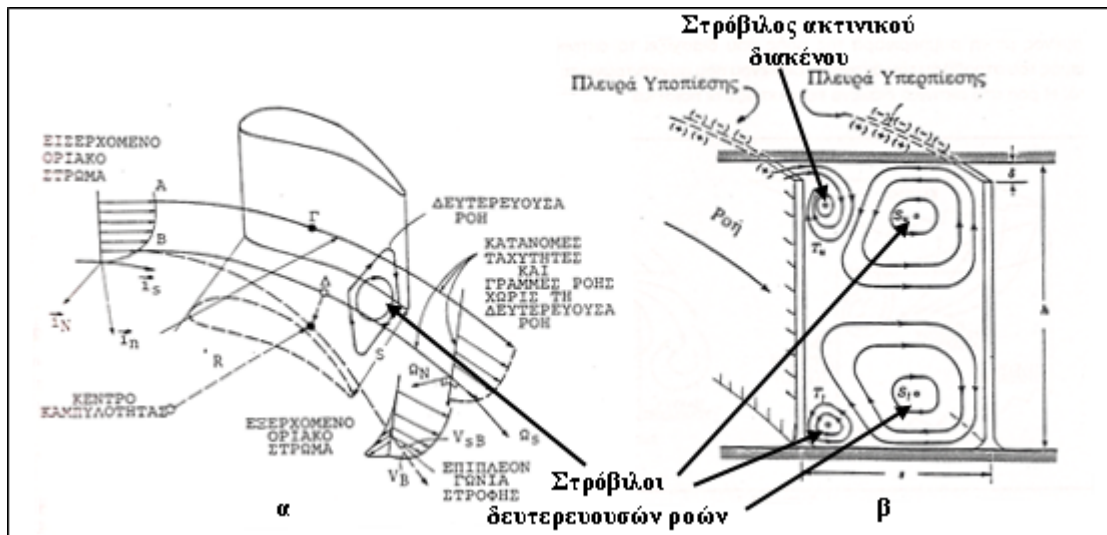


Σχήμα 4.18: Συγκριτικά διαγράμματα ακτινικών προφίλ ολικής πίεσης P_t στις θέσεις 02 και 1, για κάθε περίπτωση χρήσης ή μη Bellmouth, Honeycomb και φίλτρου.

4.5.2 Χαρτογράφηση του πεδίου ροής σε σ.α.λ. 1200-1200 και $\gamma : 43-53$.

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των ακτινικών κατανομών των μεγεθών ροής για αυτό το σετ μετρήσεων, θα αναφερθούμε στη μορφή του πεδίου ροής σε έναν ρότορα συμπίεστή, ώστε να υποψιαστούμε το λόγο για τον οποίο τα προφίλ των μεγεθών έχουν τέτοια μορφή.

Η ροή σε έναν ρότορα είναι πλήρως τρισδιάστατη και σε αυτό συνεισφέρουν ειδικότερα οι δευτερεύουσες ροές και η ροή στο ακτινικό διάκενο των πτερυγίων με το κέλυφος. Οι δευτερεύουσες ροές αποτελούν τους στροβιλισμούς που δημιουργούνται μεταξύ των πτερυγίων, λόγω της διαφοράς στη γωνία στροφής που λαμβάνουν οι γραμμές ροής μέσα στο οριακό στρώμα των τοιχωμάτων (hub και shroud), από τη γωνία στροφής των γραμμών ροής στη περιοχή έξω από το οριακό στρώμα (βλ. Σχήμα 4.19α). Η ροή στο ακτινικό διάκενο προκαλείται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ πλευράς υπερπίεσης και πλευράς υποπίεσης του κάθε πτερυγίου, και δημιουργεί τον γνωστό στρόβιλο ακροπτερυγίου (tip vortex), ή αλλιώς στρόβιλο ακτινικού διακένου για τις στροβιλομηχανές. Ο στρόβιλος ακτινικού διακένου αναμιγνύεται με τους στροβίλους των δευτερευουσών ροών και έτσι έχουμε τη διαμόρφωση της ροής στο επίπεδο πτερύγιο-σε-πτερύγιο που φαίνεται στο Σχήμα 4.19β. Αν αναλογιστούμε ότι η ταχύτητα έχει και μια αξονική συνιστώσα, τότε αντιλαμβανόμαστε το ότι η ροή είναι πλήρως τρισδιάστατη, χωρίς να ακολουθούν οι γραμμές ροής ένα συγκεκριμένο πρότυπο πάντα.



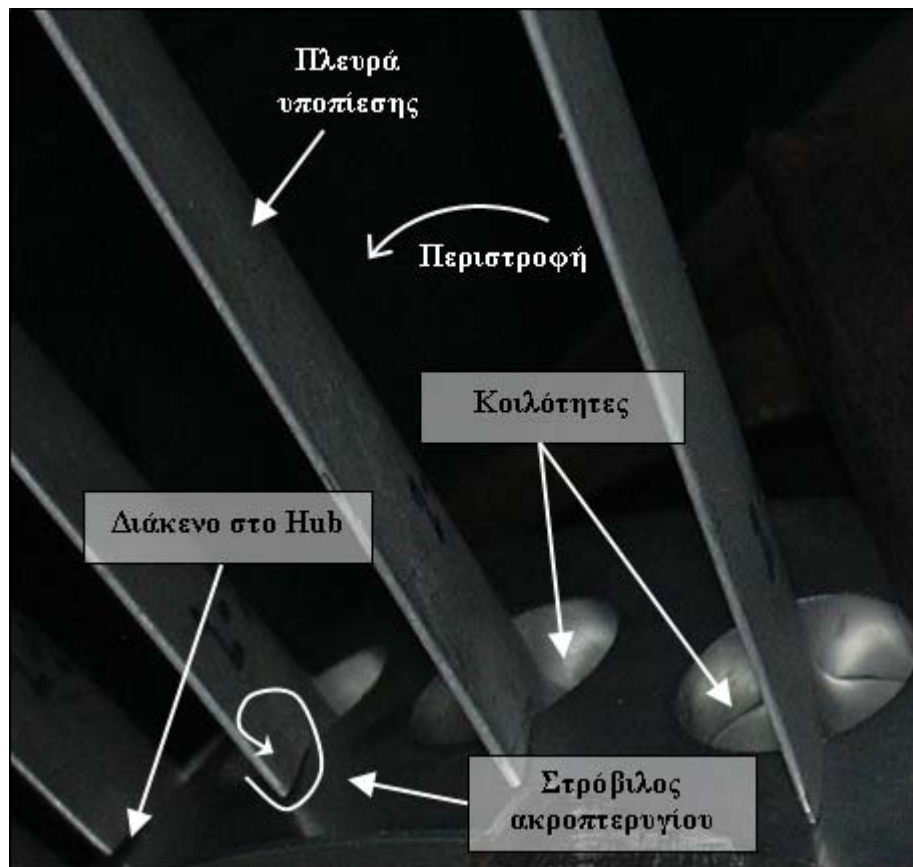
Σχήμα 4.19^[18]: Δευτερεύουσες ροές και ροή στο ακτινικό διάκενο.

Στη διάταξή μας, οι διαμορφώσεις στο πόδι (hub) των πτερυγίων αλλά και οι διαμορφώσεις των δίσκων των πτερυγίων στις θέσεις πρόσδεσης των τελευταίων, περιπλέκουν κι άλλο τα πράγματα. Το διάκενο που υπάρχει στο hub μεταξύ πτερυγίων και δίσκου είναι αιτία δημιουργίας στροβίλου ακροπτερυγίου ο οποίος έχει τη φορά που φαίνεται στο Σχήμα 4.20 και αν κοιτάξουμε και το Σχήμα 4.19β φαίνεται πως ενισχύει το

στρόβιλο της δευτερεύουσας ροής στο hub. Παράλληλα, οι κοιλότητες στη θέση πρόσδεσης των πτερυγίων στους δίσκους επηρεάζουν τη ροή με τρόπο όμως τον οποίο δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με μια απλή συλλογική. Πολύ πιθανά όμως οι κοιλότητες αυτές να είναι αιτία αποκόλλησης του οριακού στρώματος στο πόδι (hub) των πτερυγίων και του οριακού στρώματος του εσωτερικού τοιχώματος. Στη 2^η πτερωτή οι κοιλότητες αυτές είναι αρκετά μικρότερου βάθους και ο λογικός συνειρμός είναι ότι θα επηρεάζουν λιγότερο τη ροή εκεί.

Έτσι λοιπόν, εάν η ροή στο hub της 1^{ης} πτερωτής αποκολληθεί και δεν επανακολληθεί σε κάποια απόσταση κατάντι, τότε ο ομόρους θα επηρεάσει αρνητικά την είσοδο της 2^{ης} πτερωτής με αποτέλεσμα η τελευταία να υπολειπεται για ένα σημαντικό ύψος του καναλιού ροής.

Παράλληλα, ο αποστάτης των πτερωτών είναι συνδεδεμένος στον δίσκο της 1^{ης} πτερωτής και συνεπώς περιστρέφεται μαζί της. Έτσι, το οριακό στρώμα στο εσωτερικό τοίχωμα μεταξύ των πτερωτών περιστρέφεται, προσδίδοντας με αυτόν τον τρόπο μια επιπλέον περιστροφή (swirl) της ροής – τουλάχιστον κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα – η οποία αυξάνει παραπάνω (κατά απόλυτη τιμή) την απόλυτη γωνία εισόδου της ροής στον 2^ο ρότορα.



Σχήμα 4.20: Διαμορφώσεις 1^{ης} πτερωτής στο πόδι (hub) που επηρεάζουν τη ροή.

I. Αποτελέσματα από μετρήσεις στην είσοδο του 1^{ου} ρότορα (Θέση 1).

Γωνία α_1 και περιφερειακή συνιστώσα V_{u1} απόλυτης ταχύτητας (Σχήμα 4.22).

Η γωνία εισόδου α_1 στην πρώτη πτερωτή παρατηρούμε ότι παρουσιάζει ομοιόμορφο προφίλ και μικρή διασπορά για κάθε σ.λ. ($\pm 0.5^\circ$) και αυτό οφείλεται στη εξομάλυνση της ροής που προκαλεί ο αγωγός εισόδου (Bellmouth) και το honeycomb. Όσο ελαττώνουμε την παροχή (από σημείο P.1 προς P.5) παρατηρούμε ότι το προφίλ της γωνίας α_1 μετατοπίζεται προς αρνητικές τιμές. **Αυτό οφείλεται στην επίδραση που έχει η ροή στα κατόντι, στη ροή στα ανάντι, λόγω της ελλειπτικότητας του πεδίου ροής.**

Τα προφίλ της V_{u1} έχουν μορφή παρόμοια με αυτή των προφίλ της γωνίας α_1 και αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η V_u προκύπτει από την α και την V_a η οποία στη θέση 1 μένει σταθερή ακτινικά για το ίδιο σ.λ..

Απόλυτη ταχύτητα V_1 και η αξονική συνιστώσα της V_{a1} (Σχήμα 4.23).

Τα προφίλ των ταχυτήτων V_1 και V_{a1} παρατηρούμε ότι είναι ομοιόμορφα λόγω της εξομαλυσμένης ροής στην είσοδο. Επίσης, είναι σχεδόν ταυτόσημα και αυτό είναι λογικό αφού οι γωνία α_1 είναι σχεδόν σταθερή κατά την ακτίνα για κάθε σ.λ. και πολύ μικρή. Οι μειωμένες ταχύτητες κοντά στα τοιχώματα είναι λογικές και οφείλονται στο οριακό στρώμα των τοιχωμάτων. Παρατηρούμε τέλος τη λογική μετατόπιση των καμπύλων προς μικρότερες ταχύτητες με τη μείωση της παροχής.

Σχετική γωνία ροής β_1 και σχετική ταχύτητα W_1 (Σχήμα 4.24).

Τα προφίλ της γωνίας β_1 φαίνονται απόλυτα λογικά καθώς για όλες τις παροχές έχουμε γραμμική μείωση της γωνίας β_1 με μείωση της ακτίνας και αυτό οφείλεται στην γραμμική μείωση της περιφερειακής ταχύτητας και στην σταθερότητα της αξονικής ταχύτητας εισόδου V_{a1} και της γωνίας εισόδου α_1 . Επίσης, μειώνοντας την παροχή η καμπύλη μετατοπίζεται προς μεγαλύτερες (κατά απόλυτη τιμή) γωνίες το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς μειώνοντας την παροχή μειώνεται η αξονική ταχύτητα ενώ η περιφερειακή μένει σταθερή. Η γωνία β αυξάνεται (κατά απόλυτη τιμή) κοντά στα τοιχώματα αφού εκεί η V_a ελαττώνεται λόγω του οριακού στρώματος των τοιχωμάτων. Για κάθε καμπύλη, παρατηρούμε ότι οι μεταβολές της γωνίας κοντά στα τοιχώματα είναι πολύ μικρές, κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ροή **δεν** εισέρχεται με αποκολλημένο οριακό στρώμα στα τοιχώματα.

Τα προφίλ της σχετικής ταχύτητας W_1 παρουσιάζουν την αναμενόμενη μορφή με υψηλές ταχύτητες σε μεγάλες ακτίνες λόγω της υψηλής περιφερειακής ταχύτητας και της σταθερότητας της αξονικής (ακτινικά) για κάθε σ.λ.. Η μετατόπισή τους δε προς μικρότερες ταχύτητες με τη μείωση της παροχής είναι αναμενόμενη αφού η V_a μειώνεται ενώ η U μένει σταθερή.

Στατική P_{s1} , P_{s1wt} και ολική P_{t1} πίεση (Σχήμα 4.25).

Τα προφίλ της στατικής πίεσης P_{s1} παρουσιάζουν την αναμενόμενη ομοιομορφία σε όλο το ύψος του καναλιού ροής, εκτός από την αυξημένη πίεση στο κέλυφος που οφείλεται στην επιβράδυνση της ροής εκεί λόγω του οριακού στρώματος των τοιχωμάτων. Η ολική πίεση P_{t1} παρουσιάζει και αυτή την αναμενόμενη ομοιομορφία, αλλά σε αντίθεση με την στατική, έχουμε μείωση της ολικής πίεσης κοντά στα τοιχώματα, λόγω του οριακού στρώματος. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση της ολικής πίεσης είναι μικρότερη από τη μείωση της αντίστοιχης δυναμικής πίεσης.

Τα προφίλ των στατικών πιέσεων από τις οπές P_{s1wt} είναι προφανώς κατακόρυφα αφού ουσιαστικά δεν είναι συναρτήσεις της ακτίνας. Παρατηρούμε ότι η στατική πίεση από τον σωλήνα πίεσης P_{s1} κοντά στο τοίχωμα ταυτίζεται σχεδόν με τη στατική πίεση που μετράμε από τις οπές στο κέλυφος P_{s1wt} , αλλά όχι για όλα τα σ.λ.. Μάλιστα στα δύο τελευταία σ.λ. (P.4 & P.5) είναι αρκετά διαφορετικές (διαφορά 50Pa). Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει περιφερειακή ανομοιομορφία στη ροή.

Π. Αποτελέσματα από μετρήσεις στην έξοδο του 1^{ου} ρότορα (Θέση 21) και είσοδο του 2^{ου} (Θέση 22).

Γωνία α_2 και περιφερειακή συνιστώσα V_{u2} απόλυτης ταχύτητας (Σχήμα 4.26).

Το προφίλ της γωνίας εξόδου α_2 από την 1^η πτερωτή για τη μέγιστη παροχή (καμπύλη P.1) παρουσιάζει μια ταλάντωση που ξεκινά από το πόδι και αποσβένεται πηγαίνοντας σε μεγαλύτερη ακτίνα. Αυτή η "ταλάντωση" οφείλεται στους στροβίλους των δευτερευουσών ροών που αναφέραμε προηγουμένως. Παρατηρούμε όμως ότι η δραστηριότητα των στροβίλων δευτερευουσών ροών είναι πολύ πιο έντονη στο πόδι των πτερυγίων απ' ό,τι στο tip και αυτό ίσως είναι η αιτία που για μικρότερες παροχές η ροή αποκολλάται στο πόδι όπως φαίνεται και από τα προφίλ ταχύτητας που παρουσιάζονται παρακάτω, αλλά και από τα προφίλ της γωνίας α_2 στα οποία η γωνία α_2 αποκτά απαγορευτικά μεγάλες εκεί.

Τα προφίλ της περιφερειακής συνιστώσας V_{u2} έχουν μορφή παρόμοια με αυτή των προφίλ της απόλυτης γωνίας α_2 , γεγονός που είναι αναμενόμενο αφού εξαρτώνται από αυτά. Οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των καμπυλών V_u και α , έγκειται στην κλίση τους και αυτό οφείλεται στο ότι η αξονική ταχύτητα V_{a2} δεν παραμένει σταθερή καθ' ύψος των πτερυγίων, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Να διευκρινίσουμε ότι οι καμπύλες V_{u2} και α_2 αναφέρονται στη θέση 21, συνεπώς για τη θέση 22 (ανάντι του 2^{ου} ρότορα) έχουμε $V_{u22} = -V_{u2}$ και $\alpha_{22} = -\alpha_2$.

Απόλυτη ταχύτητα V_2 και η αξονική συνιστώσα της V_{a2} (Σχήμα 4.27).

Τα προφίλ των ταχυτήτων αυτών είναι όμοια και αυτό είναι λογικό αφού η αξονική ταχύτητα είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας. Στο κέλυφος παρατηρούμε μειωμένη ταχύτητα και αυτό οφείλεται στο οριακό στρώμα του κελύφους. Στο πόδι παρατηρούμε και εκεί μια κλίση της καμπύλης λόγω του οριακού στρώματος, αλλά πολύ μεγαλύτερη από ότι στο κέλυφος, και μάλιστα να έχει επίδραση σε αρκετό ύψος από το πόδι. Αυτό σημαίνει ότι στο πόδι έχουμε πολύ παχύτερο οριακό στρώμα, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Επίσης, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται ένα "γόνατο" κάτω από τη μέση ακτίνα, στα πρώτα δύο σ.λ. (P.1 και P.2). Η μορφή αυτή πιθανόν οφείλεται στους στροβίλους που δημιουργούν οι δευτερεύουσες ροές σε συνδυασμό με τα στρώματα αποκόλλησης στο πόδι λόγω των κοιλοτήτων των δίσκων και του στροβίλου ακροπτερυγίου στο πόδι.

Μειώνοντας την παροχή παρατηρούμε ότι η ταχύτητα μειώνεται σημαντικά ειδικά από τη μέση ακτίνα και κάτω. Στο τελευταίο σ.λ. παρατηρούμε ότι πρακτικά η ροή έχει αποκολληθεί στο πόδι.

Ακτινική συνιστώσα V_{r2} απόλυτης ταχύτητας και η γωνία της b_2 (Σχήμα 4.28).

Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές της b_2 παρουσιάζονται κοντά στα τοιχώματα, και ειδικότερα στο hub. Επίσης, όσο μειώνεται η παροχή η γωνία b αυξάνεται. Η "ταλάντωση" αυτή που κάνουν οι καμπύλες οφείλεται στις δευτερεύουσες ροές και οι οποίες φαίνεται να ενισχύονται στο πόδι λόγω των κοιλοτήτων στον δίσκο των πτερυγίων και του ακτινικού διακένου στο πόδι, όπως αναφέραμε πιο πάνω.

Επίσης, φαίνεται πως όσο η παροχή μειώνεται η επίδραση των δευτερευουσών ροών γίνεται εντονότερη, επιδρώντας και σε μεγαλύτερες ακτίνες.

Οι καμπύλες της V_{r2} έχουν τη μορφή των καμπυλών της γωνίας b_2 και είναι λογικό αφού προέρχονται από αυτές. Οι διαφορές τους έγκειται στην μη ακτινική σταθερότητα της απόλυτης ταχύτητας.

Στις καμπύλες αυτές είναι φανερή η ισχυρή επίδραση των δευτερευουσών ροών ειδικά κοντά στο πόδι.

Σχετική γωνία ροής β_{21} και σχετική ταχύτητα W_{21} (Σχήμα 4.29).

Τα προφίλ της γωνίας β_{21} εξόδου από τον 1^ο ρότορα, παρουσιάζουν μια λογική σταθερότητα, καθώς για "λογικές" τιμές γωνίας πρόσπτωσης τα πτερύγια επιβάλουν στη ροή σχετική γωνία εξόδου κοντά στη γωνία μετάλλου. Παρ' όλα αυτά, βλέπουμε ξανά μια "ταλάντωση" η οποία οφείλεται στην έντονη δράση των δευτερευουσών ροών, και είναι εντονότερη κοντά στο πόδι. Μειώνοντας την παροχή η γωνία β_{21} αποκτά απαγορευτικά υψηλές τιμές κοντά στο πόδι, κάτι που σημαίνει ότι η ροή έχει

αποκολληθεί σε αυτήν την περιοχή αφού πλέον το πτερύγιο δεν μπορεί να του επιβάλει τη γωνία εξόδου κοντά στη γωνία μετάλλου.

Τα προφίλ της σχετικής ταχύτητας W_{21} παρουσιάζουν λογική μορφή αν τα συνδυάσουμε με τα προφίλ της γωνίας β και της ταχύτητας V_a .

Στατική P_{s2} , P_{s2wt} και ολική P_{t2} πίεση (Σχήμα 4.30).

Τα προφίλ της στατικής πίεσης P_{s2} παρουσιάζουν ομοιομορφία σε όλο το ύψος του καναλιού ροής, εκτός από την αυξημένη πίεση στο κέλυφος που οφείλεται στην επιβράδυνση της ροής εκεί λόγω του οριακού στρώματος των τοιχωμάτων. Μειώνοντας την παροχή αποκτούν μια κλίση η οποία οφείλεται στην κλίση της ταχύτητας στα αντίστοιχα σ.λ.. Τα προφίλ της ολικής πίεσης P_{t2} παρουσιάζουν μορφή αντίστοιχη με αυτήν της απόλυτης ταχύτητας, και μας επιβεβαιώνουν την αδυναμία αύξησης της ενέργειας από το πόδι έως τη μέση ακτίνα λόγω του υψηλά διαταραγμένου πεδίου στην περιοχή αυτή. Ένας ακόμη λόγος για την εμφάνιση υψηλότερων ολικών πιέσεων κοντά στο tip είναι η ιδιαιτερότητα των πτερυγίων του 1^{ου} ρότορα, τα οποία όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, 1^{ου}) έχουν μικρή γωνία συστροφής (twist angle), που σημαίνει ότι στο tip η γωνία stagger είναι περίπου 2° μεγαλύτερη από ότι στο πόδι, άρα στο tip η γωνία πρόσπτωσης είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι κοντά στο πόδι, και 2^{ου}) το πάχος της αεροτομής στο tip είναι μεγαλύτερο από το πάχος της αεροτομής στο πόδι. Έτσι, η γωνία απόκλισης θ είναι μεγαλύτερη στο tip όπως φαίνεται παρακάτω στο διάγραμμα $\theta(R)$. Άρα, από το θεώρημα του Euler η ανύψωση ολικής ενθαλπίας (άρα και ολικής πίεσης) θα είναι μεγαλύτερη κοντά στο tip.

Τα προφίλ των στατικών πιέσεων από τις οπές P_{s2wt} παρατηρούμε ότι για όλα τα σ.λ. ταυτίζονται. Αυτό πιθανόν συμβαίνει επειδή ότι το σωληνάκι που συνδέεται στον μεταλλάκτη πίεσης είναι βουλωμένο, ή ο μεταλλάκτης έχει κάποια βλάβη.

Σχετική γωνία ροής β_{22} και σχετική ταχύτητα W_{22} (Σχήμα 4.31).

Τα προφίλ της γωνίας β_{22} εισόδου στο 2^ο ρότορα φαίνονται λογικά καθώς προκύπτουν από την ροή εξόδου του 1^{ου} ρότορα. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι μειώνοντας την παροχή και ήδη από το σ.λ. P.3 η β_{22} παίρνει απαγορευτικά μεγάλες τιμές από τη μέση ακτίνα έως το πόδι και αυτό σημαίνει ότι έχουμε αποκόλληση εκεί.

Τα προφίλ της σχετικής ταχύτητας W_{22} φαίνονται λογικά αν αναλογιστούμε την εξάρτησή τους από τη γωνία β_{22} και την αξονική ταχύτητα.

ΠΙ. Αποτελέσματα από μετρήσεις στην έξοδο του 2^{ου} ρότορα (Θέση 3).

Γωνία α_3 και περιφερειακή συνιστώσα V_{u3} απόλυτης ταχύτητας (Σχήμα 4.32).

Για τη γωνία α_3 ισχύουν αντίστοιχα της γωνίας α_2 μόνο που σε μικρότερες παροχές (καμπύλες P.4 και P5) η αποκόλληση ξεκινά από μεγαλύτερη ακτίνα και αυτό οφείλεται στο ότι η 2^η πτερωτή αναρροφά την ήδη αποκολλημένη ροή της 1^{ης} πτερωτής.

Τα προφίλ της V_{u3} είναι λογικά αν αναλογιστούμε την εξάρτησή τους από την γωνία α_3 και την αξονική ταχύτητα V_{a3} .

Απόλυτη ταχύτητα V_3 και η αξονική συνιστώσα της V_{a3} (Σχήμα 4.33).

Για την απόλυτη ταχύτητα V_3 και την αξονική συνιστώσα της V_{a3} , ισχύουν αντίστοιχα των V_2 και V_{a2} . Η διαφορά είναι ότι στη θέση 3 η μείωση της ταχύτητας ξεκινά από υψηλότερες ακτίνες για όλα τα σ.λ. και φαίνεται πως η ροή είναι αποκολλημένη για μεγαλύτερο ύψος του καναλιού ροής. Η μεγάλες ταχύτητες κοντά στο tip οφείλονται (1^{ov}) στην ιδιομορφία του πτερυγίου το οποίο έχει ανάποδη γωνία συστροφής (twist angle), αφού στο tip η γωνία stagger είναι περίπου 2° μικρότερη από ότι στο πόδι, και (2^{ov}) Το στρώμα αποκολλημένης ροής στο πόδι, στην έξοδο του 1^{ου} ρότορα, παχαίνει καθώς κατευθύνεται στον 2° ρότορα με αποτέλεσμα να δημιουργεί στένωση (blockage) σε ένα σημαντικό τμήμα του καναλιού ροής από το πόδι και πάνω.

Ακτινική συνιστώσα V_{r3} απόλυτης ταχύτητας και η γωνία της b_3 (Σχήμα 4.34).

Για την V_{r3} και b_3 ισχύουν αντίστοιχα των μεγεθών αυτών στη θέση 2.

Σχετική γωνία ροής β_3 και σχετική ταχύτητα W_3 (Σχήμα 4.35).

Τα προφίλ της γωνίας β_3 εξόδου από το 2° ρότορα φαίνονται σταθερά από το tip μέχρι τη μέση ακτίνα, ενώ από τη μέση ακτίνα έως το πόδι φαίνεται η αποκόλληση όπως περιγράψαμε προηγουμένως, αφού η σχετική γωνία εισόδου β_{22} παίρνει στο πόδι απαγορευτικά υψηλές τιμές.

Αυτό που συμπεραίνουμε είναι ότι μειώνοντας τη παροχή αποκολλάται η ροή στον 1° ρότορα σε ύψος 1/3 του καναλιού ροής από το πόδι, και αυτό οδηγεί στην αποκόλληση του μισού καναλιού ροής του 2^{ου} ρότορα. Αυτό σημαίνει ότι το στρώμα της αποκολλημένης ροής παχαίνει καθώς κινούμαστε αξονικά από τον 1° στο 2° ρότορα. Αυτό φαίνεται και παρακάτω από τα προφίλ των ταχυτήτων και ειδικά της αξονικής όπως ήδη περιγράψαμε παραπάνω.

Στατική P_{s3} , P_{s3wt} και ολική P_{t3} πίεση (Σχήμα 4.36).

Για την P_{s3} ισχύουν αντίστοιχα με αυτά που είπαμε για την P_{s2} . Η P_{t3} ακολουθά τη μορφή της V_3 για τους λόγους που περιγράψαμε. Η P_{s3wt} φαίνεται πως και εδώ διαφοροποιείται από την P_{s3} κοντά στο κέλυφος, δηλώνοντας έτσι την περιφερειακή ανομοιομορφία της ροής.

IV. Ακτινικές επιδόσεις 1^ο και 2^ο ρότορα.

Γωνίες απόκλισης ροής θ_1 , θ_2 , (Σχήμα 4.37).

Η γωνία απόκλισης του 1^ο ρότορα βλέπουμε πως είναι αρνητική κοντά στο πόδι. Αυτό σημαίνει ότι η σχετική γωνία εξόδου της ροής β_{21} παίρνει απαγορευτικά μεγάλες τιμές και δηλώνει αποκολλημένη ροή. Προσοχή, όπως έχουμε αναλύσει παραπάνω, η γωνία απόκλισης ορίζεται από τη σχέση $\theta_1 = -(\beta_1 - \beta_{21})$ αλγεβρικά. Όταν γίνει αρνητική δε σημαίνει ότι $\Delta h_t < 0$ γιατί εδώ δεν ισχύει $\Delta h_{t12} = U_1 \cdot V_a \cdot (\tan\beta_2 - \tan\beta_1)$ αφού $V_{a1} \neq V_{a2}$ σε κάθε ακτίνα, αλλά ισχύει $\Delta h_{t12} = U_1 \cdot (V_{a2} \cdot \tan\beta_2 - V_{a1} \cdot \tan\beta_1) = U_1 \cdot (V_{u2} - V_{u1})$.

Αντίστοιχα ισχύουν για το 2^ο ρότορα στον οποίο οι αρνητικές γωνίες απόκλισης ξεκινάνε από μεγαλύτερες παροχές και από μεγαλύτερη ακτίνα, λόγω της διαταραγμένης ροής που εξέρχεται από τον 1^ο ρότορα όπως προείπαμε.

Γωνίες πρόσπτωσης i_1 , i_2 , (Σχήμα 4.38).

Στο Σχήμα 4.38 παρουσιάζονται οι γωνίες πρόσπτωσης i_1 και i_2 για τον 1^ο και 2^ο ρότορα αντίστοιχα. Τα προφίλ της γωνίας πρόσπτωσης του 1^ο ρότορα είναι λογικά καθώς για μεγάλες ακτίνες έχουμε μεγαλύτερη (προσημασμένη) γωνία πρόσπτωσης για το ίδιο σ.λ., λόγω της σταθερής αξονικής ταχύτητας (ακτινικά) και της μεγαλύτερης περιφερειακής ταχύτητας. Επίσης, λογική είναι η μετατόπιση των καμπύλων προς μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης με τη μείωση της παροχής, αφού η αξονική ταχύτητα μειώνεται και η περιφερειακή μένει σταθερή (για σταθερή ακτίνα). Βέβαια, κοντά στο πόδι οι γωνίες πρόσπτωσης είναι υψηλά αρνητικές (-20°) και αυτός είναι ένας πρόσθετος λόγος που η ροή αποκολλάται εκεί.

Αντίστοιχα ισχύουν και για τα προφίλ της γωνίας πρόσπτωσης του 2^ο ρότορα, μόνο που εδώ έχουμε υπερβολική αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης από τη μέση ακτίνα έως το πόδι και οφείλεται στο διαταραγμένο πεδίο ροής που εξέρχεται από τον 1^ο ρότορα, για τους λόγους που ήδη έχουμε αναφέρει.

Και για τους δύο ρότορες τα προφίλ των γωνιών πρόσπτωσης είναι αναμενόμενο να έχουν τη μορφή των σχετικών γωνιών εισόδου β_1 και β_{22} στους ρότορες.

Γωνίες παρέκκλισης δ_1, δ_2 , (Σχήμα 4.39).

Στο Σχήμα 4.39 παρουσιάζονται οι γωνίες παρέκκλισης δ_1 και δ_2 για τον 1^ο και 2^ο ρότορα. Η μορφή των προφίλ είναι παρόμοια με αυτή των σχετικών γωνιών εξόδου β_{21} και β_3 από τους ρότορες και αυτό είναι αναμενόμενο. Παρατηρούμε και εδώ την "ταλάντωση" των προφίλ που οφείλεται στους στροβίλους των δευτερευουσών ροών. Τα προφίλ της γωνίας δ_2 για τον 2^ο παρουσιάζουν μεγάλες τιμές στη γωνία δ από τη μέση ακτίνα έως το πόδι, ειδικά όσο μειώνεται η παροχή.

Μεταβολή στατικής και ολικής πίεσης (Σχήμα 4.40 έως Σχήμα 4.42).

Η μεταβολή στατικής πίεσης παρατηρούμε ότι είναι θετική και για τους δύο ρότορες και για ολόκληρο το συμπιεστή και μάλιστα μεγαλύτερη αύξησης της στατικής πίεσης έχουμε από τη μέση ακτίνα και πάνω, ειδικά όσο μειώνεται η παροχή.

Η μεταβολή της ολικής πίεσης είναι θετική για όλο το συμπιεστή και μάλιστα μεγαλύτερη αύξηση της ολικής πίεσης (άρα και της φόρτισης) έχουμε σε μεγαλύτερες ακτίνες.

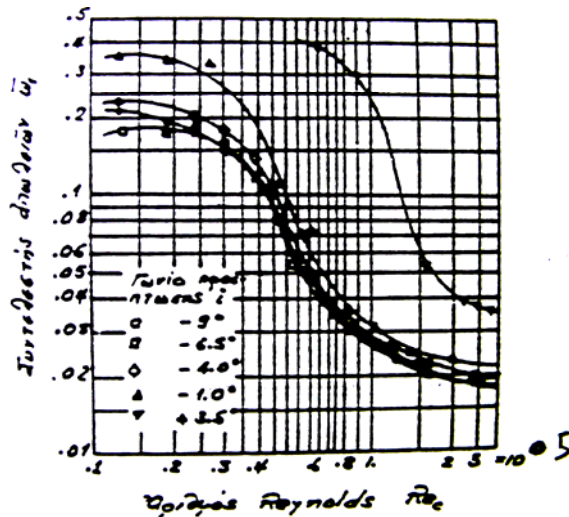
Όσον αφορά την αύξηση της ολικής πίεσης στους ρότορες, ισχύουν τα ίδια, μόνο που σε κάποιες καμπύλες έχουμε εμφάνιση αρνητικών τιμών και μάλιστα για το 2^ο ρότορα στη μέση ακτίνα. Για να αιτιολογήσουμε το γεγονός αυτό, μπορούμε να σκεφτούμε ότι έχουμε ισχυρή αποκόλληση οπότε δε έχουμε καμία απορρόφηση ενέργειας από το ρευστό, αντιθέτως έχουμε μόνο απώλειες. Όμως, αυτό αντιφάσκει γιατί αν παρατηρήσουμε τις περιφερειακές ταχύτητες, θα δούμε ότι στις θέσεις όπου $\Delta P_{23} < 0$ το $\Delta V_{u12} > 0$, πράγμα το οποίο είναι αδύνατο να συμβαίνει. Το πιο πιθανό είναι ότι λόγω του αποκολλημένου οριακού στρώματος στο πόδι, οι γραμμές ροής μεταξύ των δύο πτερωτών καμπυλώνονται, με αποτέλεσμα το κάθε μέγεθος στη θέση 2 και σε ακτίνα R_a να αντιστοιχεί στο ίδιο μέγεθος της θέσης 3 αλλά σε ακτίνα $R_b > R_a$. Έτσι, σφάλουμε με το να θεωρούμε ότι $R_b = R_a$.

Αριθμός Reynolds (Σχήμα 4.43).

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο αριθμός Reynolds κάθε ρότορα υπολογίζεται με βάση τη χορδή και την σχετική ταχύτητα εισόδου. Τα προφίλ παρουσιάζουν λογική ελάττωση του αριθμού Re_c για μείωση της ακτίνας αφού μειώνεται η περιφερειακή ταχύτητα, και ελάττωση για μείωση της παροχής αφού μειώνεται η αξονική ταχύτητα.

Γενικά, υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του αριθμού Re_c μεταξύ $2 \cdot 10^5$ και $2.5 \cdot 10^5$, που για μικρότερες τιμές οι απώλειες αυξάνονται απότομα^[16], και έχει να κάνει με τον τρόπο μετάβασης του οριακού στρώματος της κάθε αεροτομής από στρωτό σε τυρβώδες και με τη διατήρηση του τυρβώδους οριακού στρώματος στην πλευρά υποπίεσης μετά το σημείο ελάχιστης πίεσης^{[16],[18]}. Στο Σχήμα 4.21 φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή απωλειών συναρτήσει του Re_c για διάφορες πτερυγώσεις συμπιεστή.

Όπως βλέπουμε στα προφίλ ο Re_c δεν ξεπερνά τις $1.4 \cdot 10^5$, που σημαίνει ότι είναι ένας πρόσθετος λόγος σύμφωνα με τα παραπάνω να έχουμε αυξημένες απώλειες (όπως θα δούμε παρακάτω) στις πτερυγώσεις και σύντομη αποκόλληση της ροής σε χαμηλές ακτίνες όπου έχουμε Re_c περίπου $0.9 \cdot 10^5$, αν αναλογιστούμε παράλληλα και τη γωνία πρόσπτωσης που κυμαίνεται μεταξύ -20° και 0° .



Σχήμα 4.21^[16]: Συντελεστής απωλειών ω συναρτήσει του αριθμού Re_c .

Συντελεστής απωλειών ω_1, ω_2 (Σχήμα 4.44).

Ο συντελεστής απωλειών παρατηρούμε ότι εμφανίζει λογική αύξηση κοντά στα τοιχώματα λόγω του οριακού στρώματος. Όμως, στον 2^ο ρότορα έχουμε για μειωμένη παροχή μεγάλο συντελεστή απωλειών στη μέση ακτίνα, εικόνα που δε συνηθίζεται σε περιστρεφόμενες πτερυγώσεις. Όμως, έχει λογική αν αναλογιστούμε τη διαταραγμένη ροή που εισέρχεται στον 2^ο ρότορα. Παράλληλα, ειδικά στις καμπύλες του 2^{ου} ρότορα που αντιστοιχούν σε μειωμένη παροχή τα διαγράμματα μπορεί να σφάλουν, καθώς όπως προείπαμε έχουμε καμπύλωση των γραμμών ροής από τη θέση 2 στην 3.

Κάνοντας σύνδεση με τα προηγούμενα, αναμένουμε μείωση του ω (περισσότερο στη μέση ακτίνα) όταν αυξηθούν οι στροφές αφού έτσι θα αυξήσουμε το Re_c .

Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης η_{1-t}, η_{2-t} (Σχήμα 4.45).

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης παρατηρούμε ότι εμφανίζει λογική μείωση κοντά στα τοιχώματα λόγω του οριακού στρώματος. Όμως, στον 2^ο ρότορα έχουμε αρνητικό βαθμό απόδοσης στη μέση ακτίνα για μειωμένες παροχές. Αυτό προέρχεται από την αρνητική τιμή του ΔP_{12} γύρω από τη μέση ακτίνα, ενώ εκεί το $U \cdot \Delta V_{u12}$ είναι θετικό, γεγονός που όπως είπαμε αντιφάσκει με τη φυσική του προβλήματος, και οφείλεται στο ότι λανθασμένα συγκρίνουμε το μέγεθος στην ίδια ακτίνα πριν και μετά το ρότορα, αφού οι γραμμές ροής καμπυλώνονται.

Συσχέτιση λόγου επιβράδυνσης ροής W_2/W_1 με συντ. απωλειών ω (Σχήμα 4.46).

Το κριτήριο του De Haller εκφράζεται ως : $W_2/W_1 \geq 0.72$ και αφορά περισσότερο την περίπτωση ισχυρής αποκόλλησης του οριακού στρώματος στα τοιχώματα παρά στις ίδιες τις αεροτομές^[16]. Παρ' όλα αυτά, βλέπουμε και για τους δύο ρότορες ότι όταν ο λόγος επιβράδυνσης μειωθεί περαιτέρω του 0.7 ο συντελεστής απωλειών αυξάνεται απότομα, και ισχύει αυτό για το μεγαλύτερο ποσοστό του καναλιού ροής.

V. Ολικές επιδόσεις.**Παροχή μάζας στις θέσεις 1, 2, 3 και μέσω του Bellmouth (Σχήμα 4.49).**

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι οι παροχές που μετράμε από ακτινικές σαρώσεις στις θέσεις 1, 2 και 3 διαφέρουν μεταξύ τους, ειδικότερα όσο η παροχή μειώνεται. Αυτό οφείλεται στην περιφερειακή ανομοιομορφία της ροής μέσα στο συμπιεστή, η οποία ενισχύεται όσο μειώνεται η παροχή, αφού όπως είδαμε προηγουμένως παρουσιάζονται αποκολλήσεις στο πόδι των πτερυγίων.

Η καμπύλη της παροχής από μέτρηση στη θέση 1 ταυτίζεται σχεδόν με την καμπύλη από μέτρηση στατικών πιέσεων στο bellmouth. Αυτό συμβαίνει επειδή βαθμονομήσαμε την παροχή του bellmouth μέσω ακτινικών σαρώσεων στη θέση 1.

Χαρακτηριστικές αδιάστατων συντελεστών Φ , Ψ_{is} (Σχήμα 4.47).

Στα διαγράμματα αδιάστατων συντελεστών, παρατηρούμε ότι για το ίδιο σ.λ. η χαρακτηριστική του κάθε ρότορα αντιστοιχεί σε διαφορετικό συντελεστή παροχής Φ . Αυτό οφείλεται στο ότι ο συντελεστής παροχής κάθε ρότορα υπολογίζεται με χρήση της παροχής στην είσοδό του, όμως όπως είπαμε προηγουμένως η παροχή στη θέση 1 είναι διαφορετική από την παροχή στη θέση 2 λόγω περιφερειακής ανομοιομορφίας.

Στο διάγραμμα ισεντροπικού συντελεστή φόρτισης ολικών-προς-ολικές συνθήκες παρατηρούμε ότι η καμπύλη του 2^{ου} ρότορα στα πρώτα δύο σ.λ. είναι πολύ κοντά με αυτήν του 1^{ου} ρότορα, αλλά στη συνέχεια επέρχεται η αποκόλληση (στολάρισμα) του 2^{ου}. Να σημειώσουμε πως το πεδίο ροής εισόδου του 2^{ου} ρότορα θα ήταν καλύτερο αν δεν είχαμε τις αποκολλήσεις στο πόδι του 1^{ου} με αποτέλεσμα να καθυστερήσει το στολάρισμα του 2^{ου}. Τότε, οι δύο καμπύλες θα ήταν πολύ κοντά η μία στην άλλη.

Ο βαθμός απόδοσης του κάθε ρότορα φαίνεται πως αρμόζει με την χαρακτηριστική Φ - Ψ .

Χαρακτηριστικές ΔP_t , ΔP_s συναρτήσει της παροχής (Σχήμα 4.48).

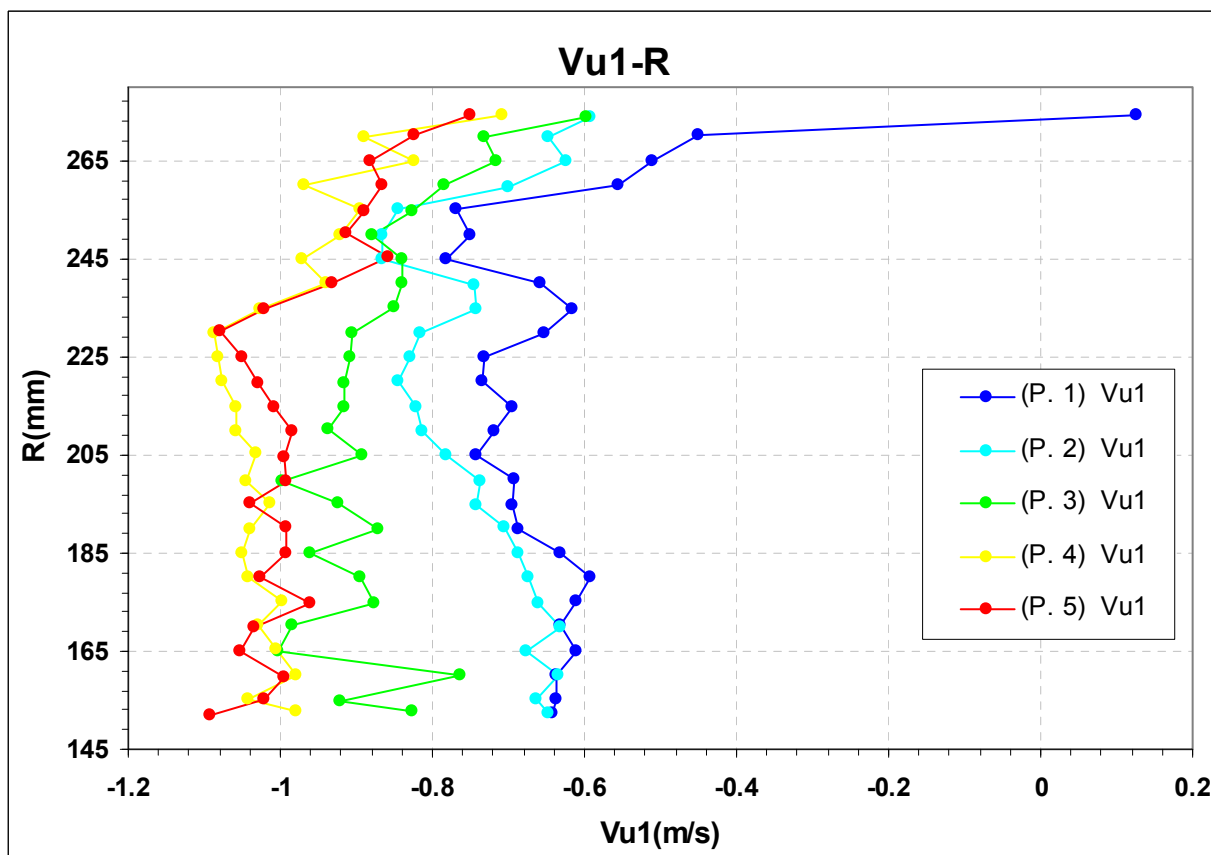
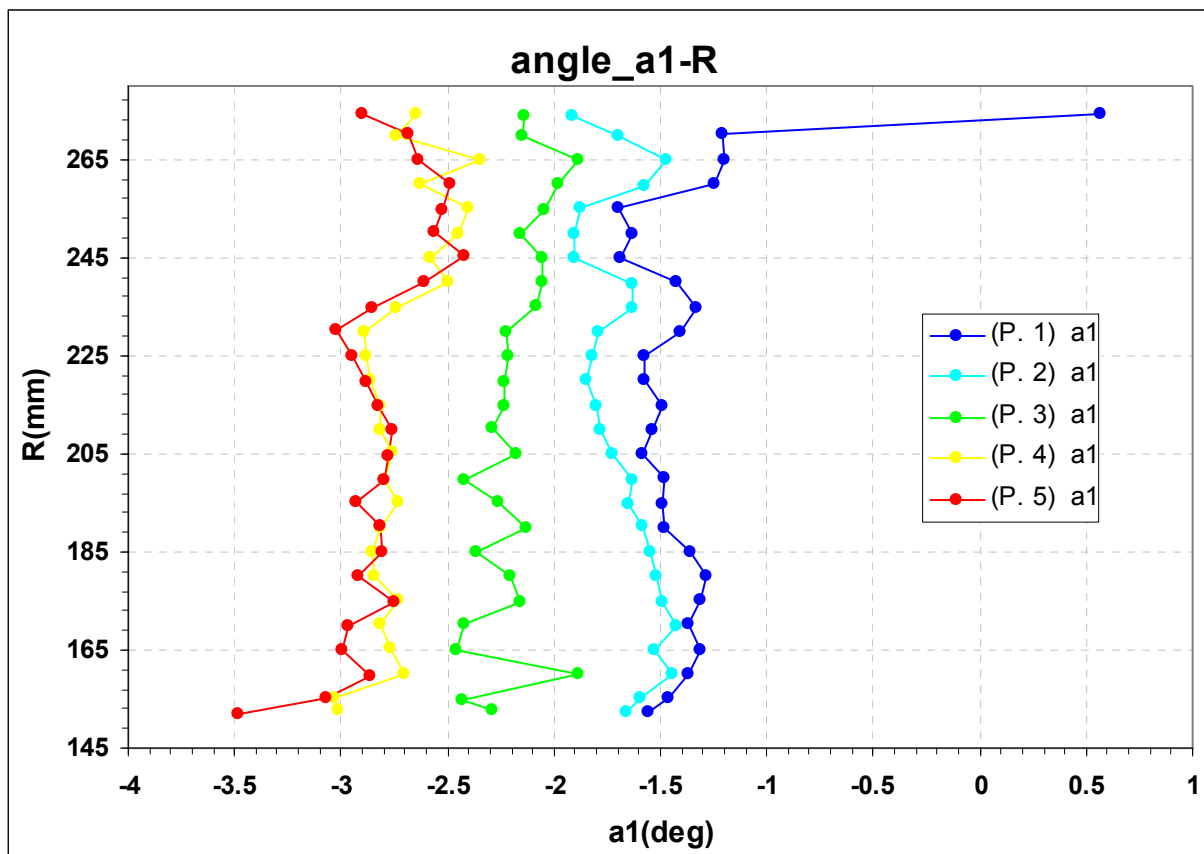
Οι χαρακτηριστικές αύξησης της ολικής πίεσης συναρτήσει της διορθωμένης παροχής για διορθωμένες στροφές, έχουν την ίδια μορφή με τις χαρακτηριστικές $\Psi_{is,t-t} - \Phi$, που είναι αναμενόμενο. Επίσης, Οι χαρακτηριστικές αύξησης της στατικής πίεσης συναρτήσει της παροχής, έχουν την ίδια μορφή με τις χαρακτηριστικές $\Psi_{is,s-s} - \Phi$, που είναι αναμενόμενο.

Οι χαρακτηριστικές αύξησης στατικής πίεσης που προκύπτουν από μετρήσεις στις οπές του κελύφους βλέπουμε ότι είναι διαφορετικές από αυτές που προκύπτουν από σαρώσεις και αυτό γίνεται κατανοητό κοιτώντας τα προφίλ στατικής πίεσης, με την περιφερειακή ανομοιομορφία να παίζει τον κύριο λόγο. Έτσι, η χρήση των στατικών πιέσεων για μέτρηση ολικών επιδόσεων των βαθμίδων κρίνεται ακατάλληλη.

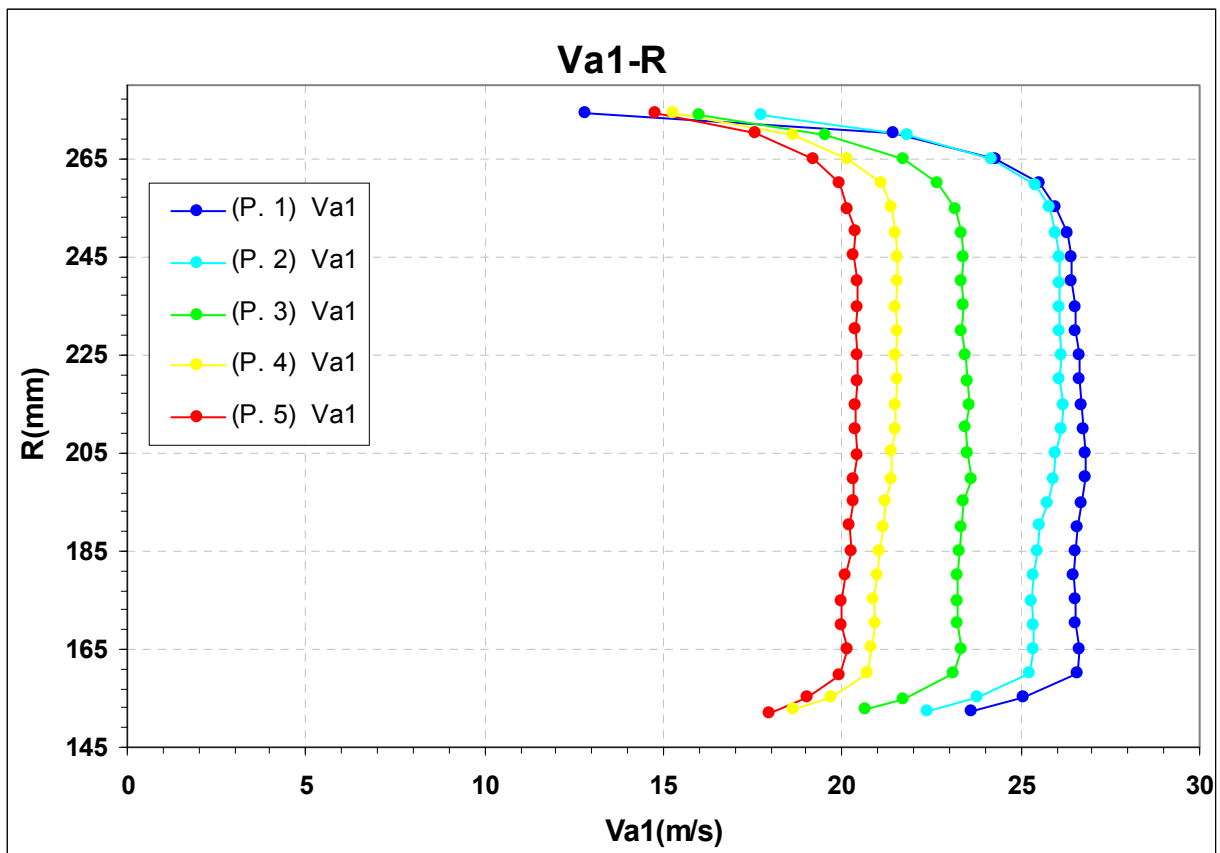
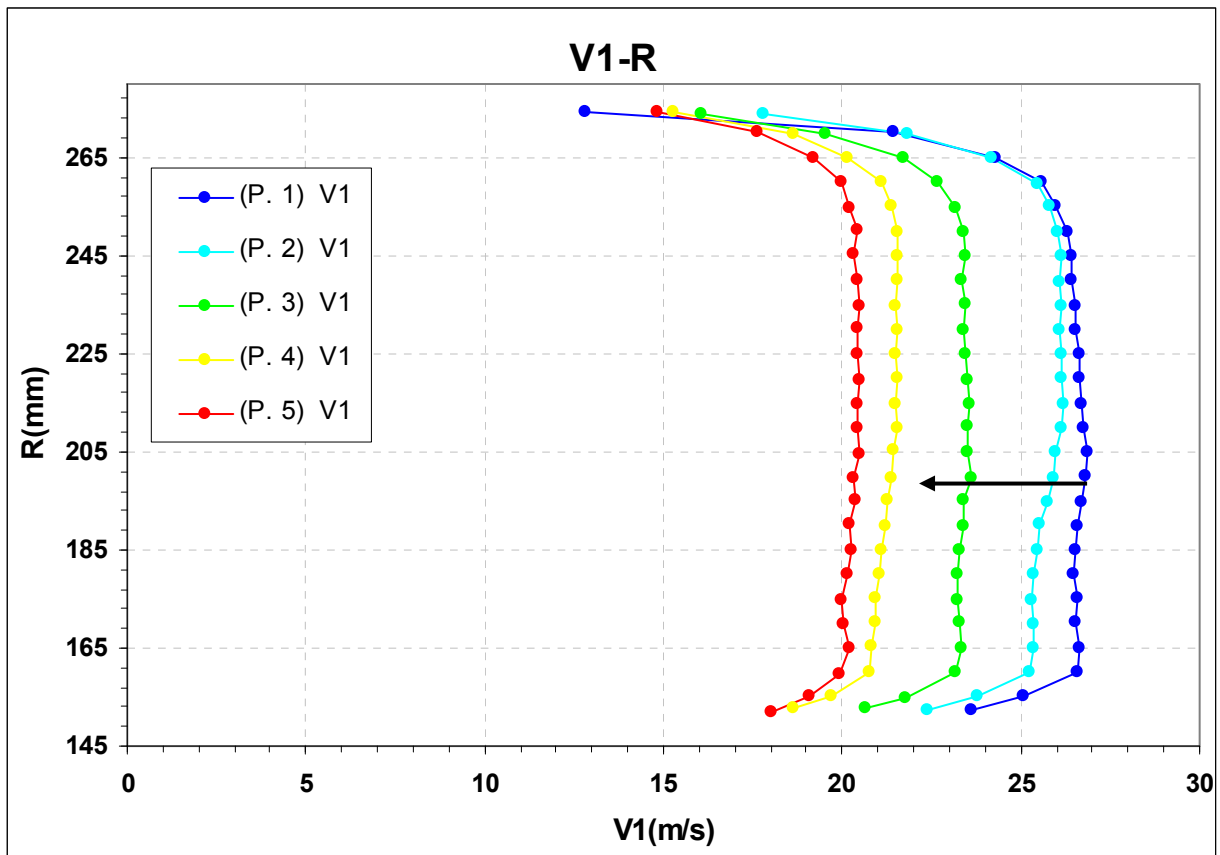
VI. Γενικά συμπεράσματα.

- Οι ίδιες μορφές των προφίλ των μεγεθών που παρουσιάσαμε παραπάνω εξακολουθούν να εμφανίζονται για διαφορετικούς λόγους στροφών και γωνίες stagger των πτερυγίων. Βελτίωση υπάρχει για μικρότερες γωνίες stagger, επειδή η γωνίες πρόσπτωσης παίρνουν μεγαλύτερες τιμές (συγκεκριμένα, λιγότερο αρνητικές). Παρ' όλα αυτά, εξακολουθεί να υπάρχει υψηλή διαταραχή του πεδίου ροής στο πόδι λόγω των ιδιομορφιών του δίσκου των πτερυγίων.
- Από την αποκόλληση στο πόδι του 1^{ου} ρότορα, αποκολλάται η ροή για μεγαλύτερο ύψος πτερυγίου του 2^{ου} ρότορα. Αυτό σημαίνει ότι το στρώμα αποκόλλησης παχαίνει μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} δημιουργώντας στένωση (blockage) και αναγκάζοντας το μεγαλύτερο ποσοστό της παροχής να περάσει από το μισό πτερύγιο του 2^{ου} ρότορα, δημιουργώντας έτσι μεγάλες αξονικές ταχύτητες κοντά στο tip του πτερυγίου.
- Οι στατικές πιέσεις από μετρήσεις στις οπές του κελύφους δεν είναι αντιπροσωπευτικές της μέσης στατικής πίεσης κάθε διατομής, αλλά ούτε και αντιπροσωπευτικές για την τιμή της στατικής πίεσης κοντά στο κέλυφος. Το γεγονός αυτό είναι ένδειξη περιφερειακής ανομοιομορφίας, η οποία διαπιστώνεται και από την διαφορά μεταξύ των παροχών που μετράμε στις θέσεις 1, 2 και 3.
- Λόγω του υψηλά διαταραγμένου πεδίου, δημιουργείται η ανάγκη για βελτίωση του ώστε να έχουμε πιο ομοιόμορφη ροή στις εξόδους των πτερυγώσεων, για να μπορούμε να συγκρίνουμε με περισσότερη σιγουριά τις ακτινικές κατανομές μεγεθών κατά την παραμετρική διερεύνηση των βαθμίδων, αλλά και τις ολικές επιδόσεις. Πρώτο μέλημα είναι κάλυψη των κοιλοτήτων των δίσκων των πτερυγίων με κάποιο υλικό που να κατεργάζεται και να αφαιρείται εύκολα, ενώ ταυτόχρονα να έχει υψηλή συγκολλητική ικανότητα ώστε να αντέχει στα υψηλά φυγόκεντρα φορτία.

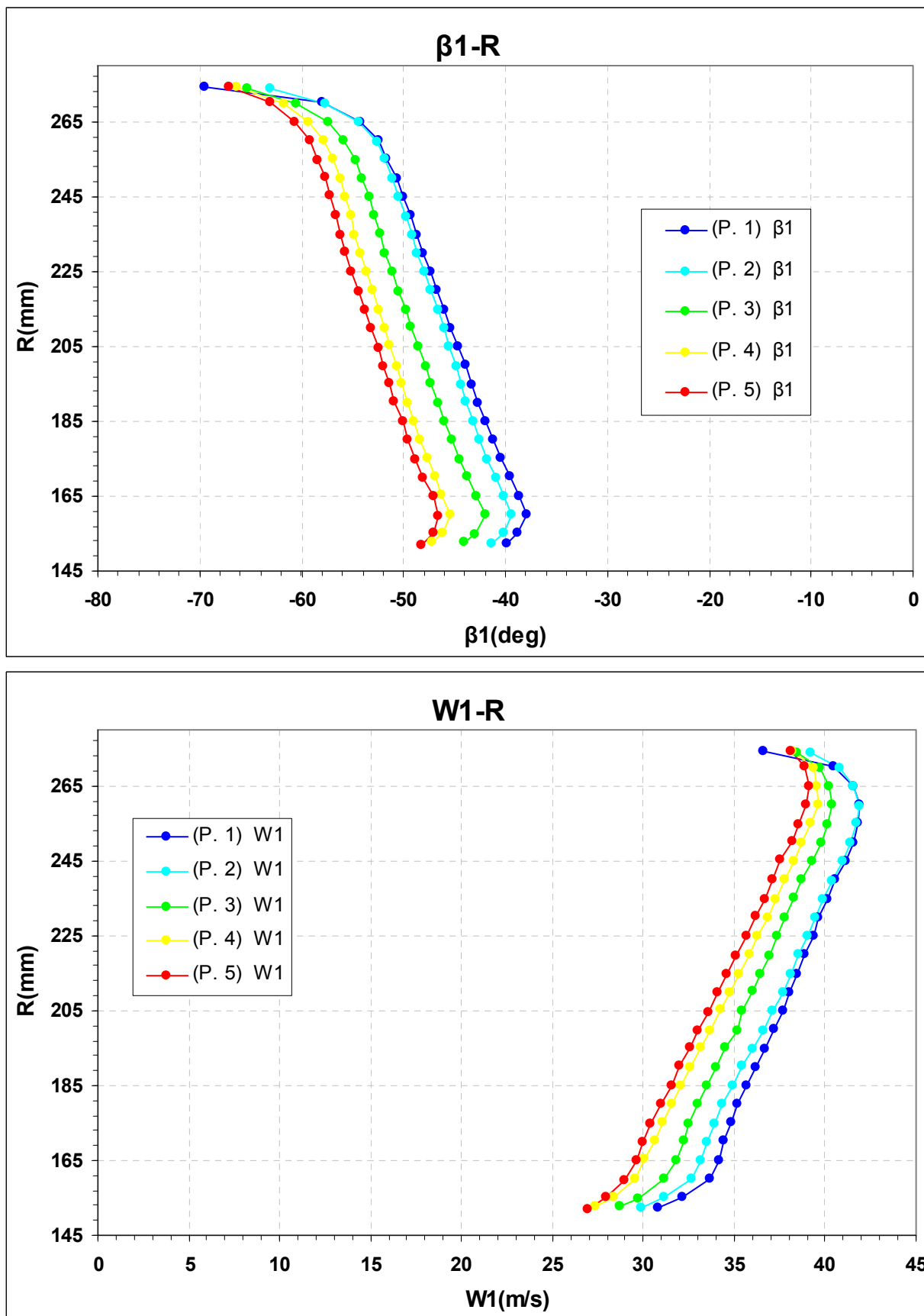
Δεύτερο μέλημα είναι ο περιορισμός της περιφερειακής ανομοιομορφίας, η οποία προέρχεται από την "ασύμμετρη" αναρρόφηση παροχής από τον αγωγό εισόδου λόγω του εμποδίου που προκαλεί στη ροή η έδραση του άξονα της 1^{ης} πτερωτής. Αυτό μπορεί να γίνει με κάλυψη της έδρασης με ένα κουτί αεροδυναμικής μορφής που να περιορίζει τους στροβιλισμούς στην είσοδο του bellmouth.



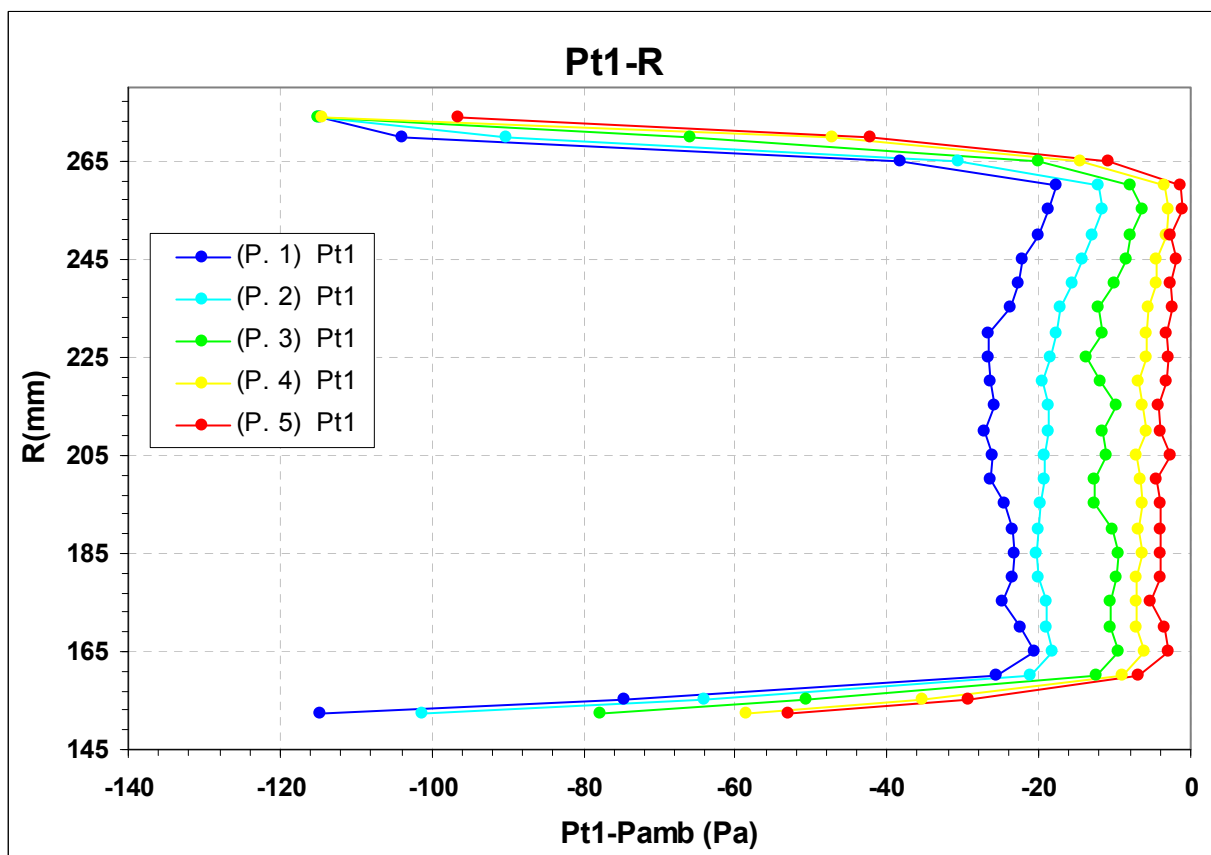
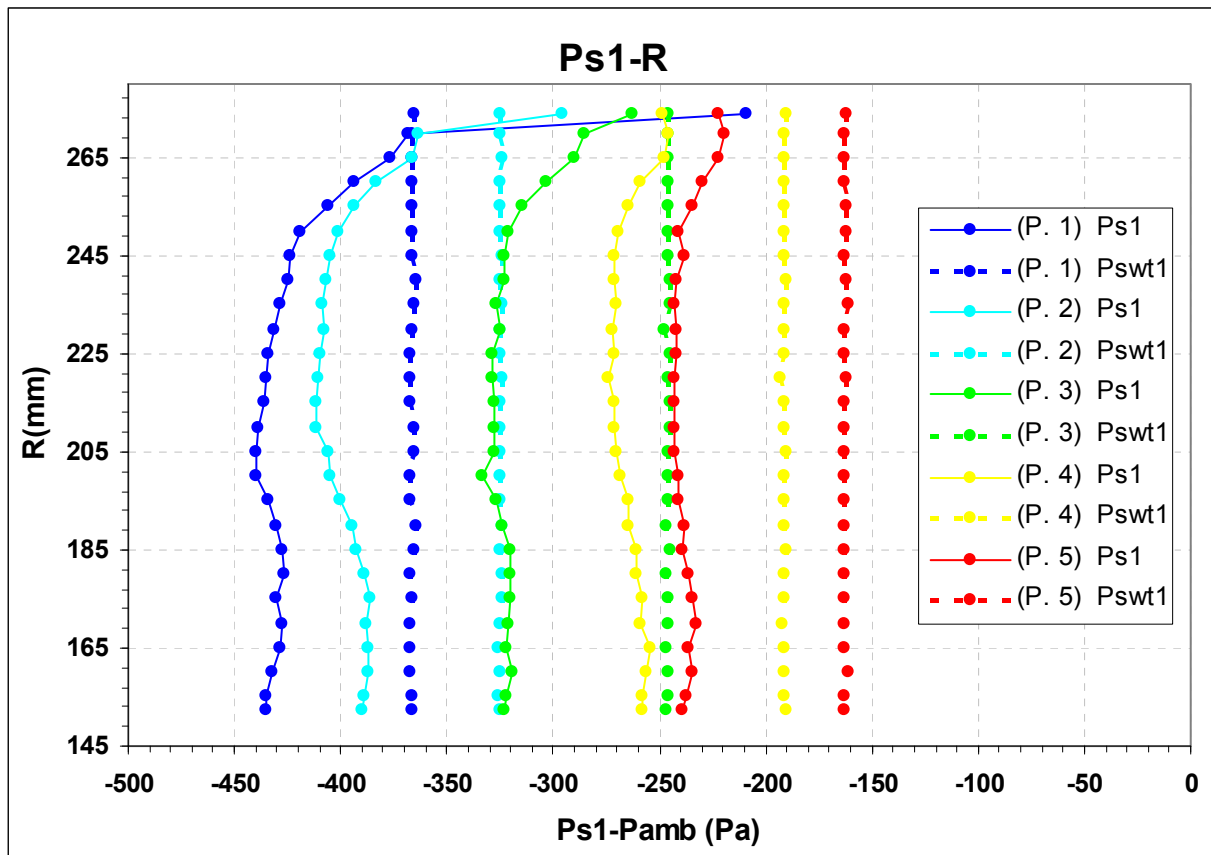
Σχήμα 4.22: ($1^{ος}$ Ρότορας Θέση 1). Απόλυτη γωνία a_1 εισόδου ροής και περιφερειακή συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας V_{u1} .



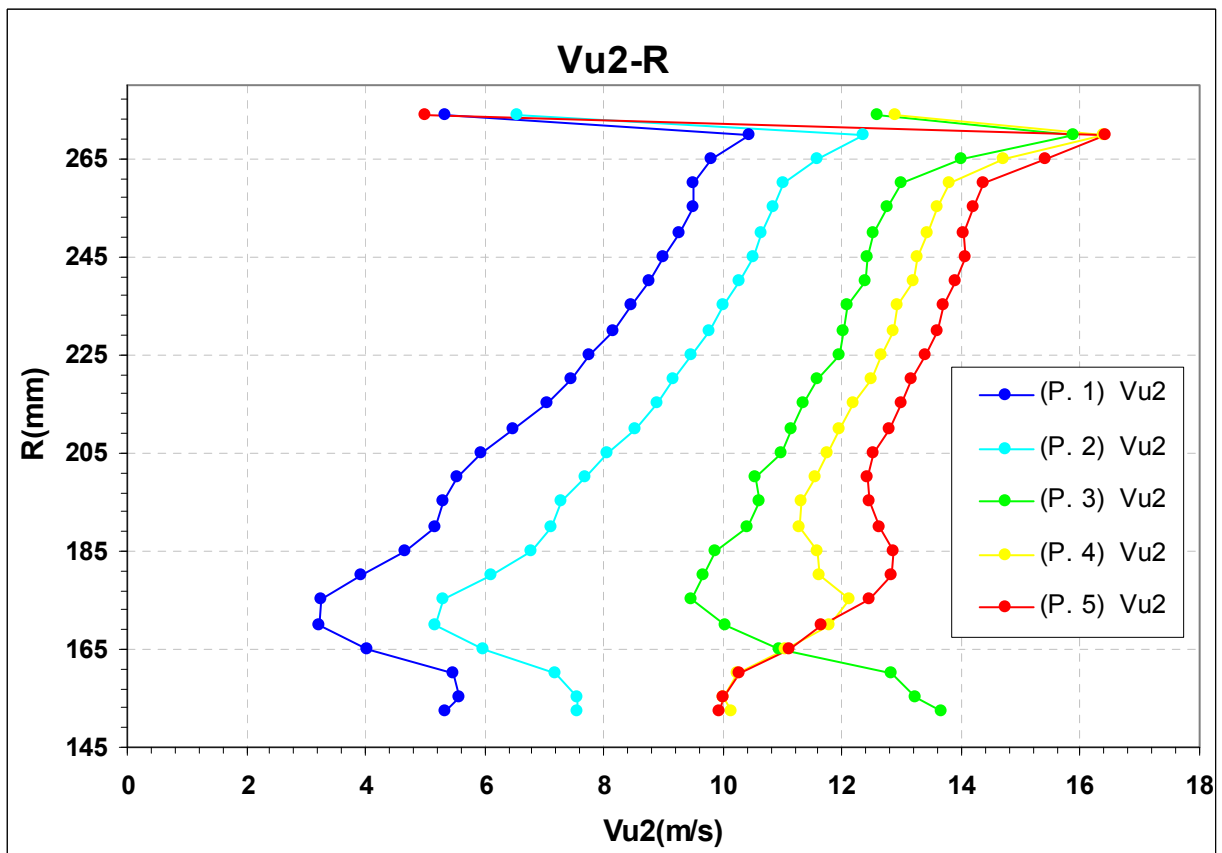
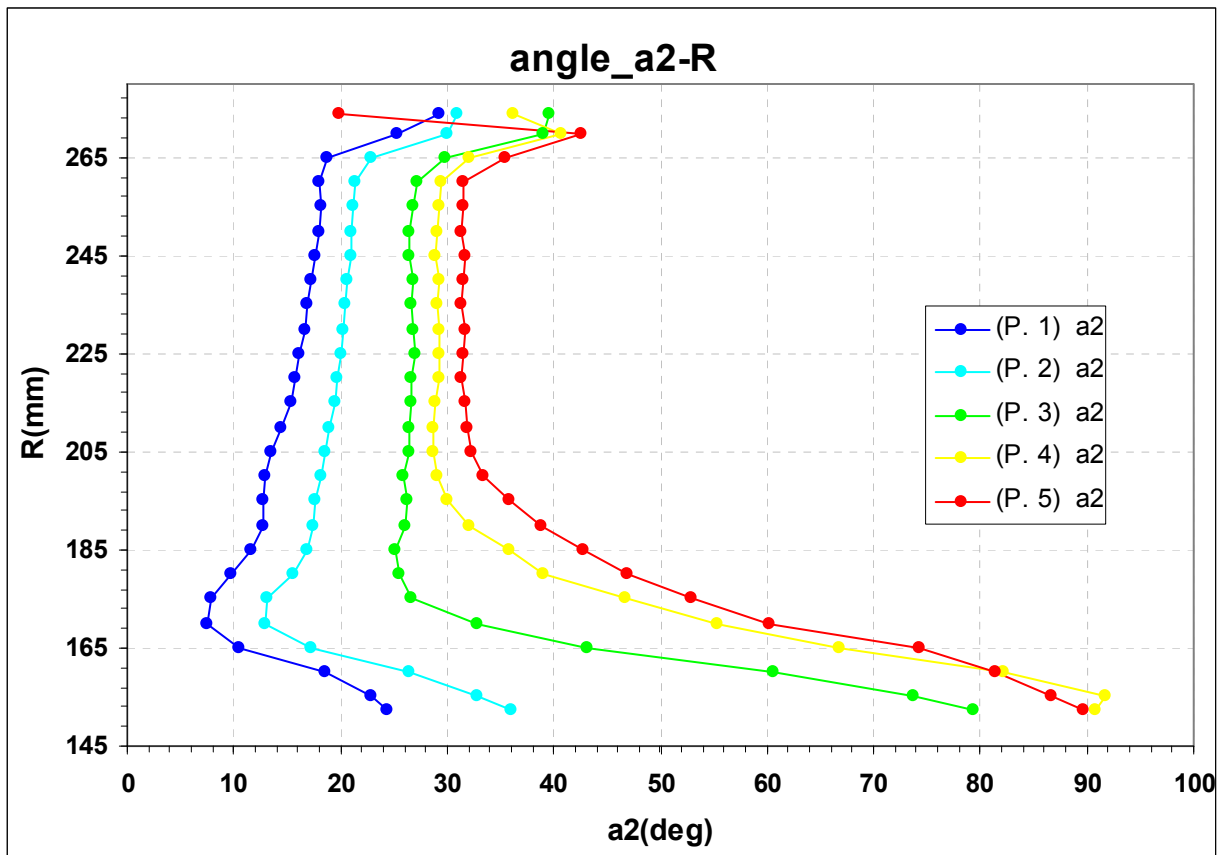
Σχήμα 4.23: ($1^{ος}$ Ρότορας Θέση 1). Απόλυτη ταχύτητα V_1 και αξονική συνιστώσα V_{a1} εισόδου ροής.



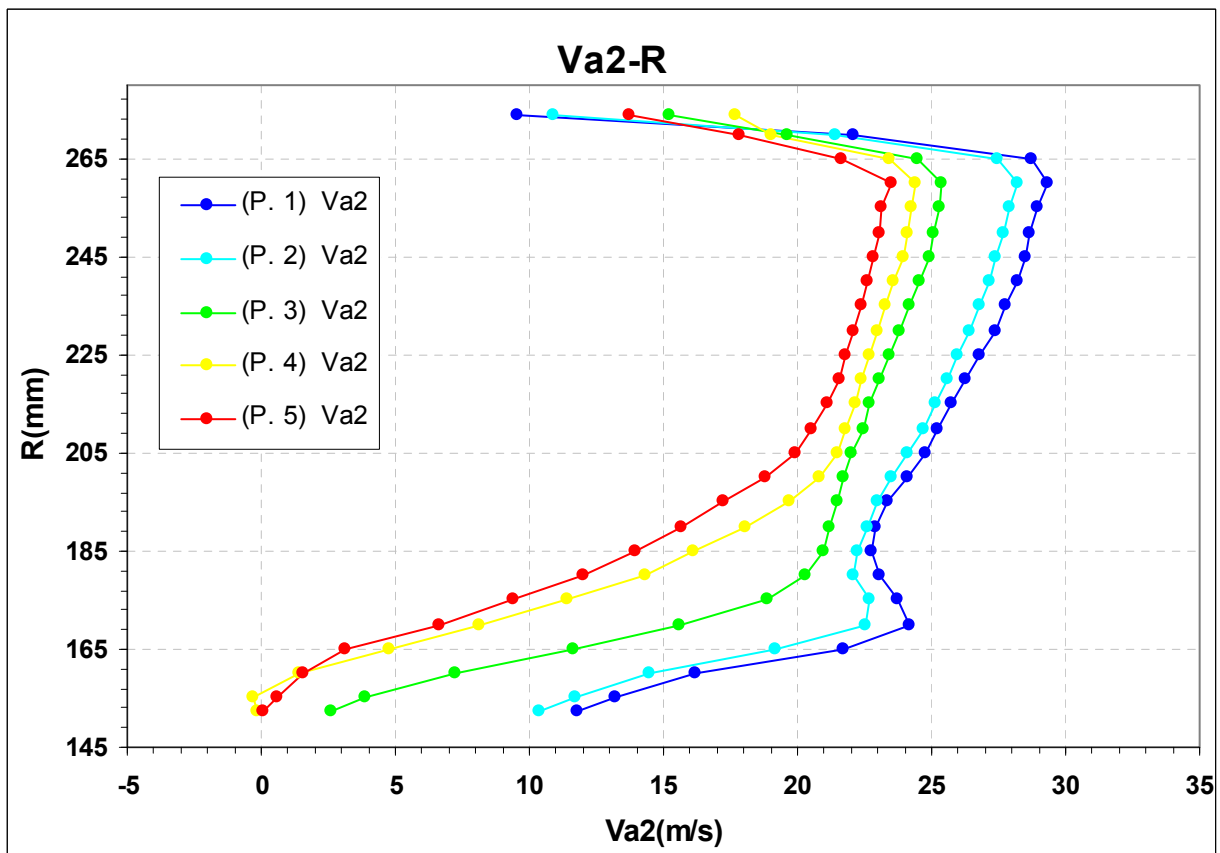
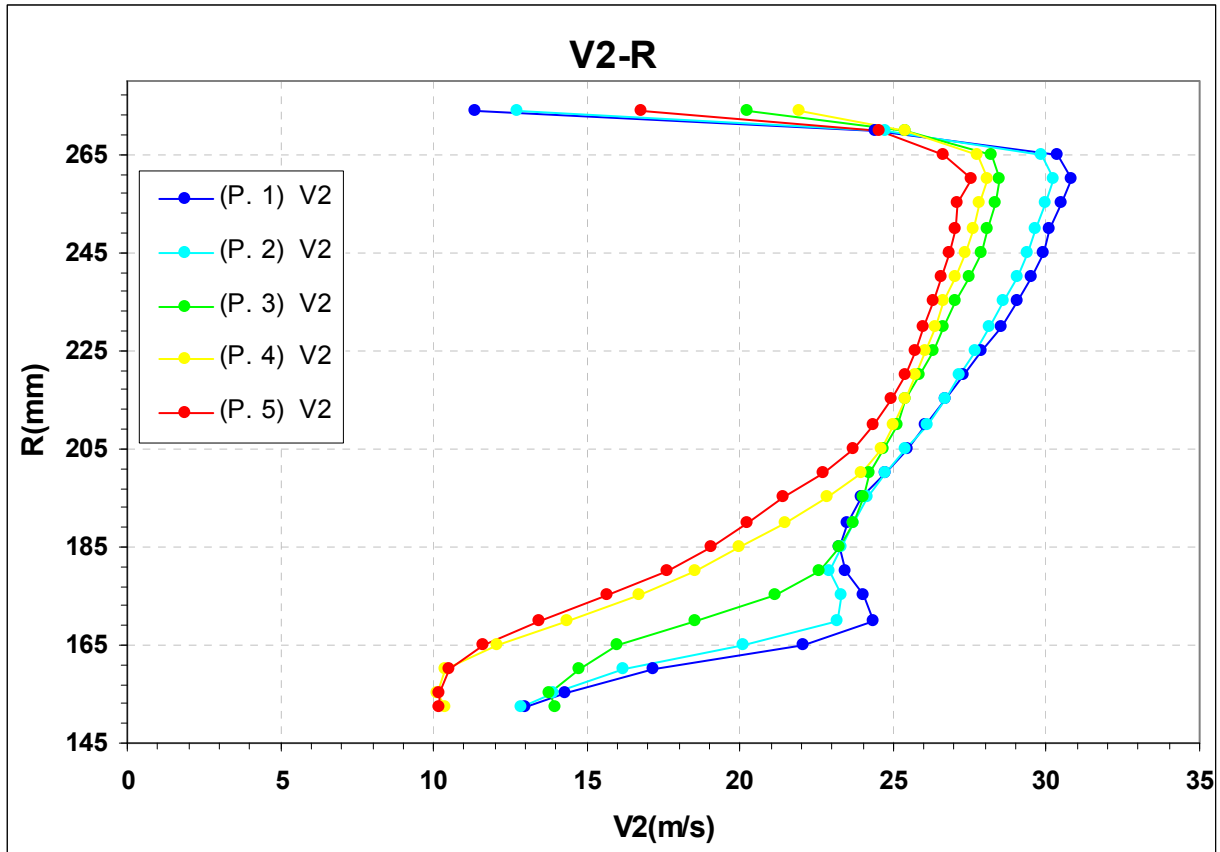
Σχήμα 4.24: (1^{ος} Ρότορας Θέση 1). Σχετική ταχύτητα W_1 και γωνία β_1 εισόδου ροής.



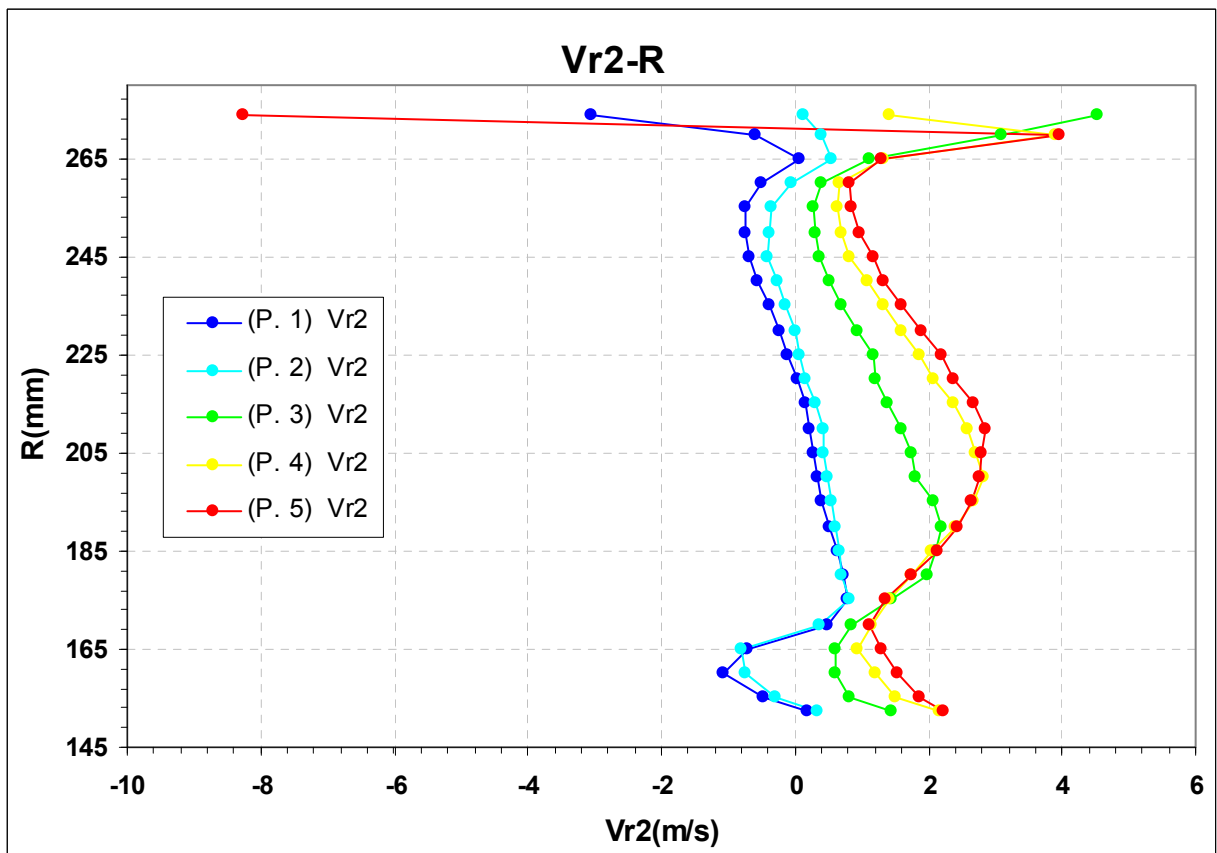
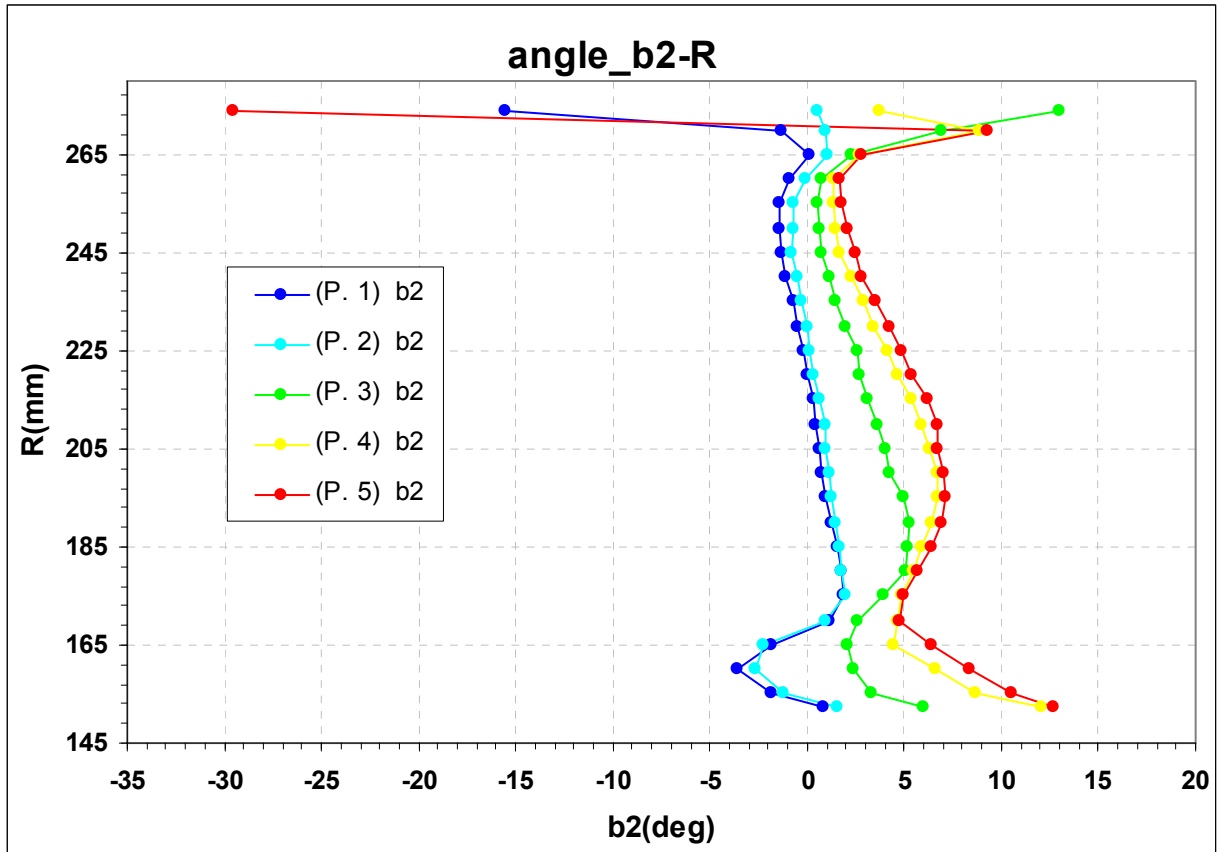
Σχήμα 4.25: (1^{ος} Ρότορας Θέση 1). Ολική P_{t1} και στατική P_{s1} εισόδου ροής.



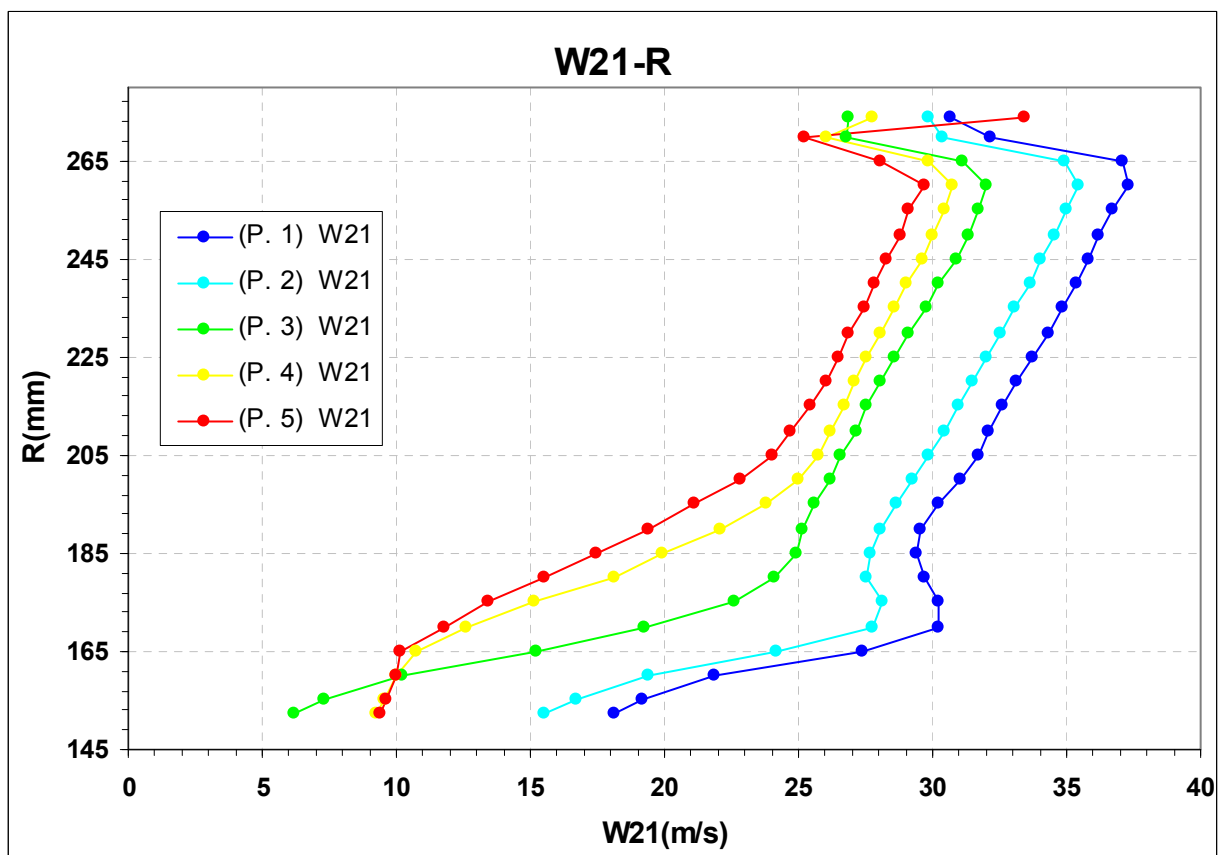
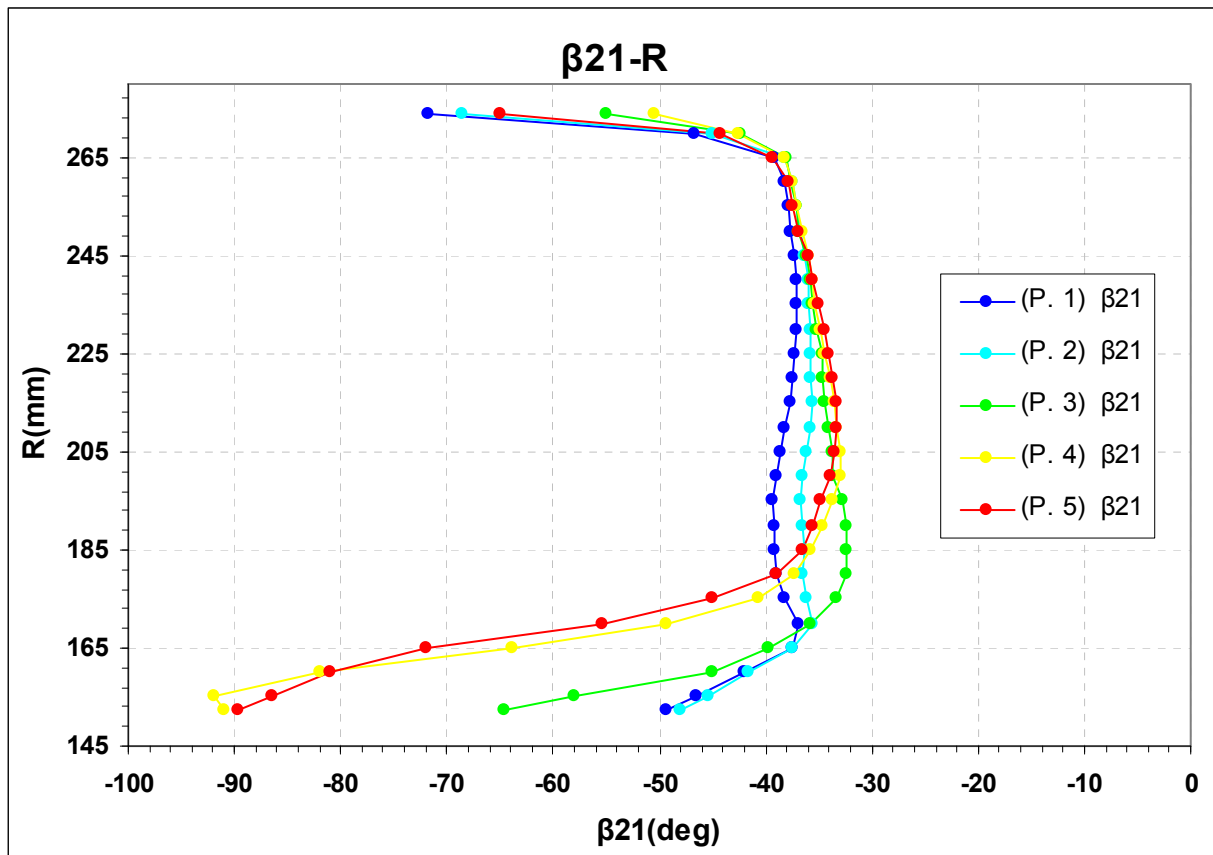
Σχήμα 4.26: (1^{ος} Ρότορας Θέση 21). Απόλυτη γωνία a_2 εξόδου ροής και περιφερειακή συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας V_{u2} .



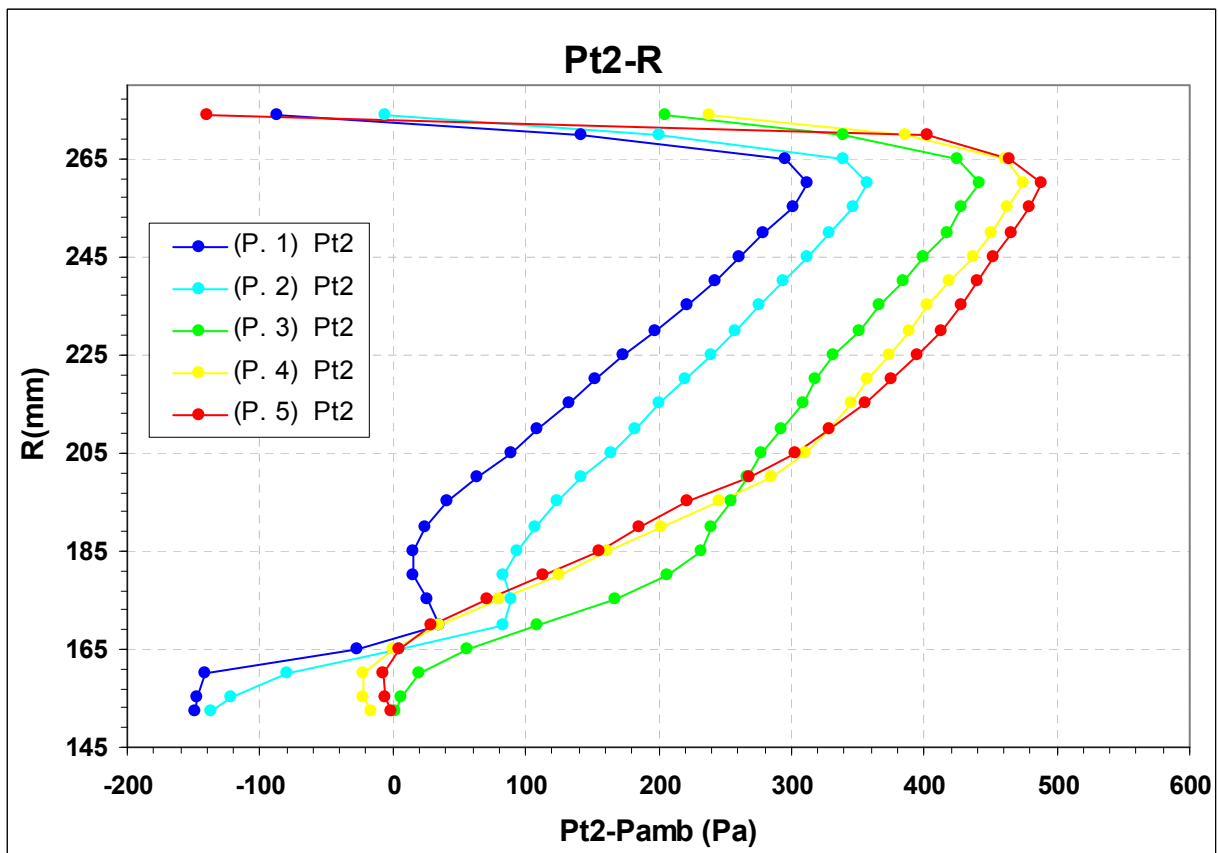
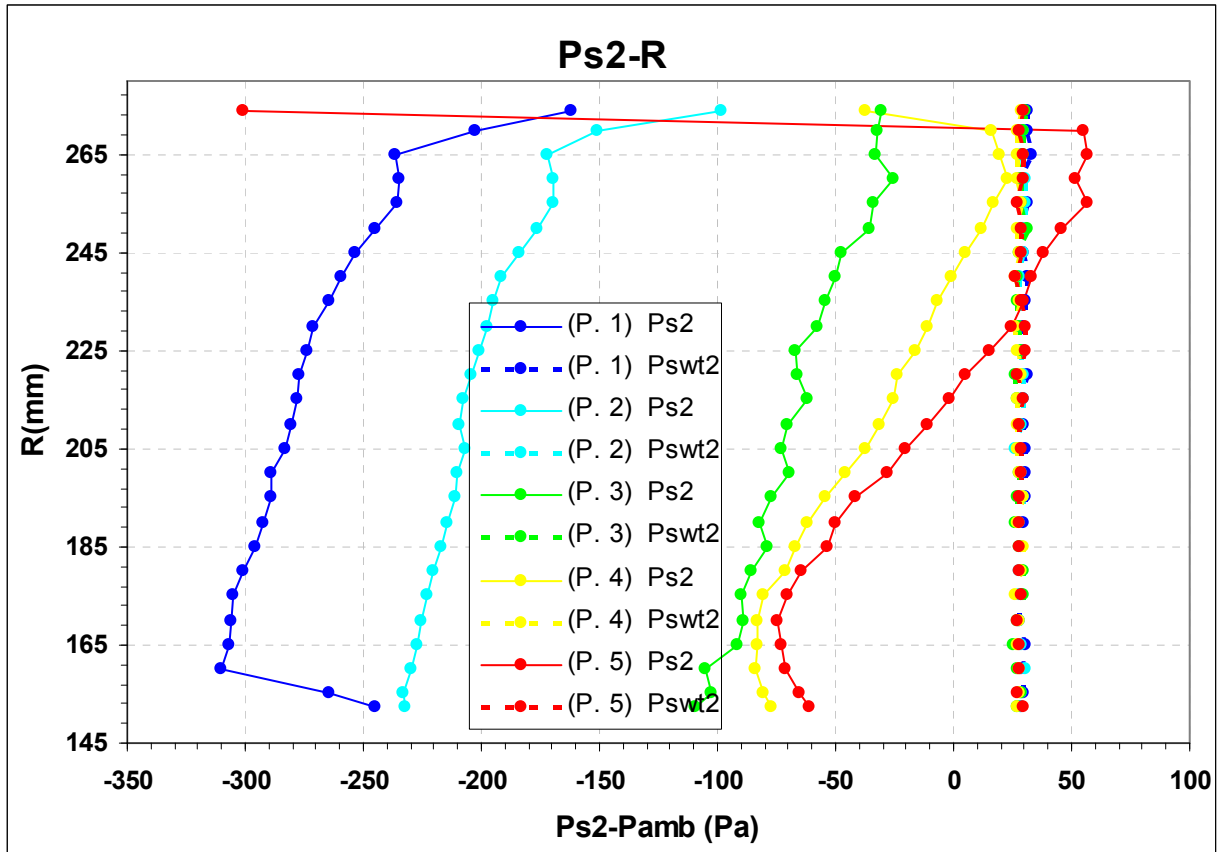
Σχήμα 4.27: (1^{ος} Ρότορας Θέση 21 και 2^{ος} Ρότορας Θέση 22). Απόλυτη ταχύτητα V_2 και αξονική συνιστώσα V_{a2} .



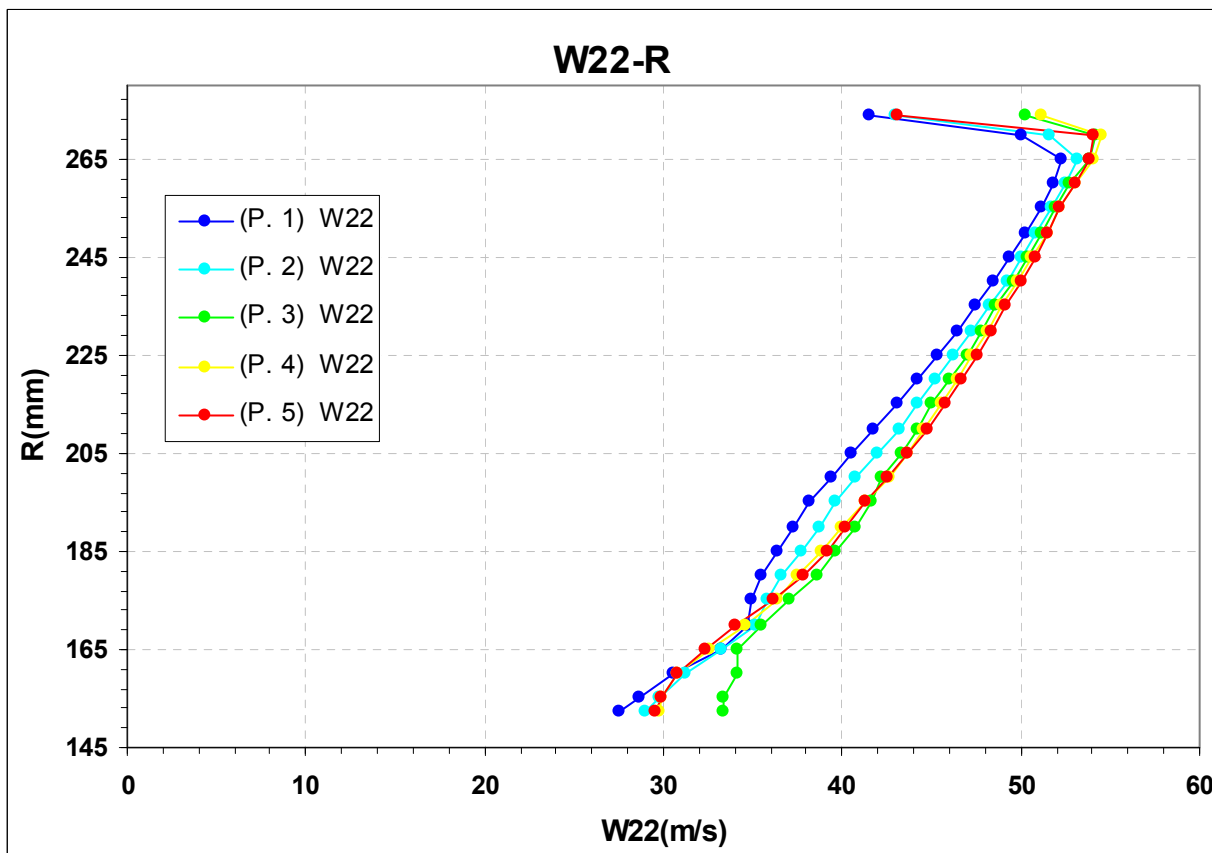
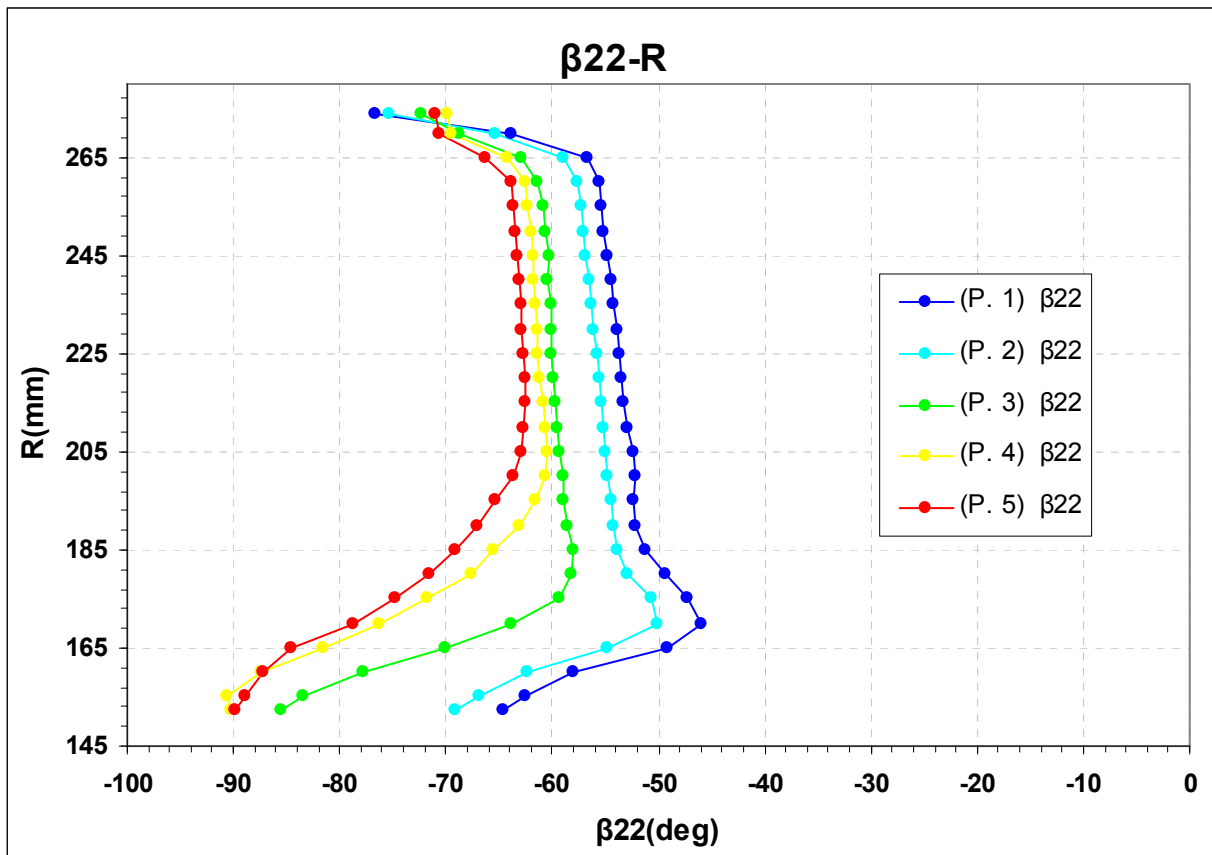
Σχήμα 4.28: (1^{ος} Ρότορας Θέση 21 και 2^{ος} Ρότορας Θέση 22). Ακτινική συνιστώσα V_{r2} απόλυτης ταχύτητας και η γωνία της b_2 .



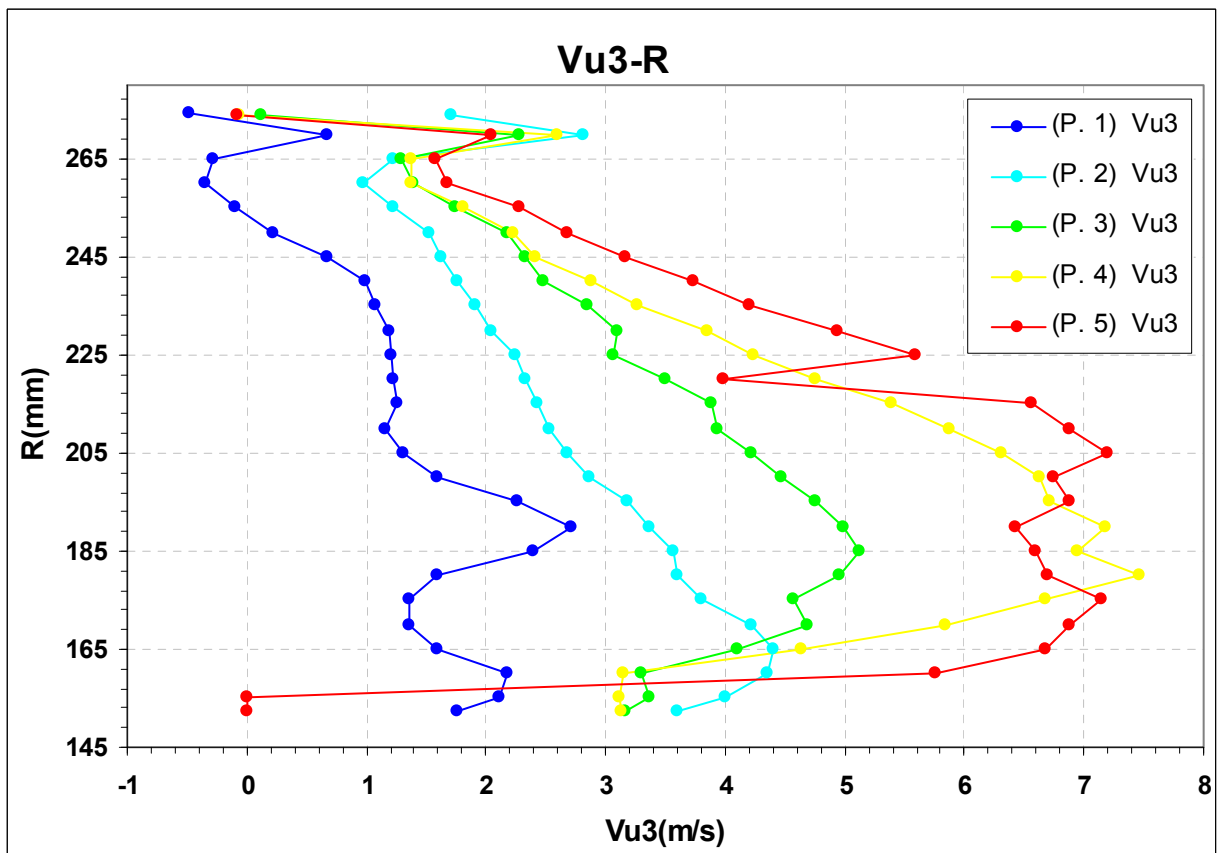
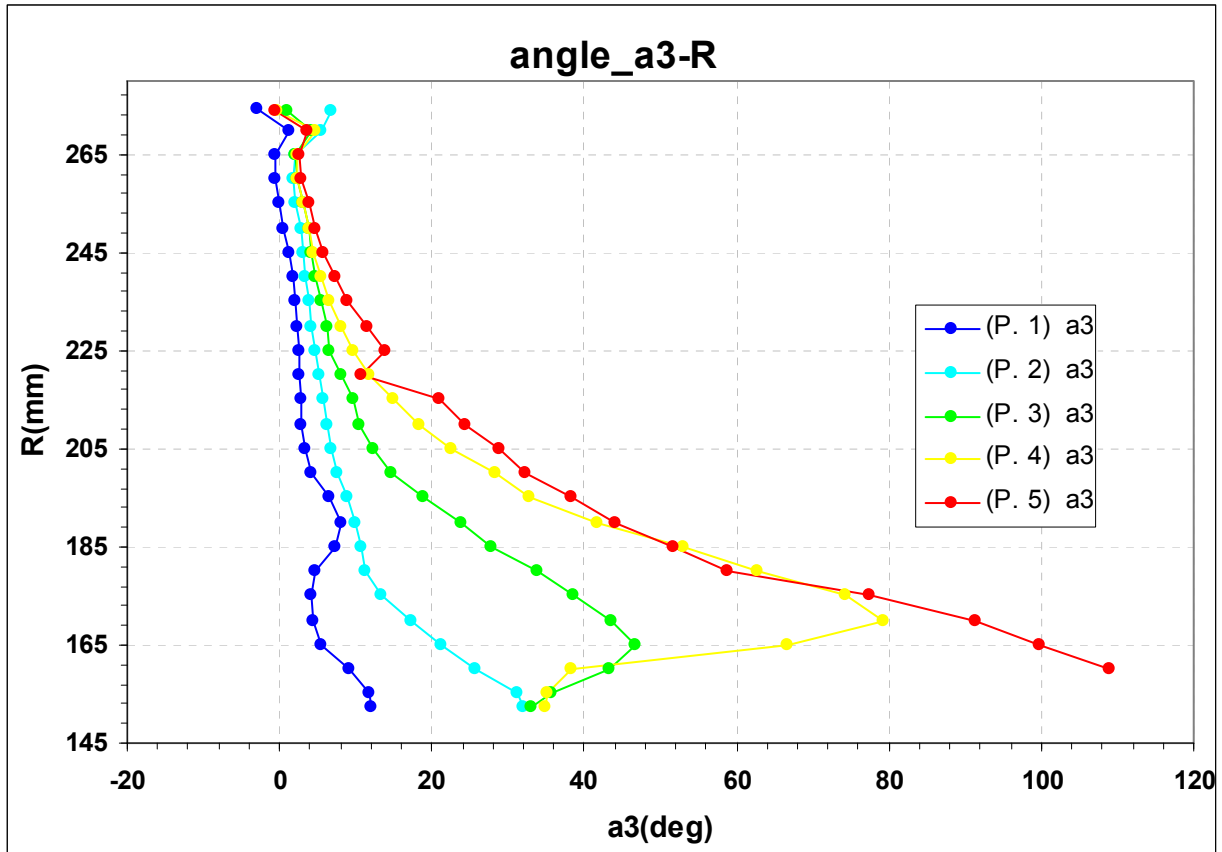
Σχήμα 4.29: (1^{ος} Ρότορας Θέση 21). Σχετική ταχύτητα W_{21} και γωνία β_{21} εξόδου ροής.



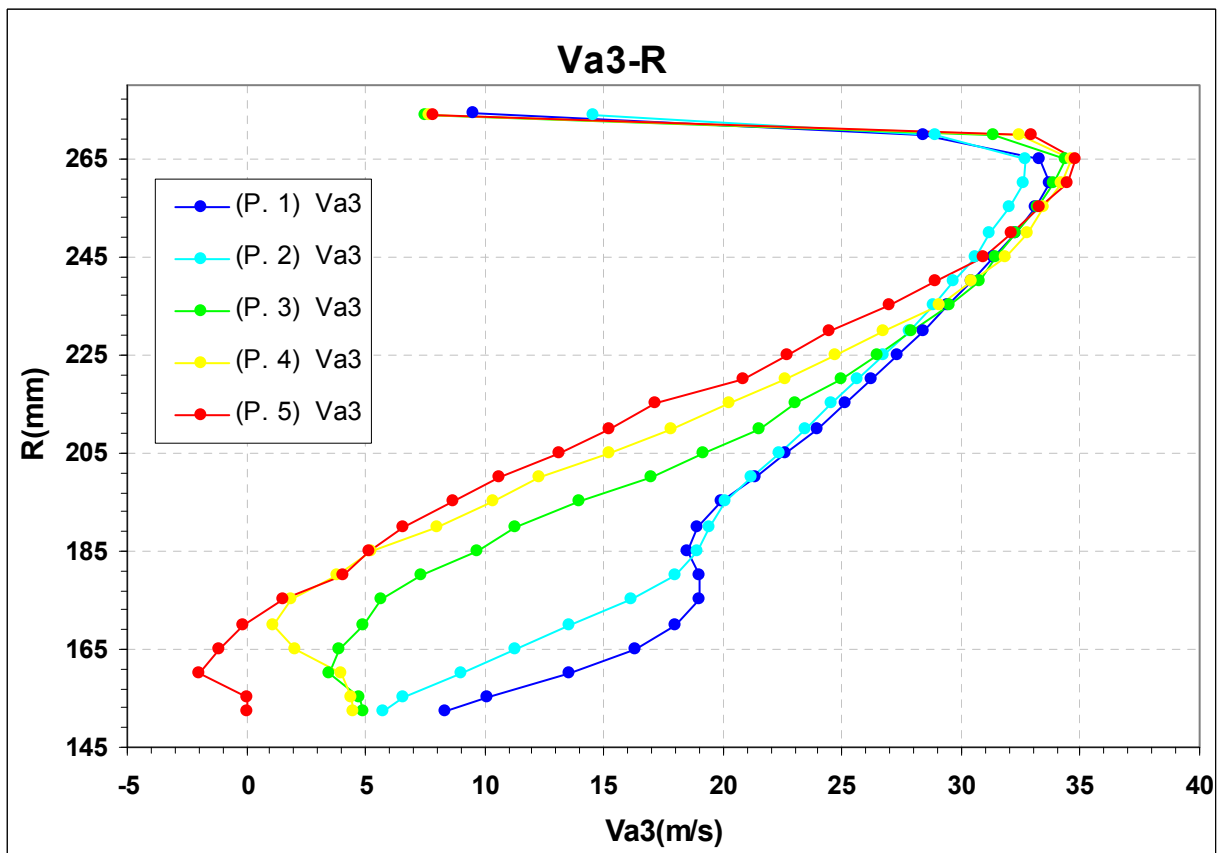
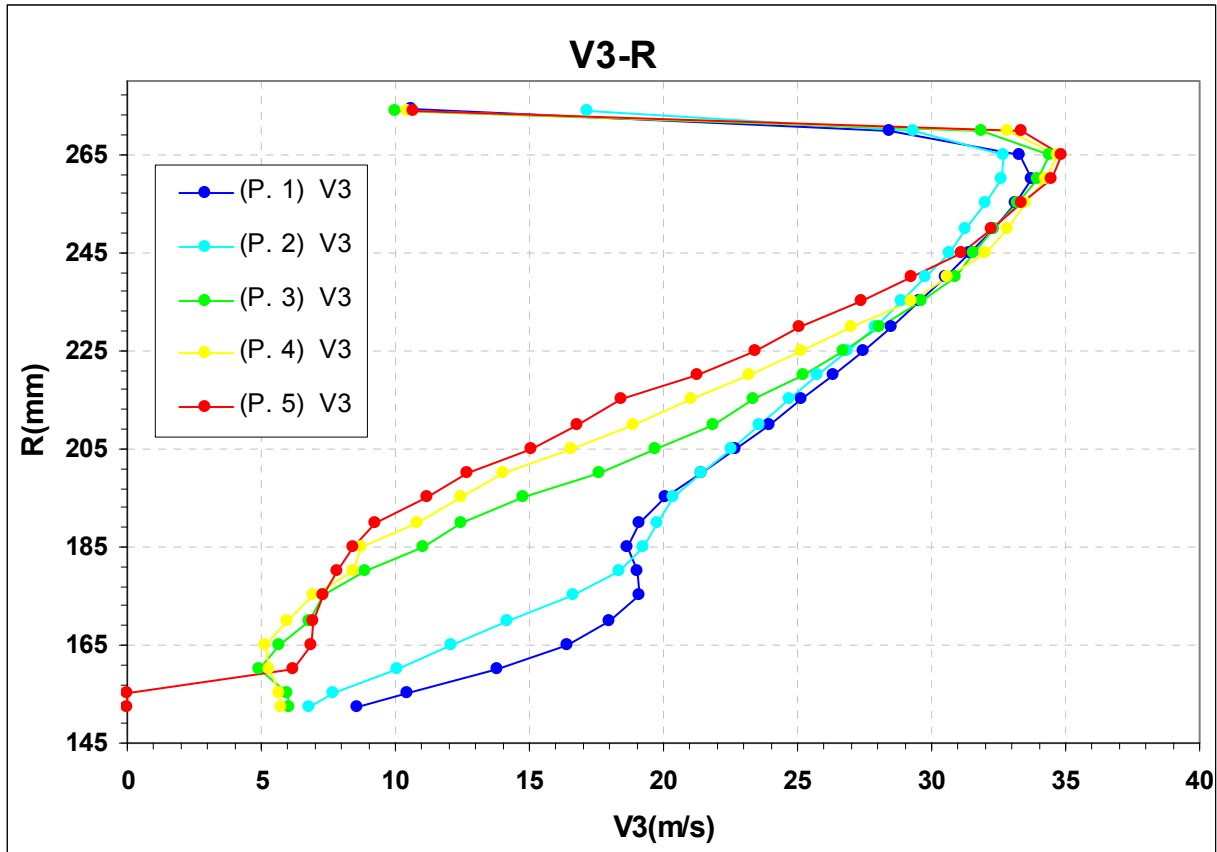
Σχήμα 4.30: (1^{ος} Ρότορας Θέση 21 και 2^{ος} Ρότορας Θέση 22). Ολική P_{t1} και στατική P_{s1} πίεση.



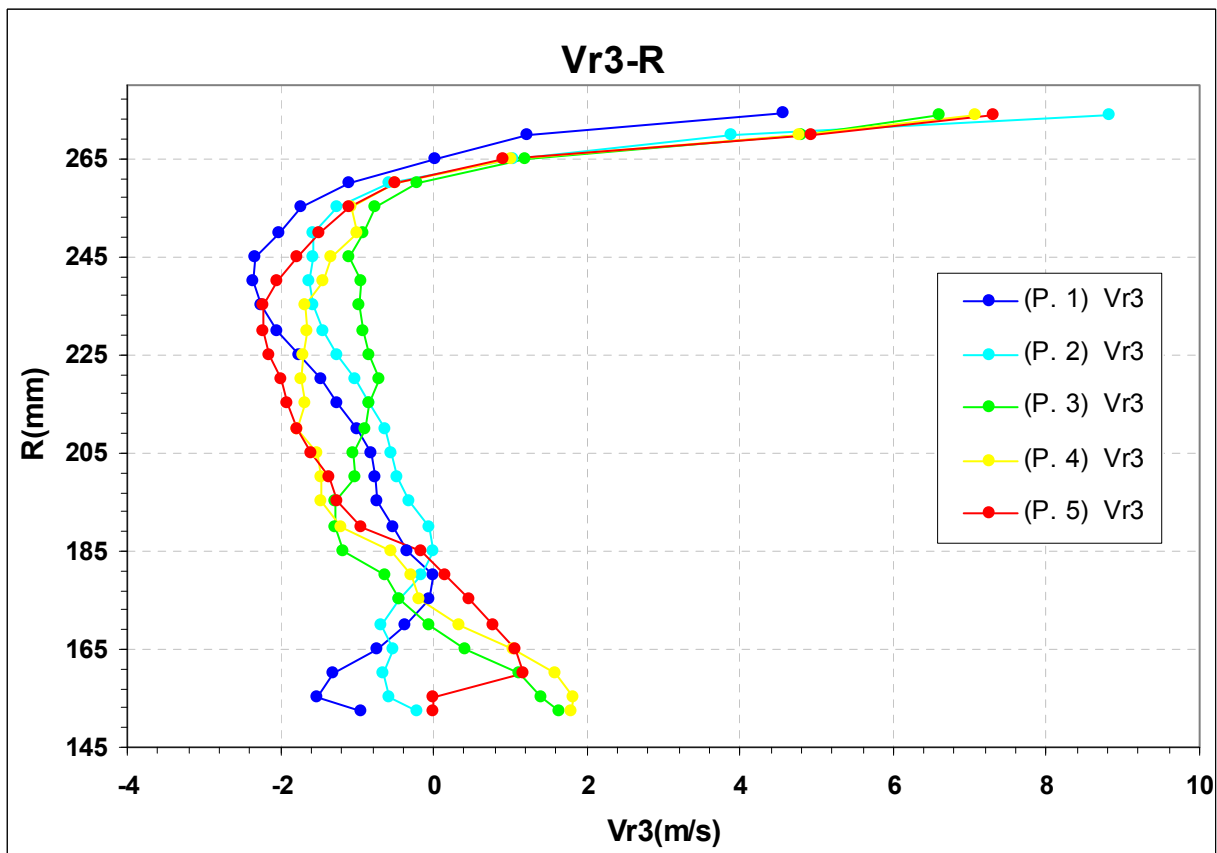
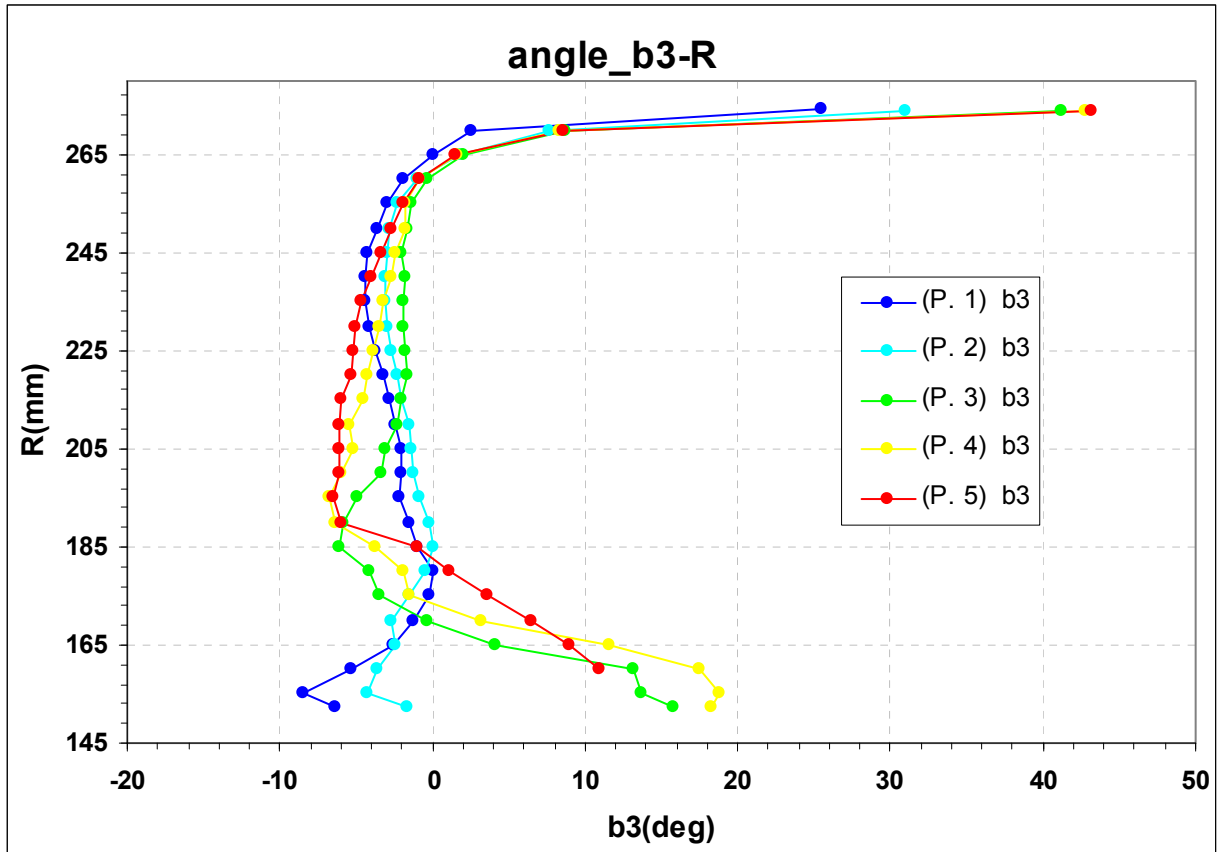
Σχήμα 4.31: (2^{ος} Ρότορας Θέση 22). Σχετική ταχύτητα W_{22} και γωνία β_{22} εισόδου ροής.



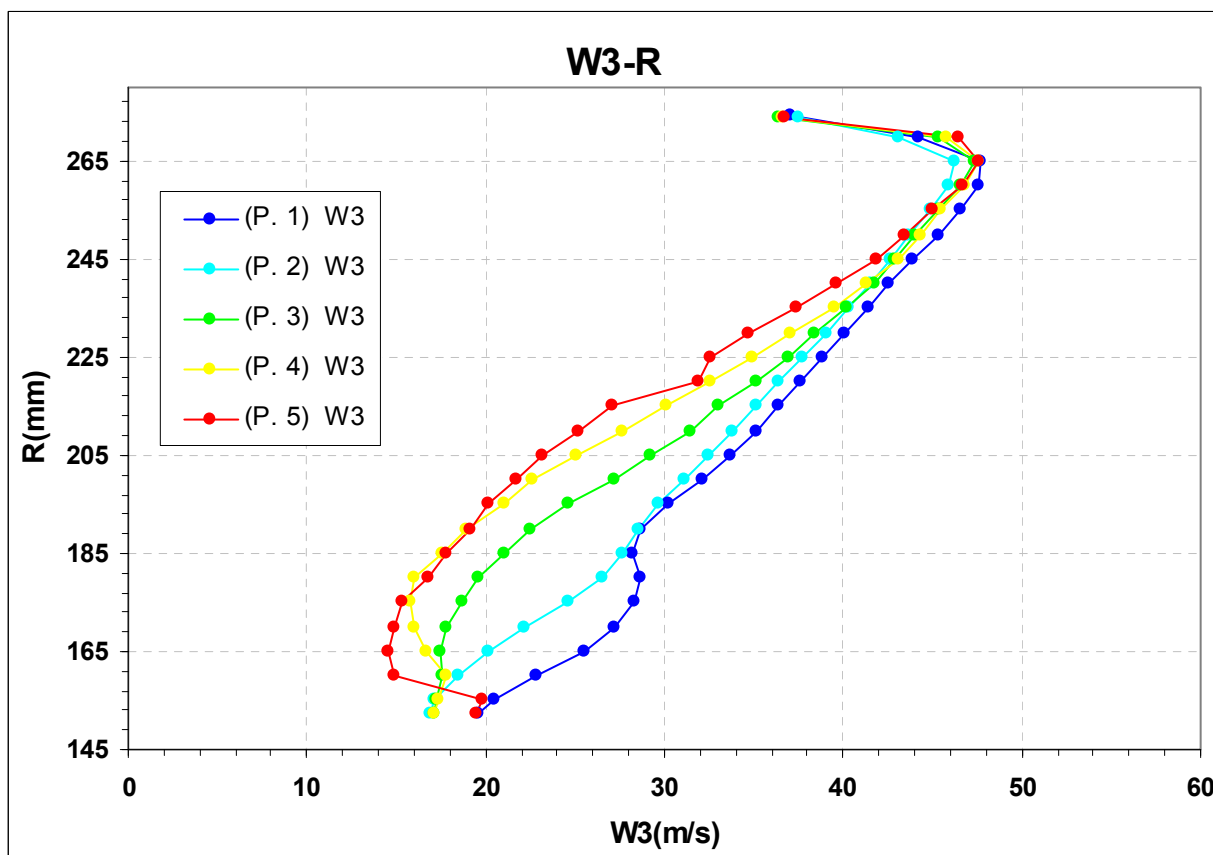
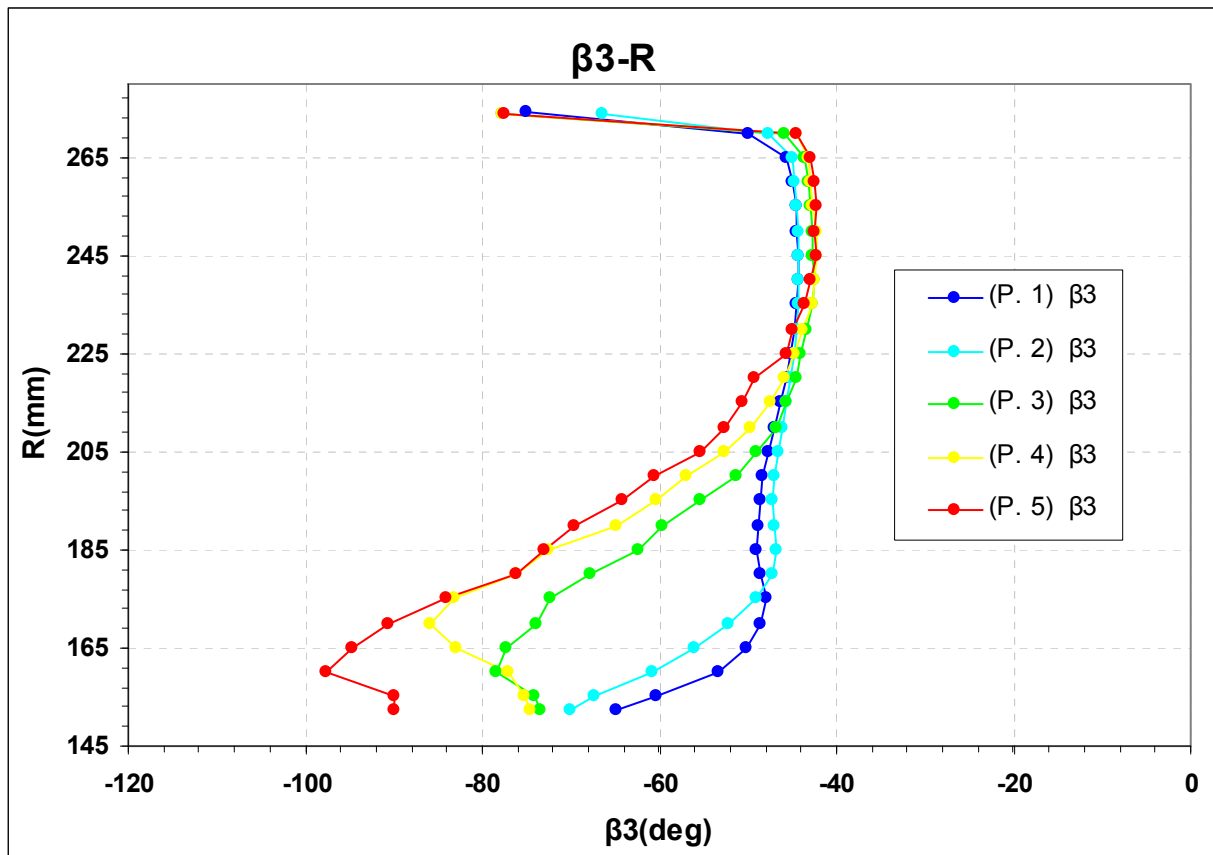
Σχήμα 4.32: (2^{05} Ρότορας Θέση 3). Απόλυτη γωνία a_3 εξόδου ροής και περιφερειακή συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας V_{u3} .



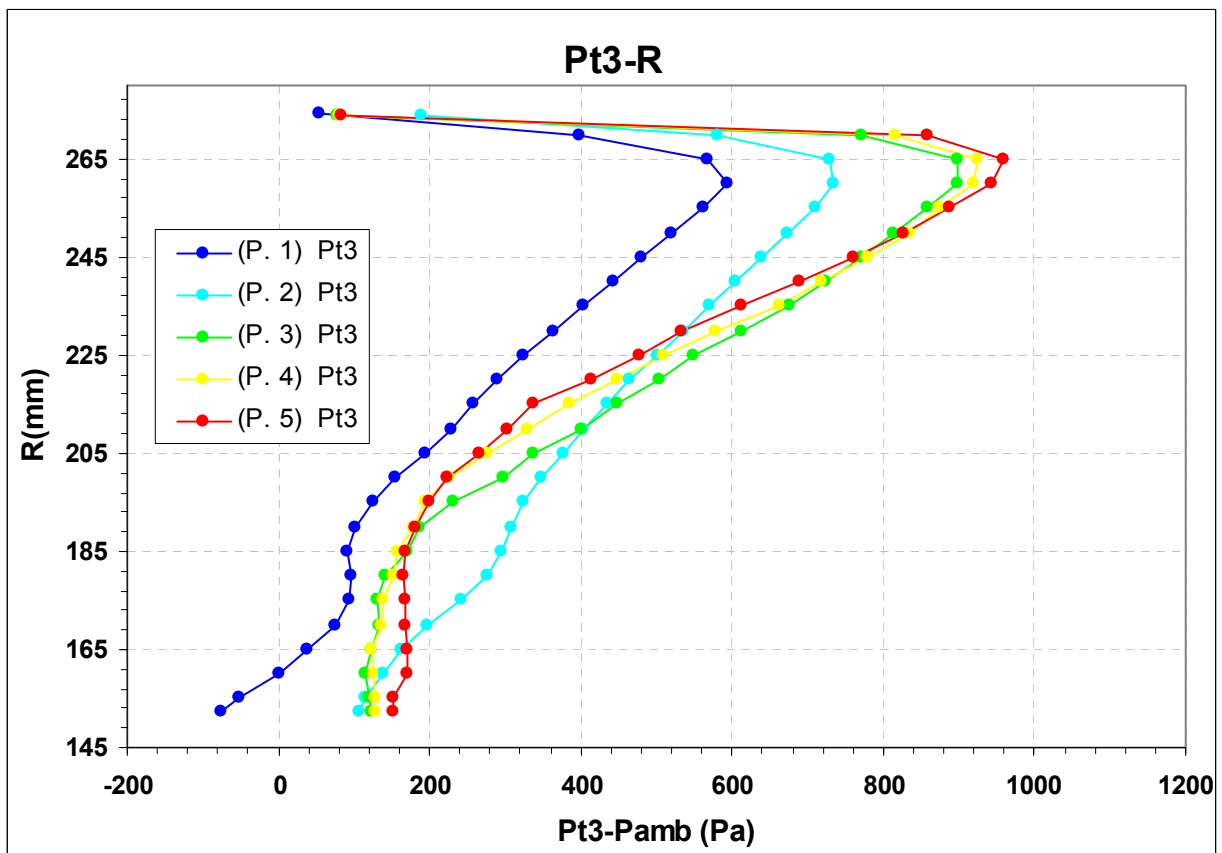
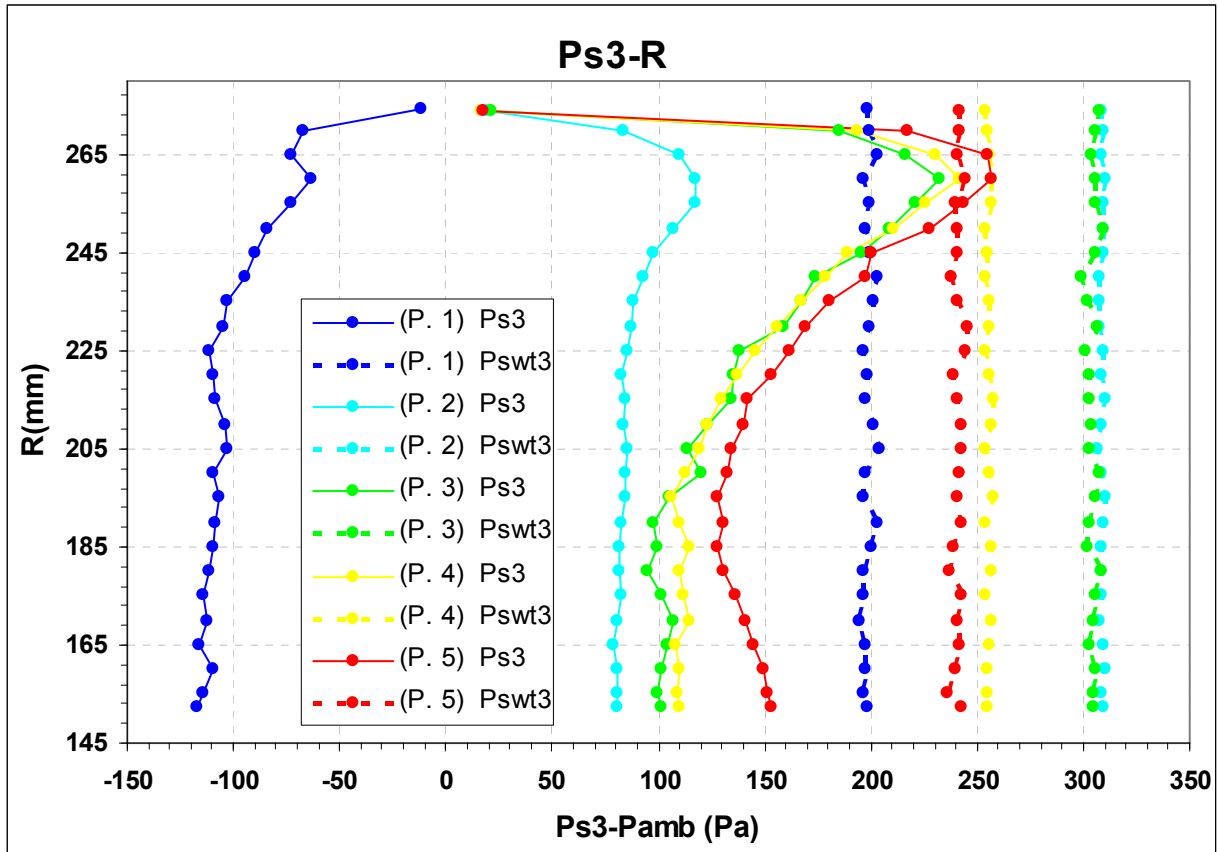
Σχήμα 4.33: (2^{95} Ρότορας Θέση 3). Απόλυτη ταχύτητα V_3 και αξονική συνιστώσα V_{a3} εξόδου ροής.



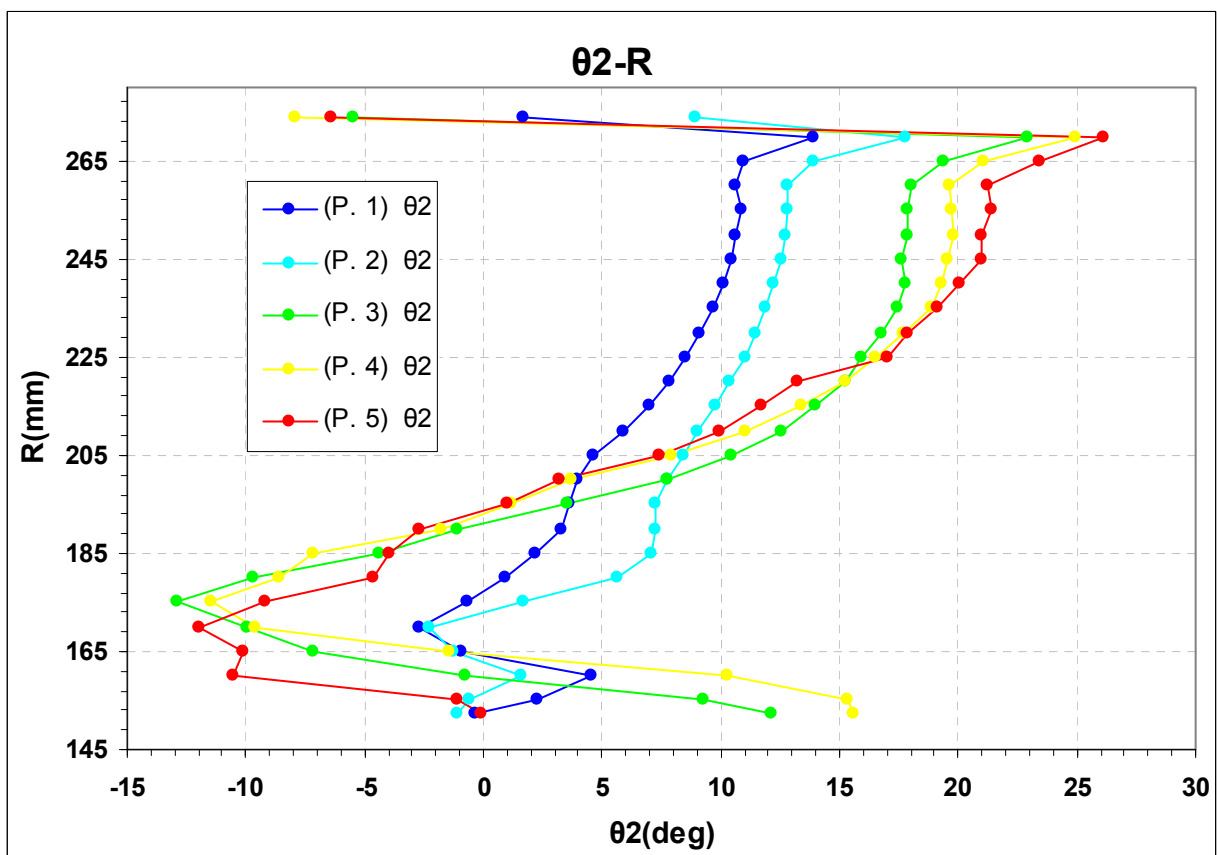
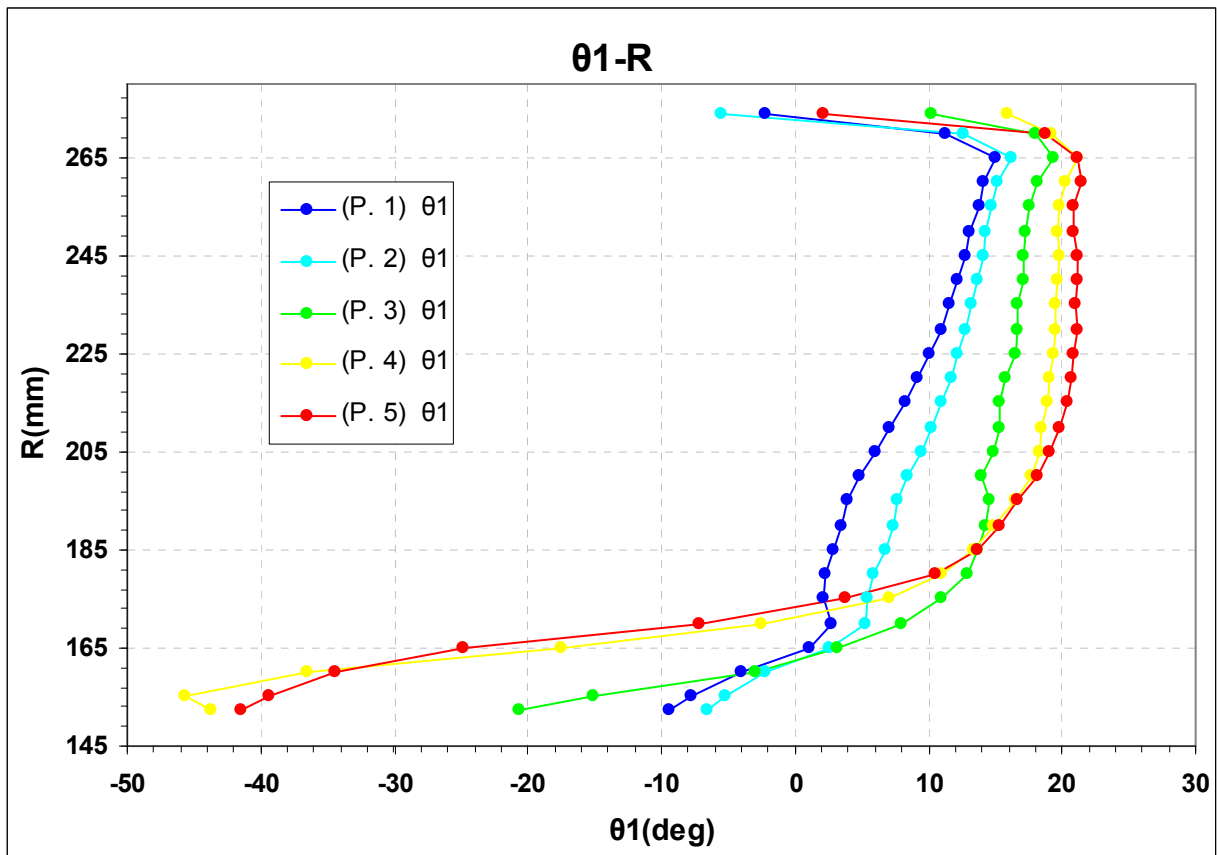
Σχήμα 4.34: (2^{05} Ρότορας Θέση 3). Ακτινική συνιστώσα V_{r3} απόλυτης ταχύτητας εξόδου και η γωνία της b_3 .



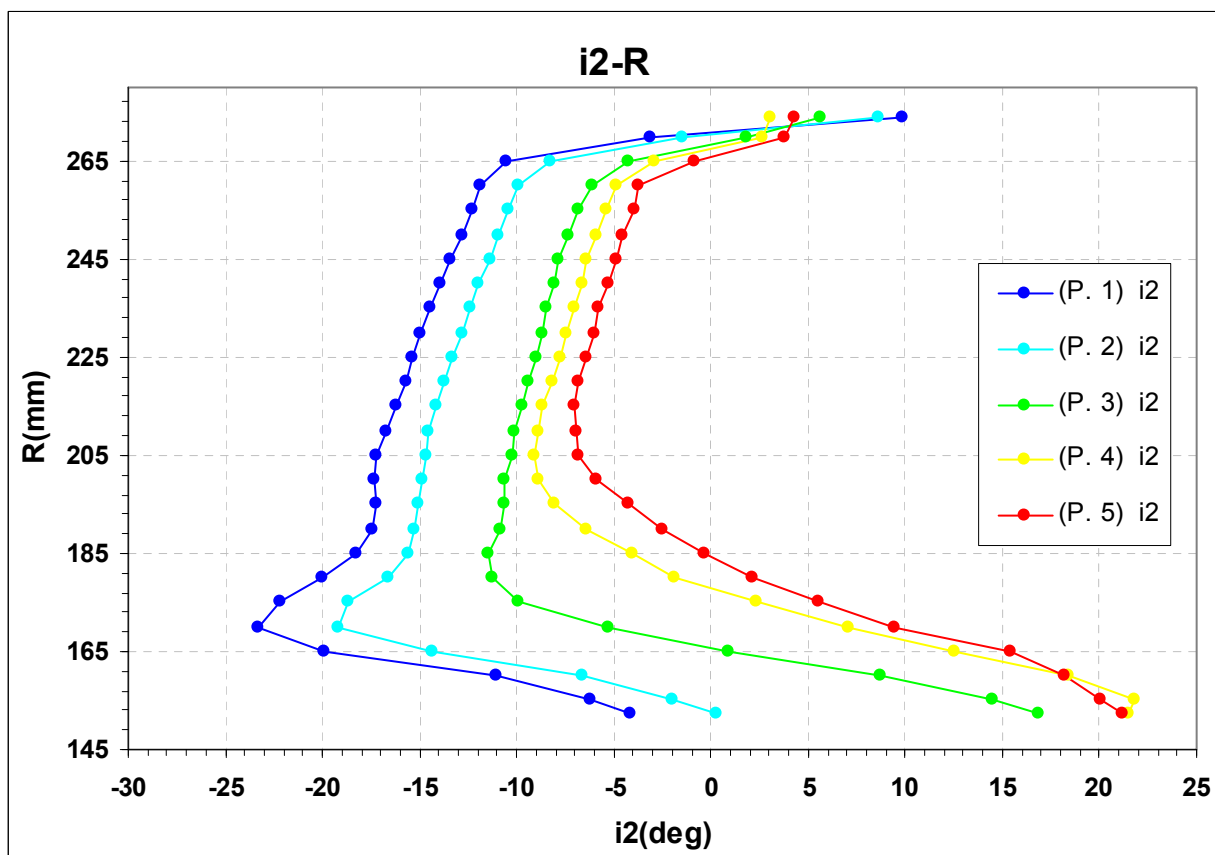
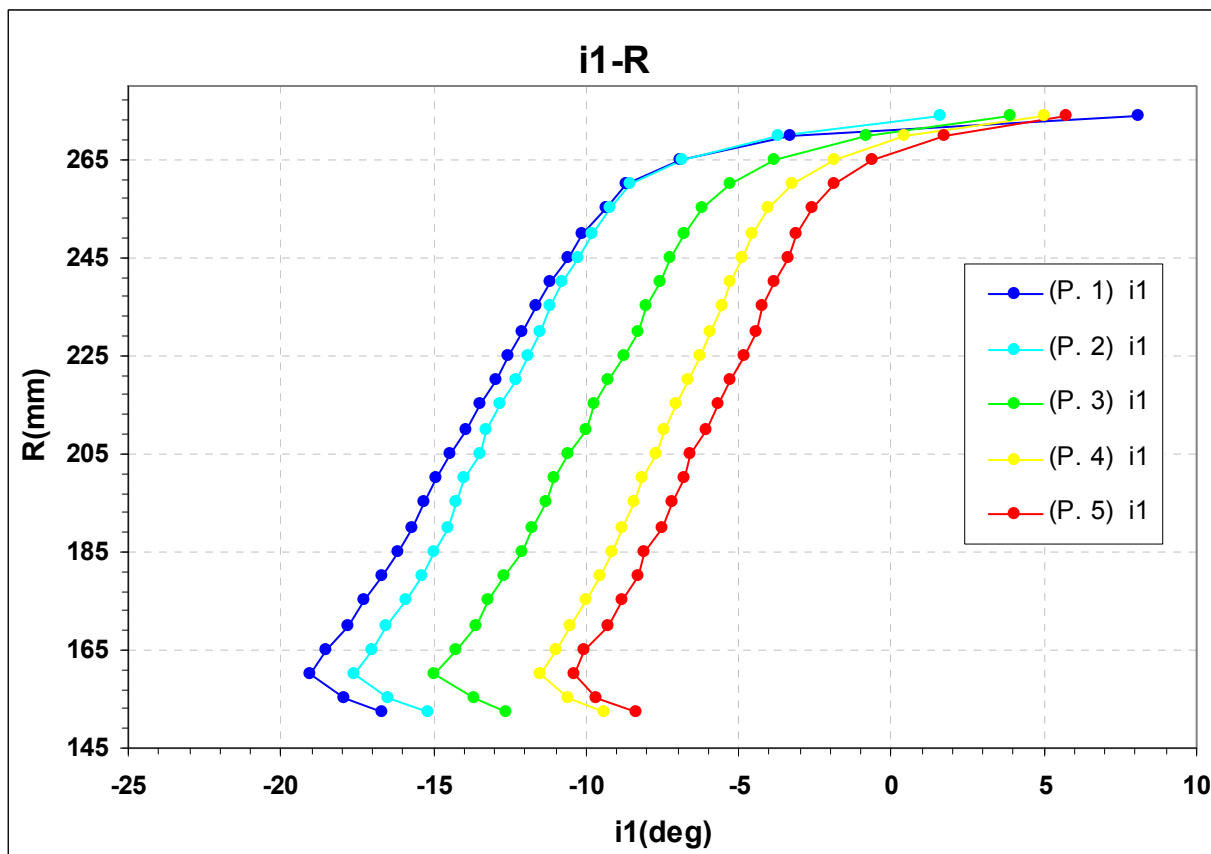
Σχήμα 4.35: (2^{ος} Ρότορας Θέση 3). Σχετική ταχύτητα W₃ και γωνία β₃ εξόδου ροής.



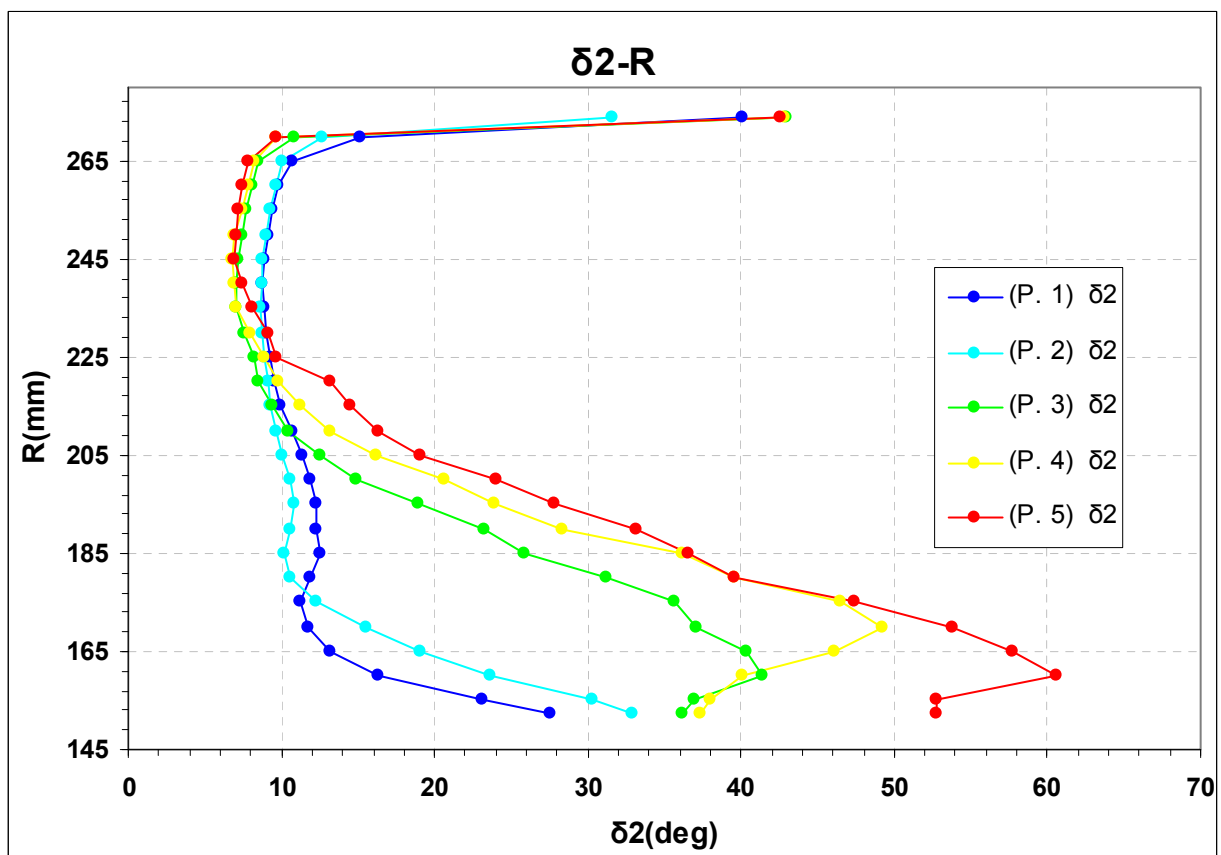
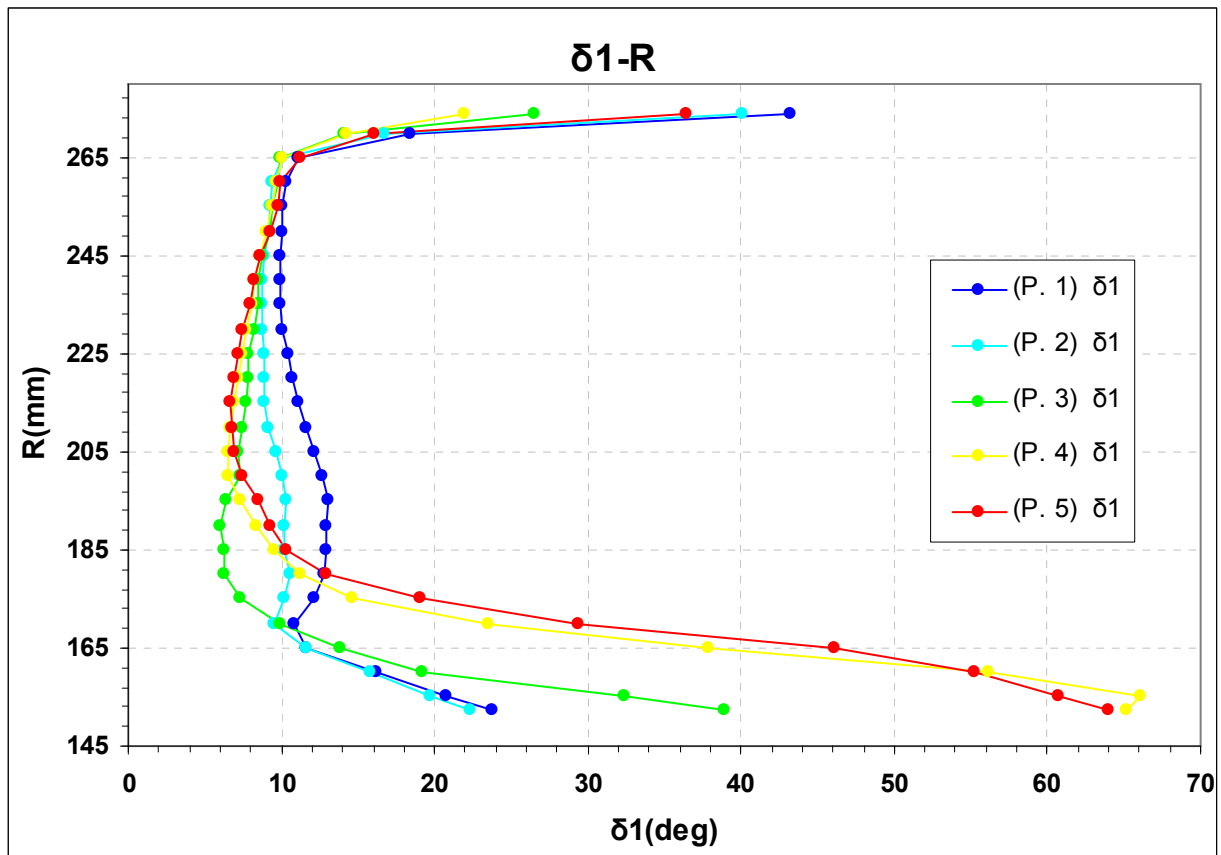
Σχήμα 4.36: (2^{ος} Ρότορας Θέση 3). Ολική P_{t1} και στατική P_{s1} εξόδου ροής.



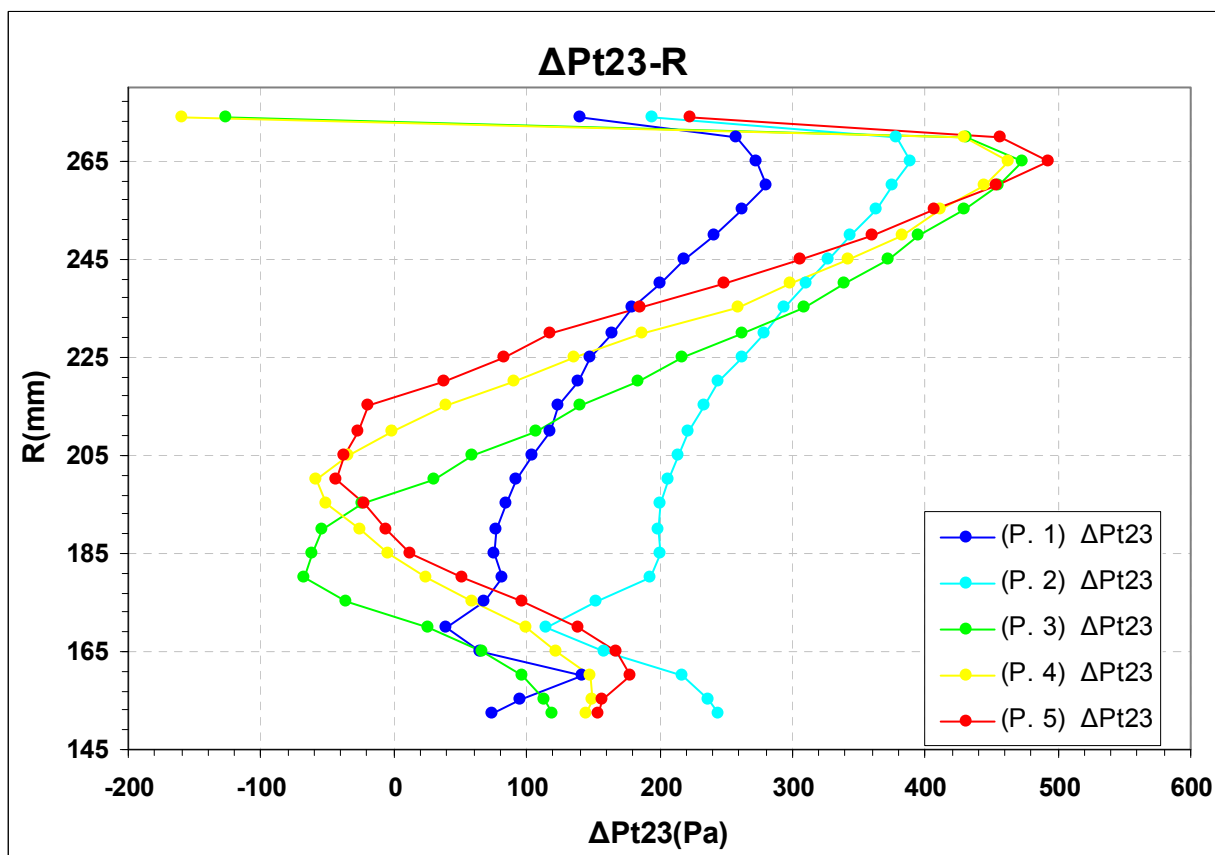
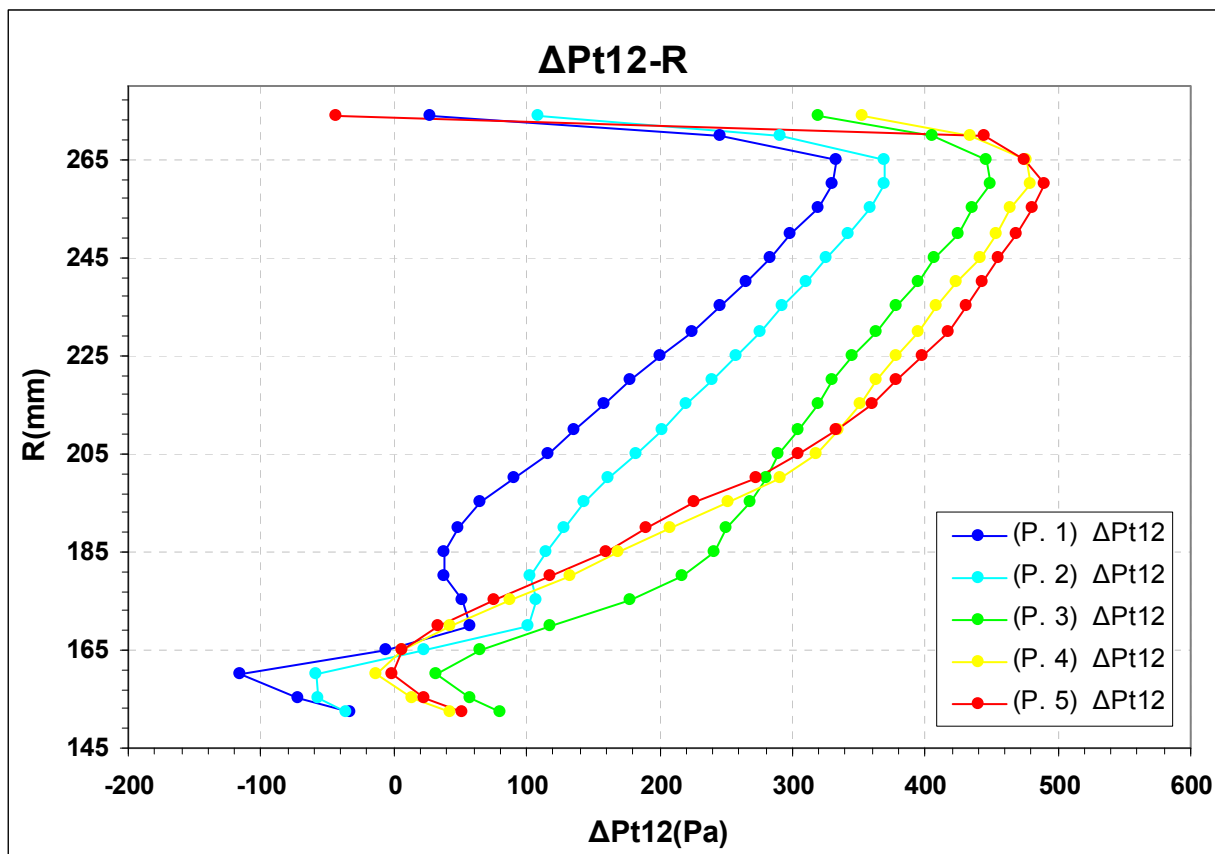
Σχήμα 4.37: Γωνίες απόκλισης ροής θ_1 , θ_2 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



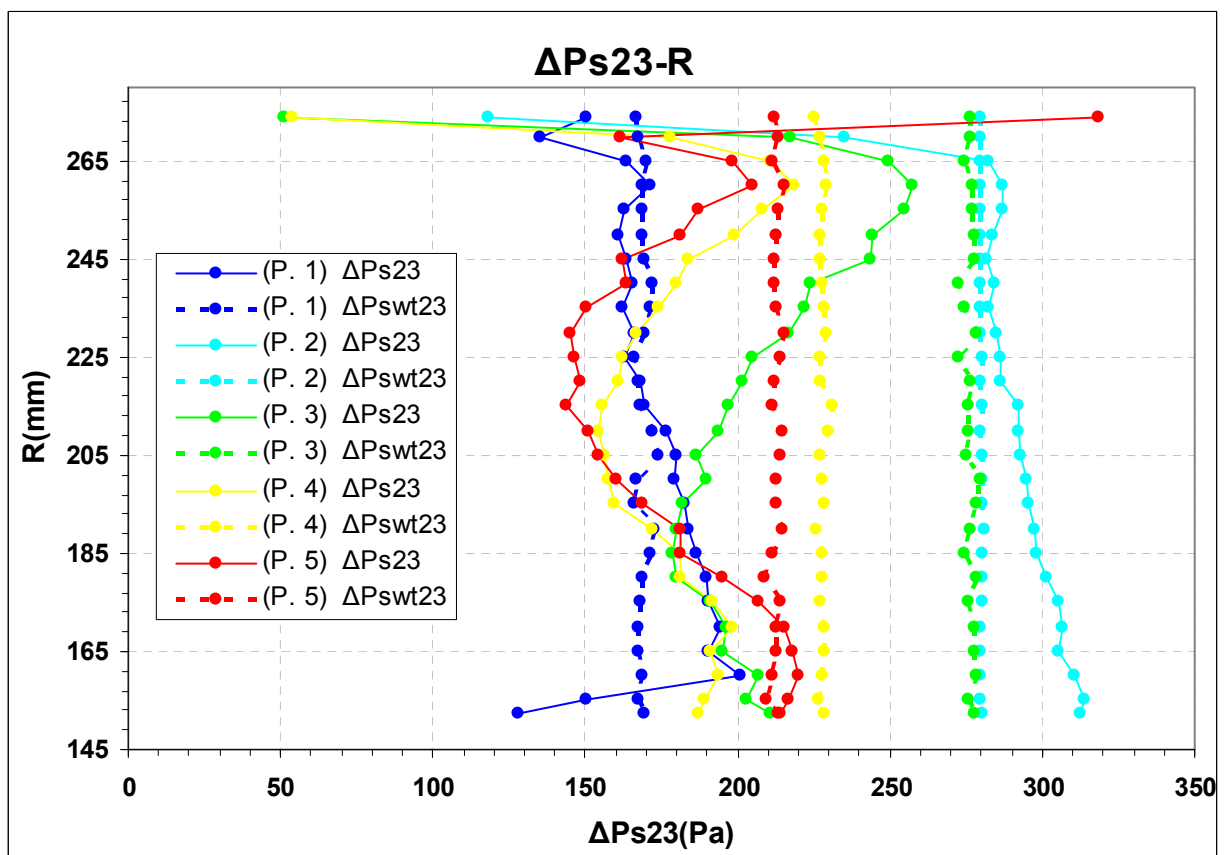
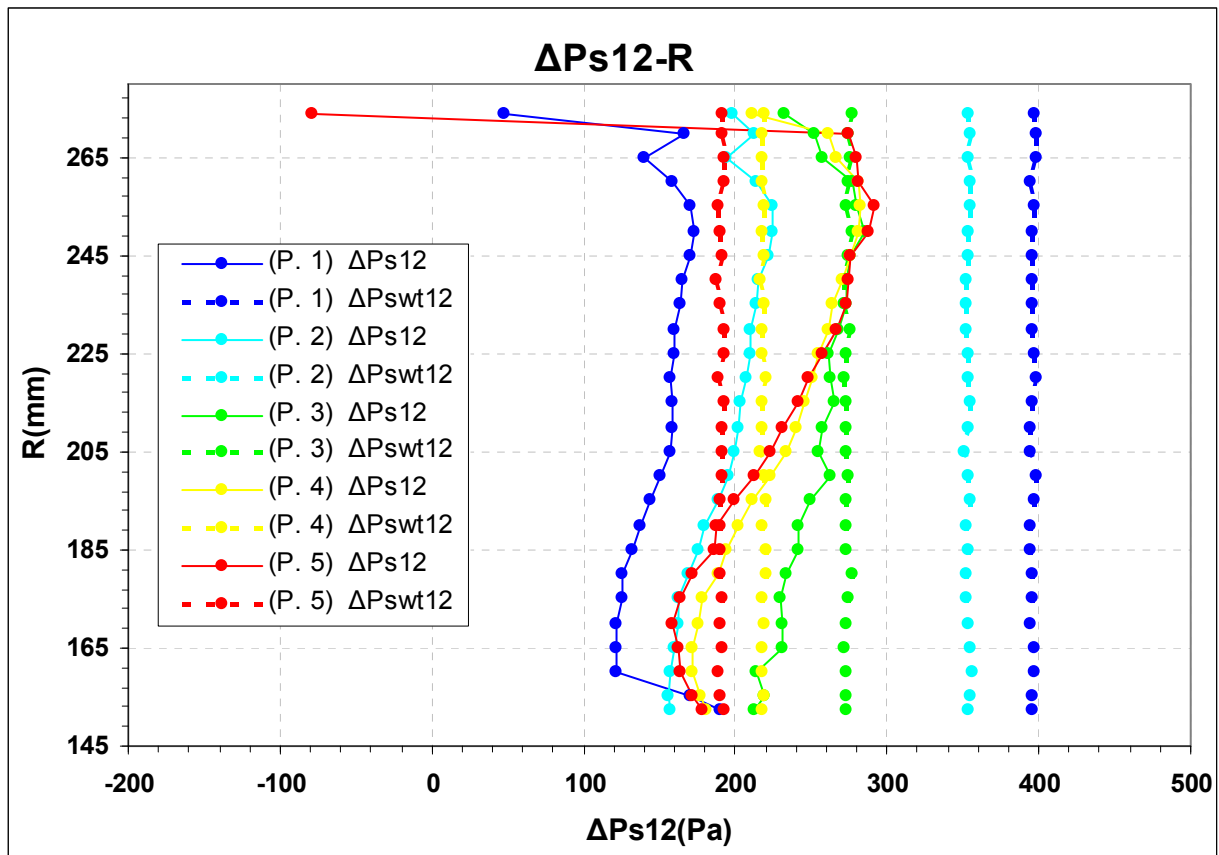
Σχήμα 4.38: Γωνίες πρόσπτωσης i_1 , i_2 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



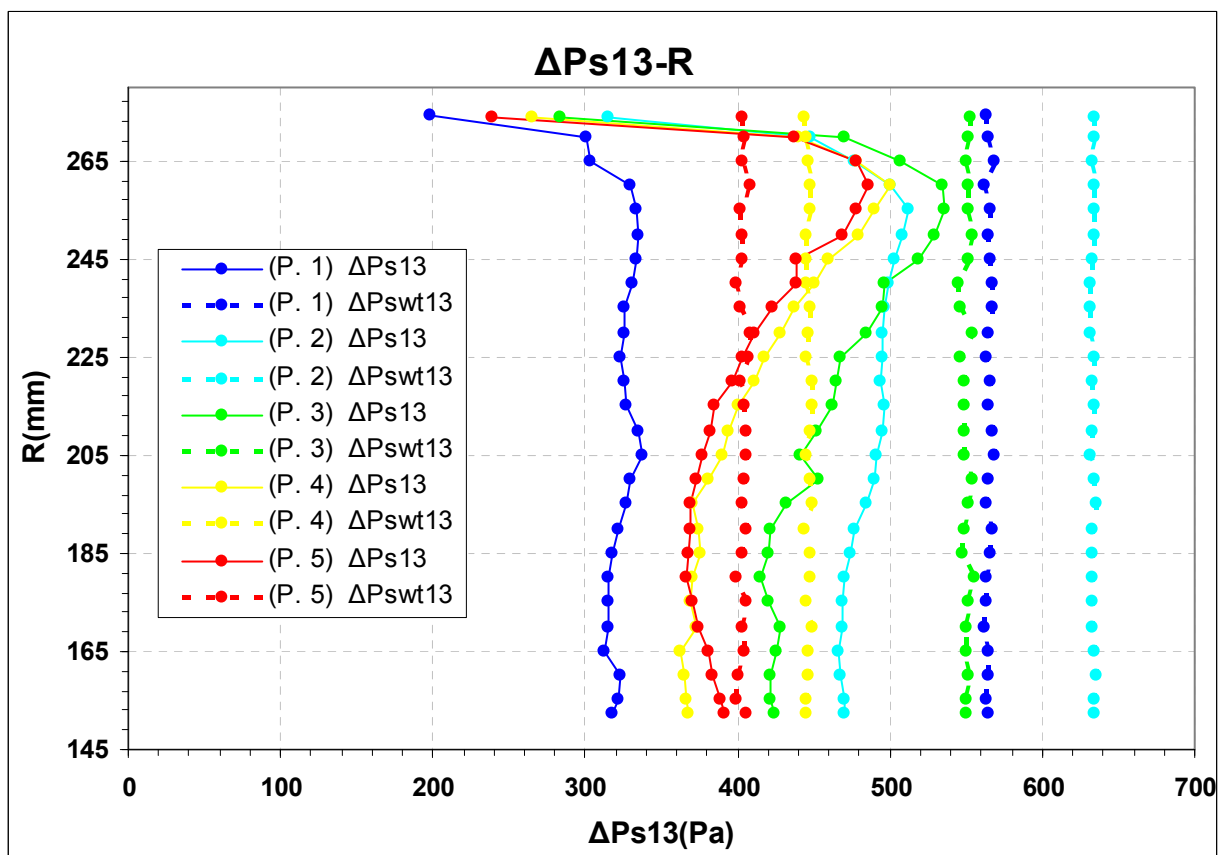
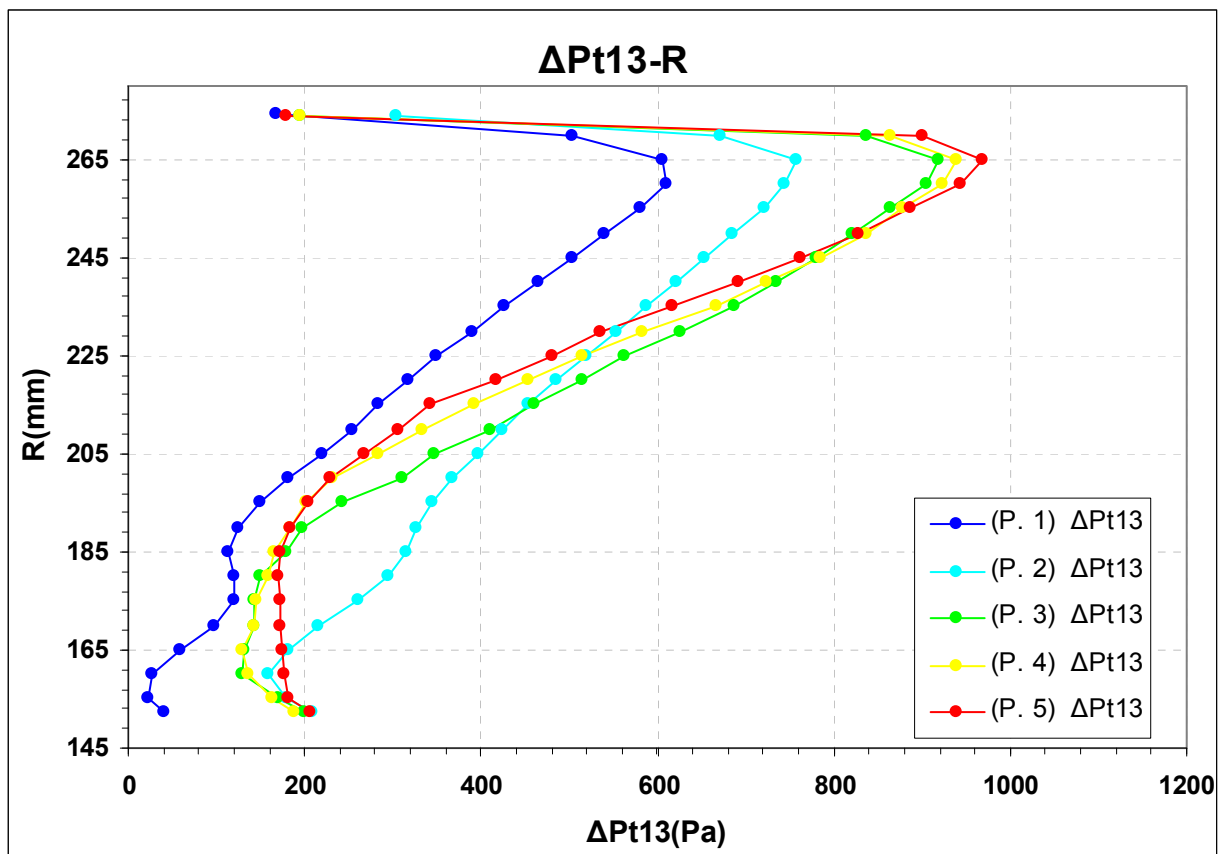
Σχήμα 4.39: Γωνίες παρέκκλισης δ_1 , δ_2 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



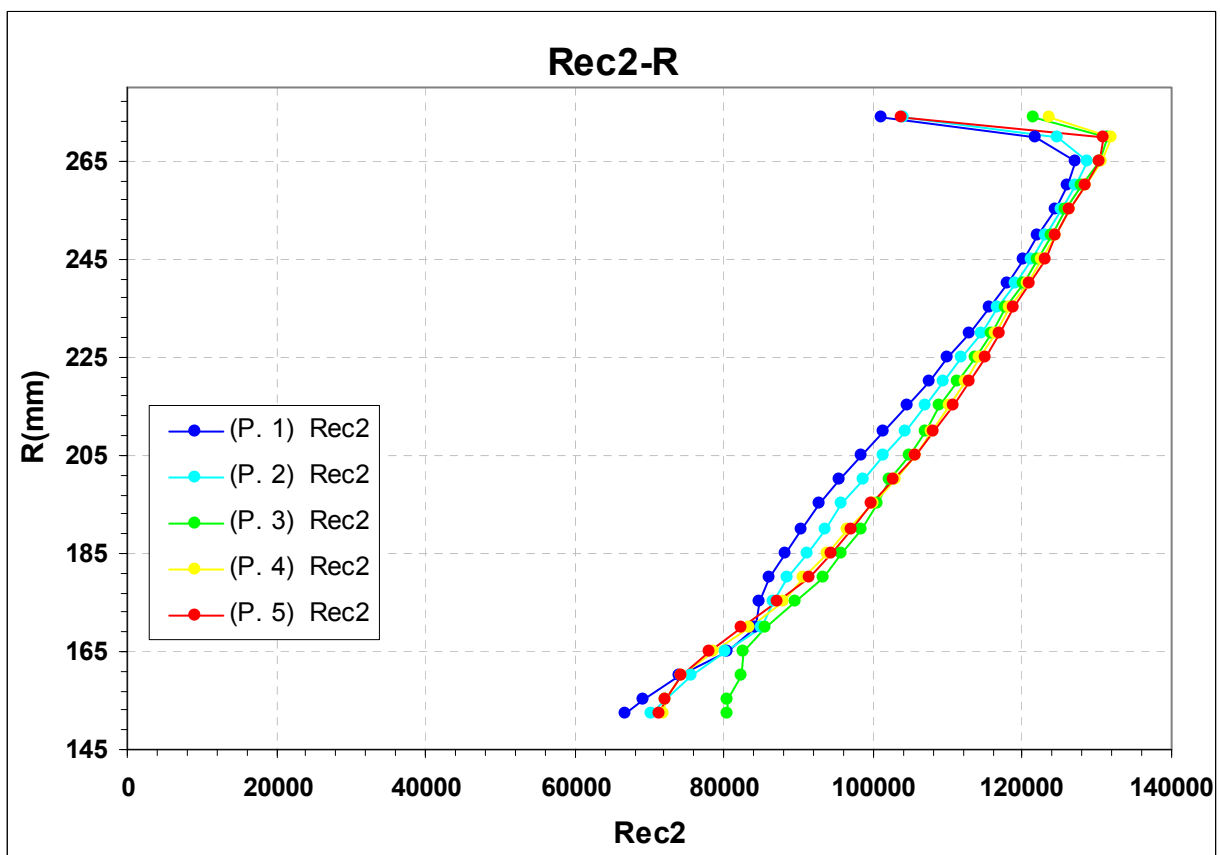
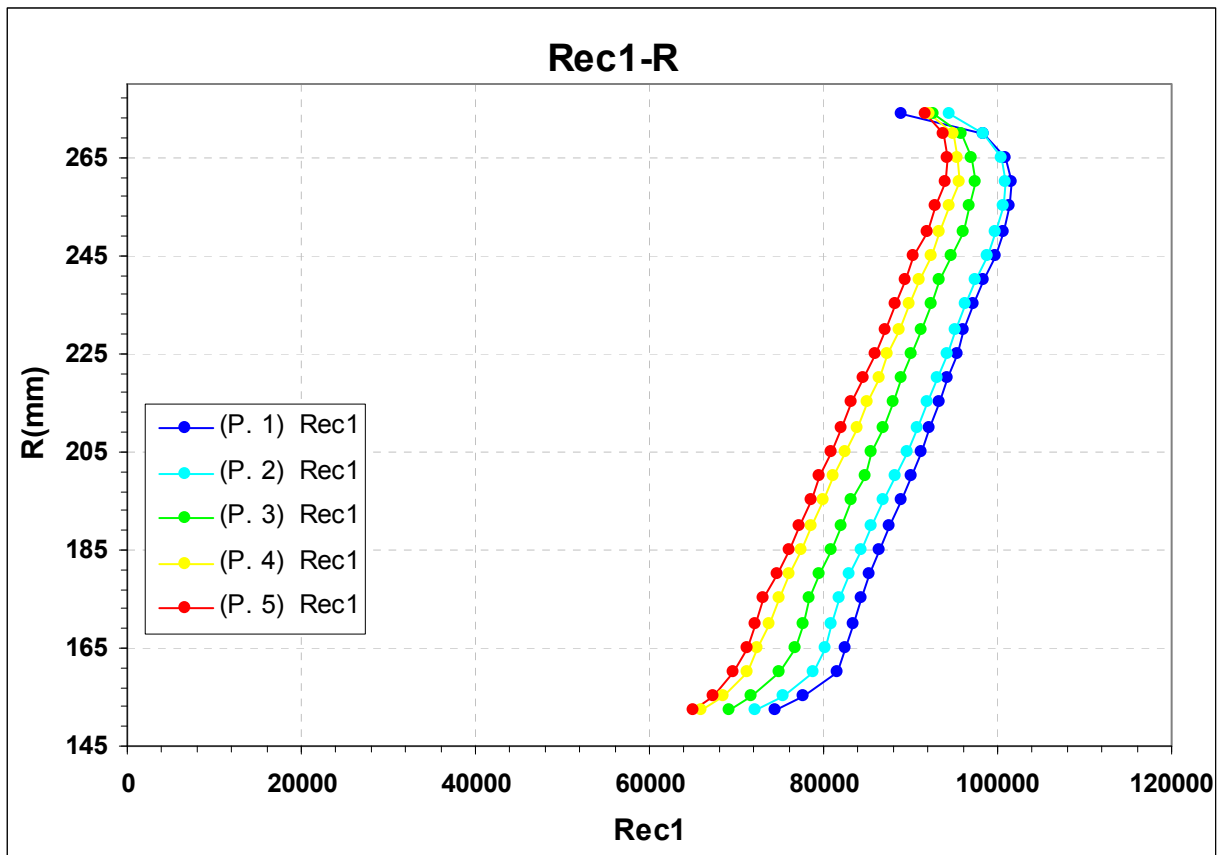
Σχήμα 4.40: Ακτινική μεταβολή ολικής πίεσης του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



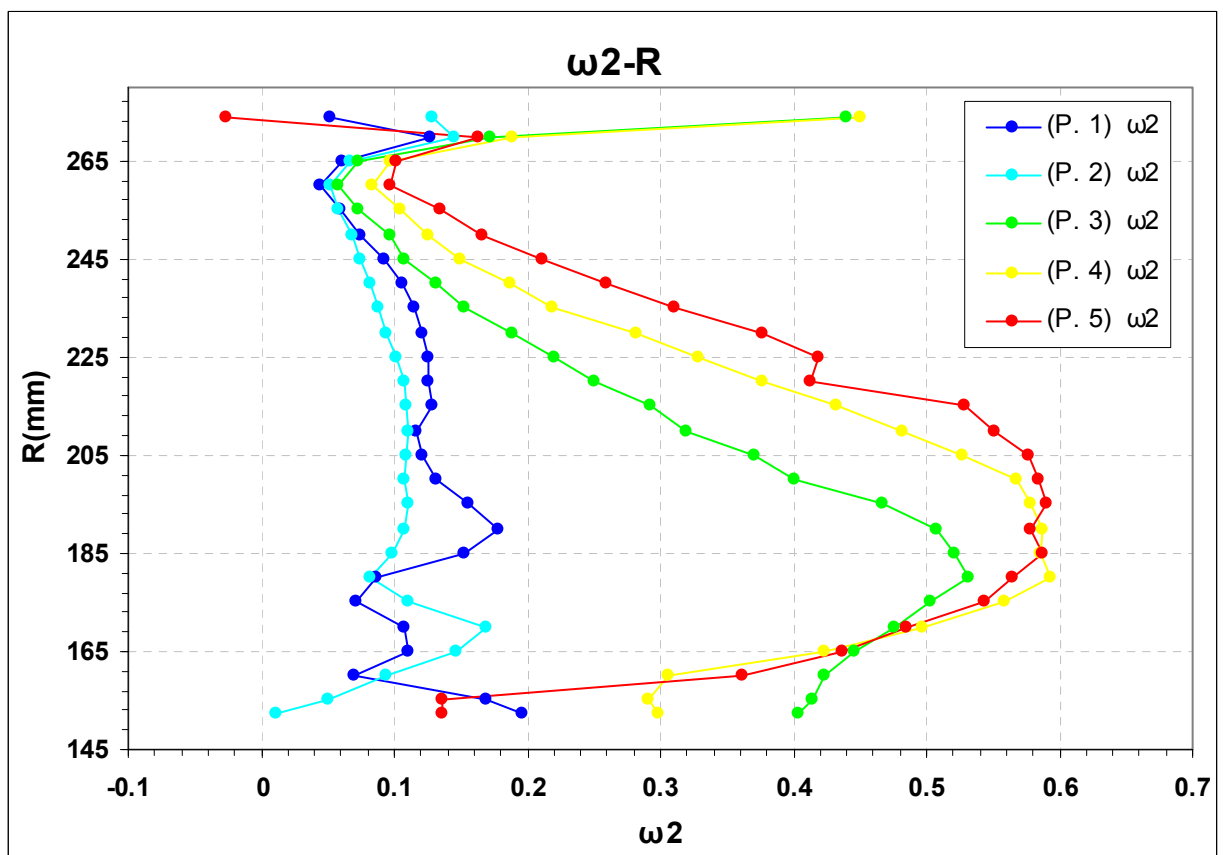
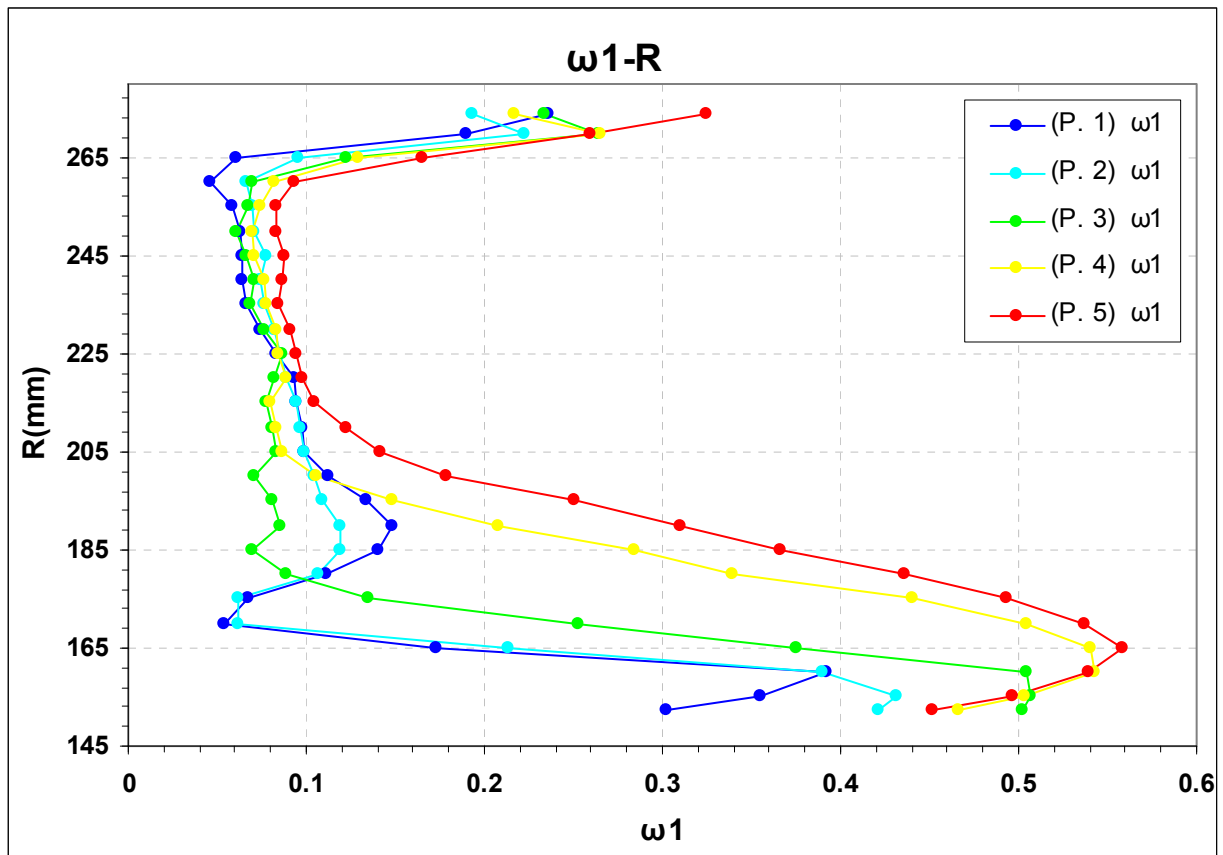
Σχήμα 4.41: Ακτινική μεταβολή στατικής πίεσης του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



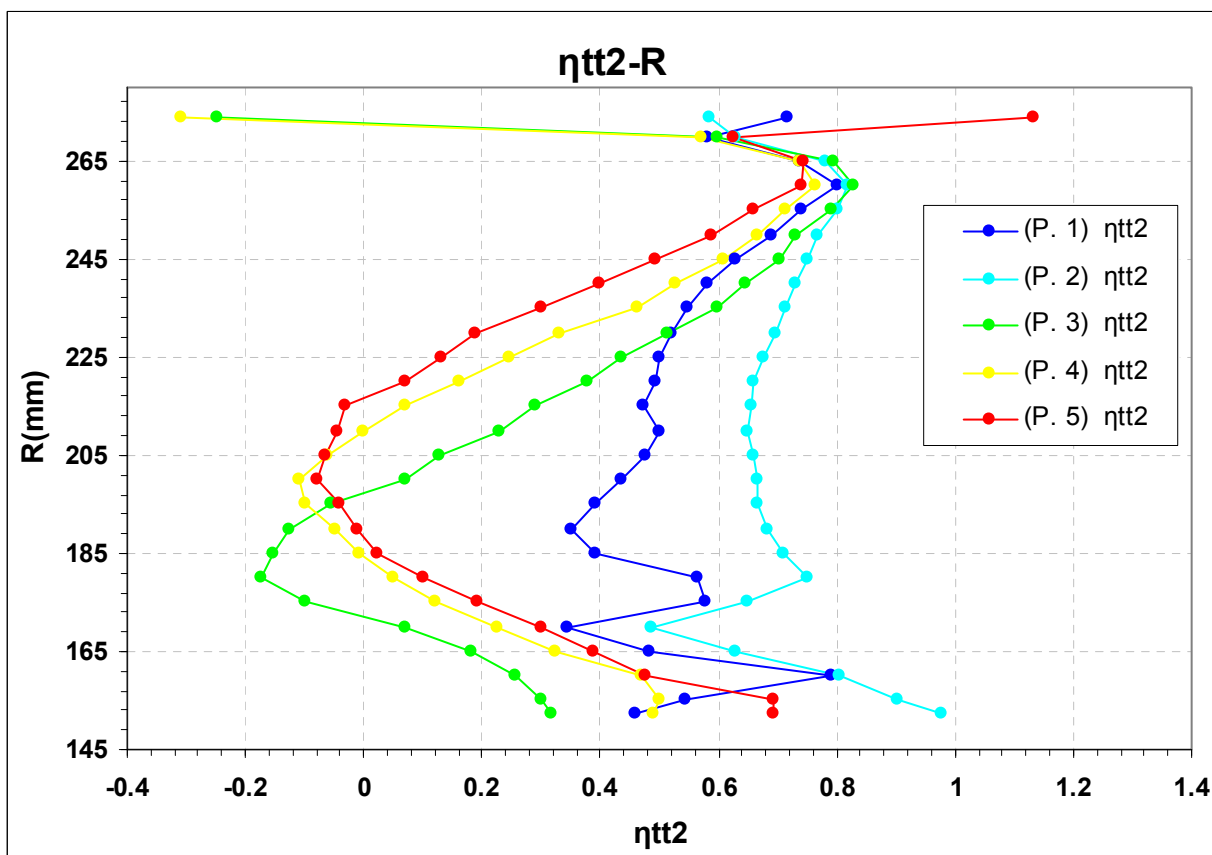
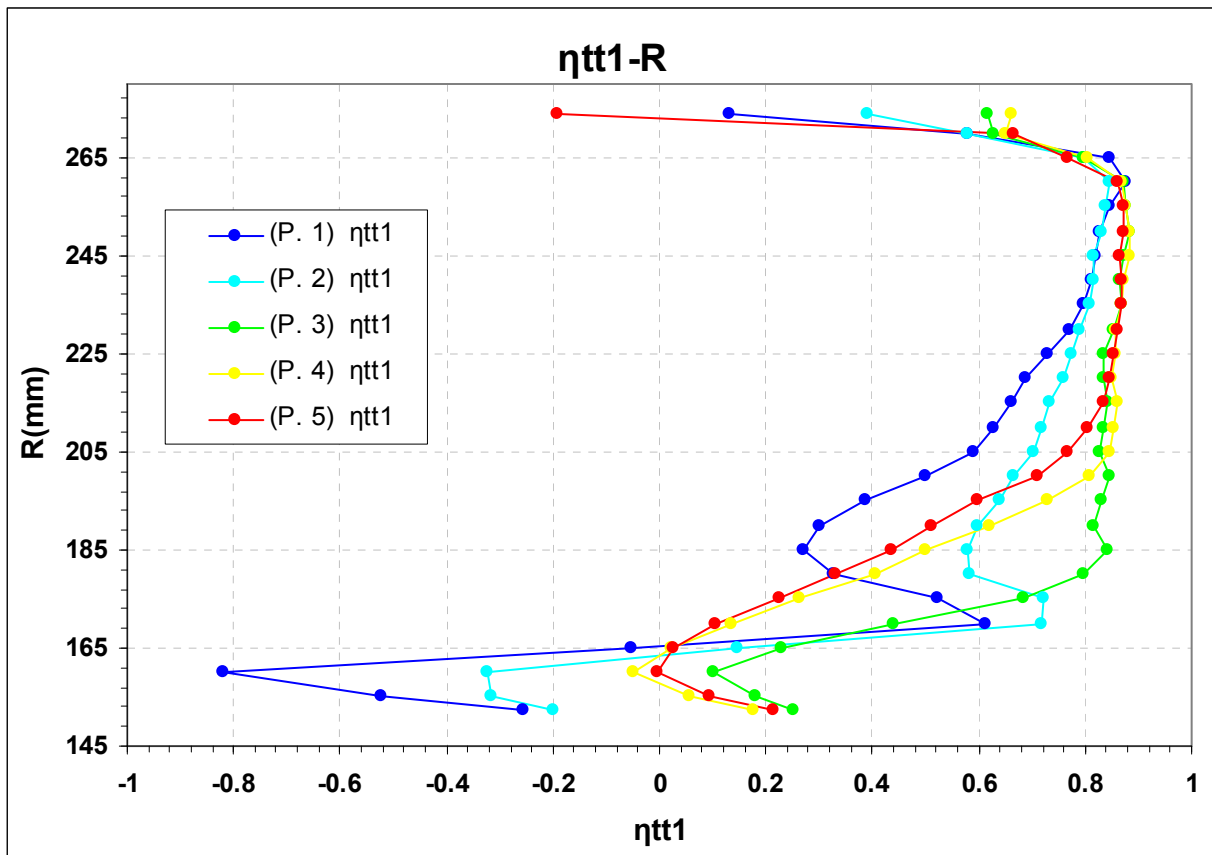
Σχήμα 4.42: Ακτινική μεταβολή ολικής και στατικής πίεσης στον συμπιεστή.



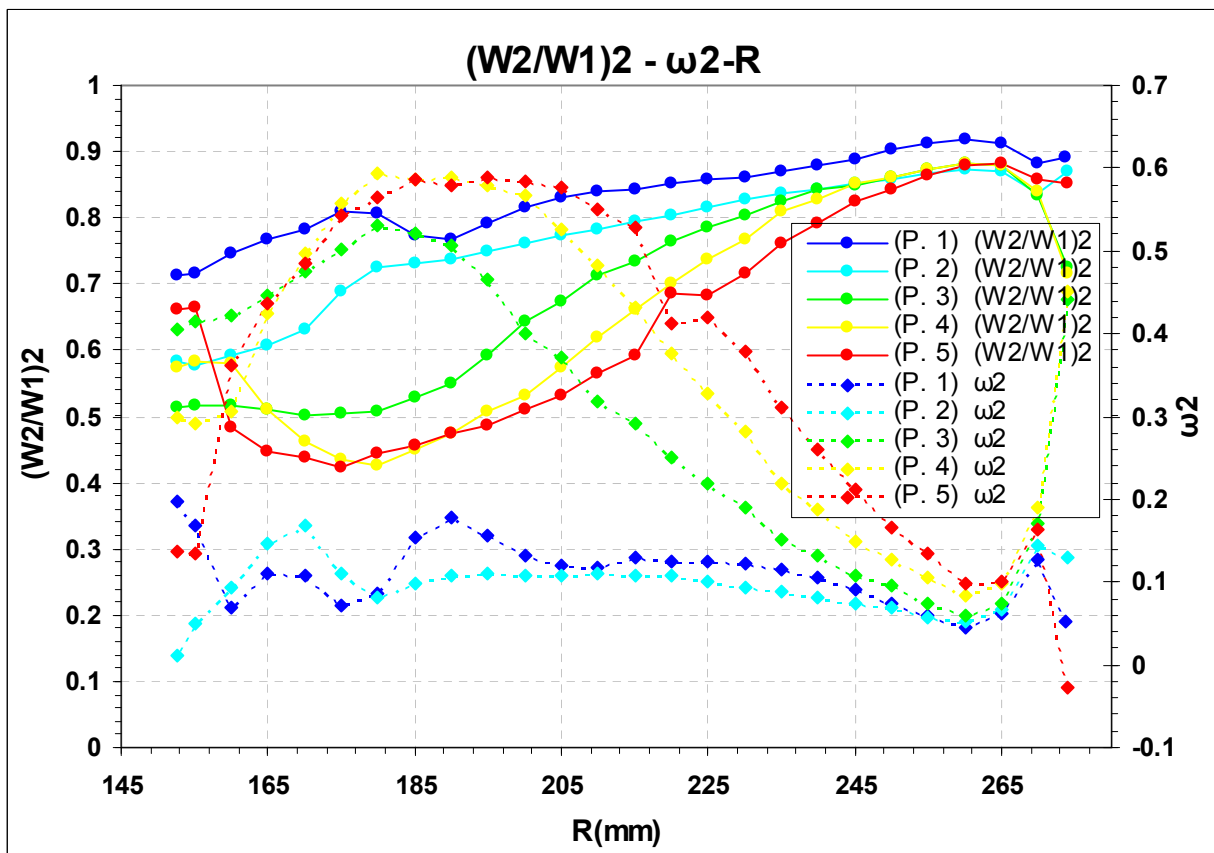
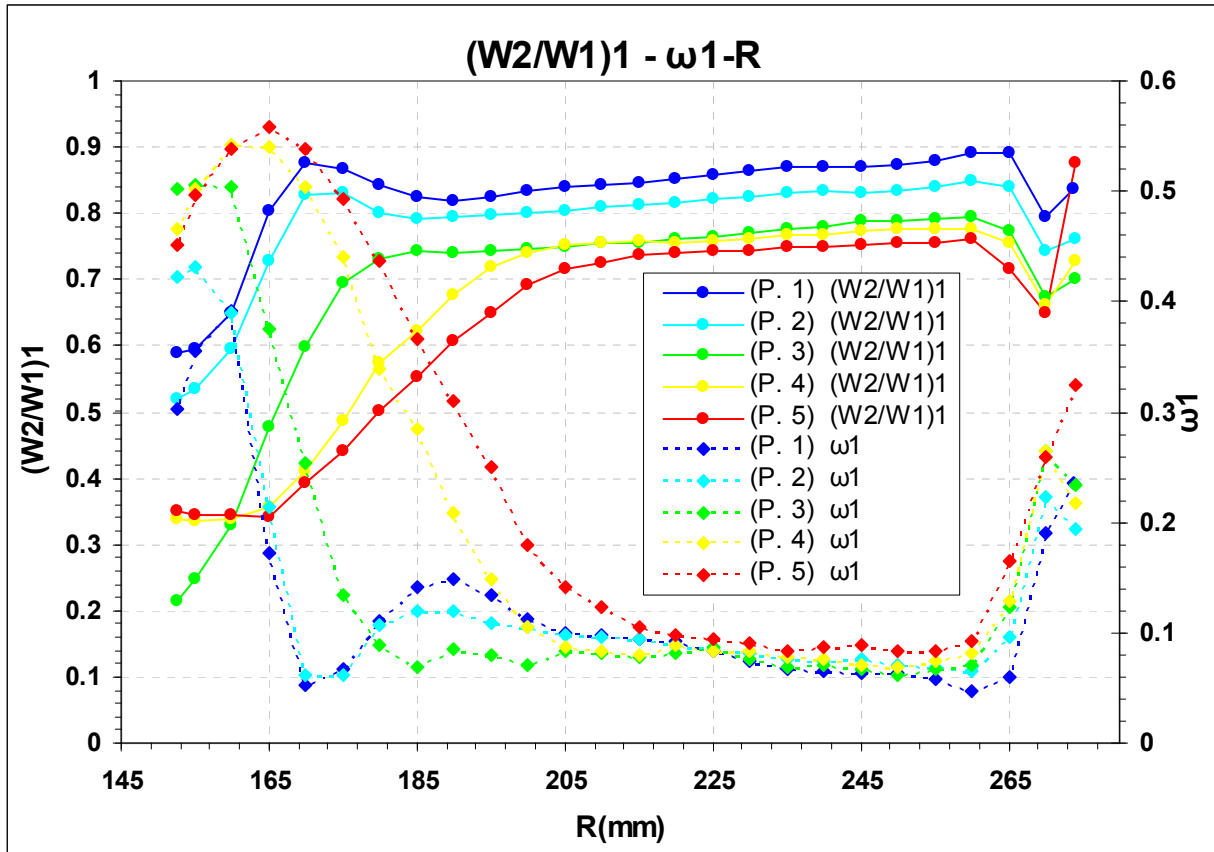
Σχήμα 4.43: Αριθμός Re_c του $1^{ου}$ και $2^{ου}$ ρότορα.



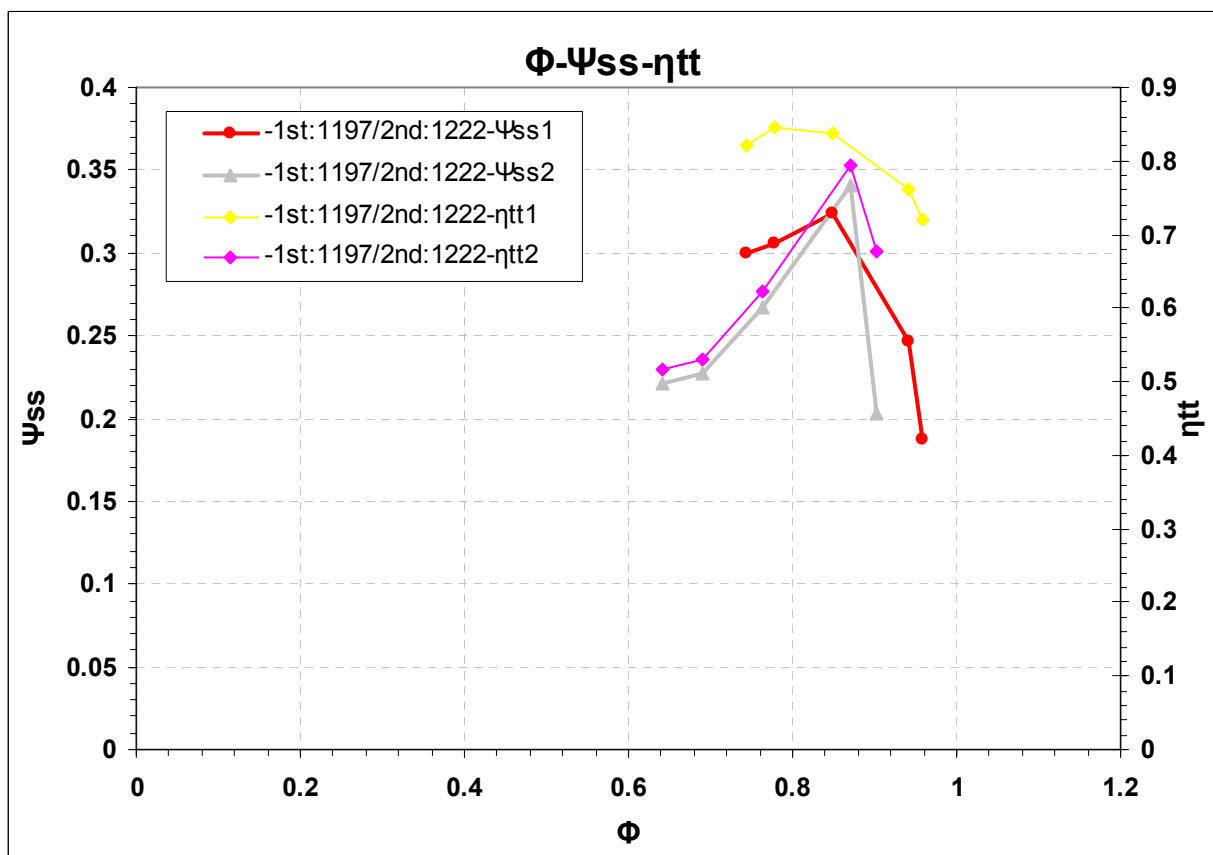
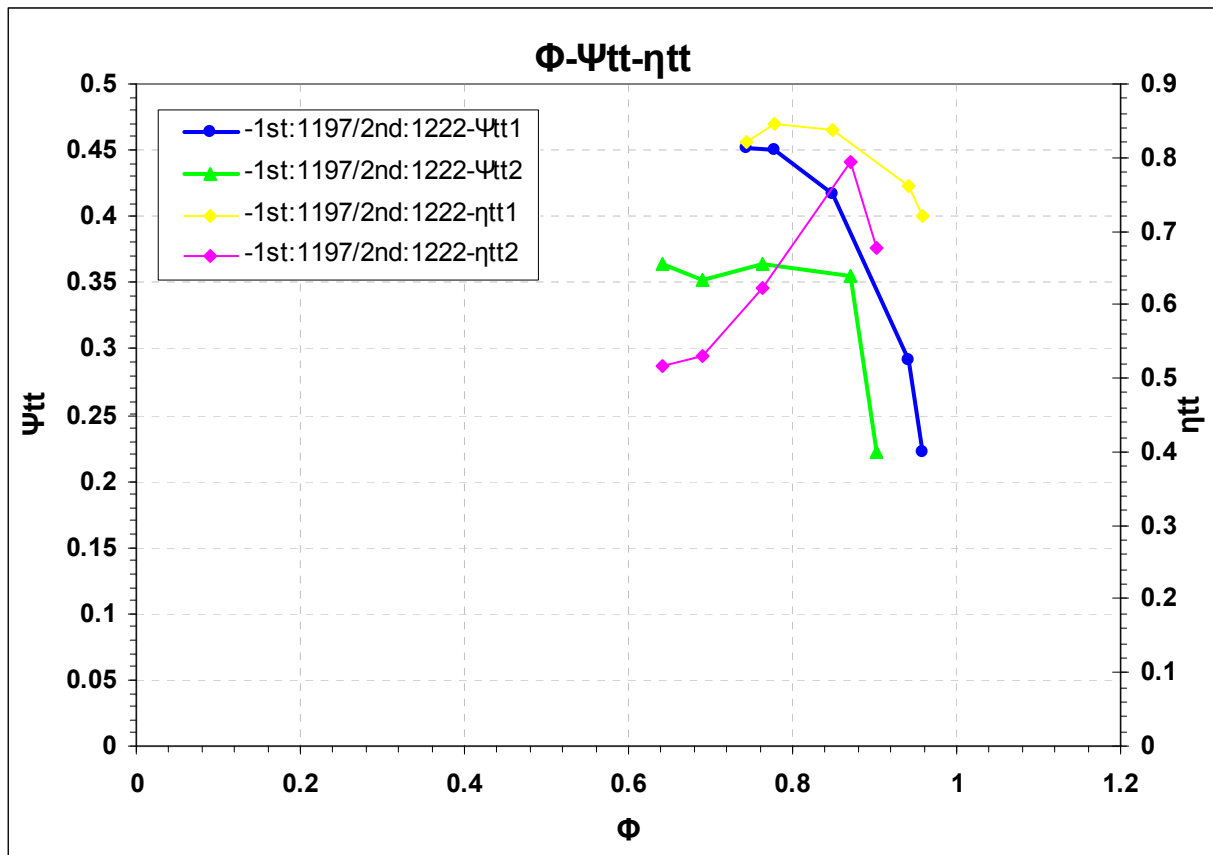
Σχήμα 4.44: Συντελεστής απωλειών ω του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



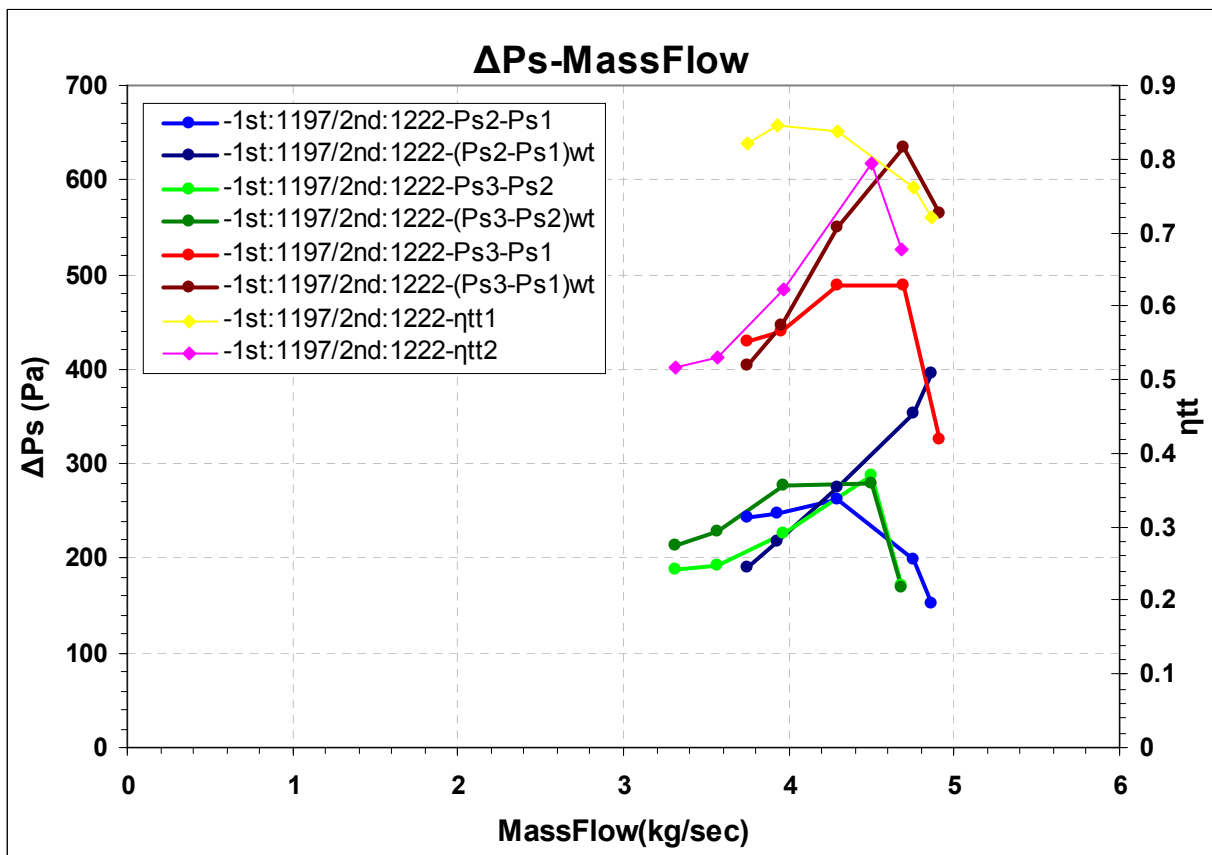
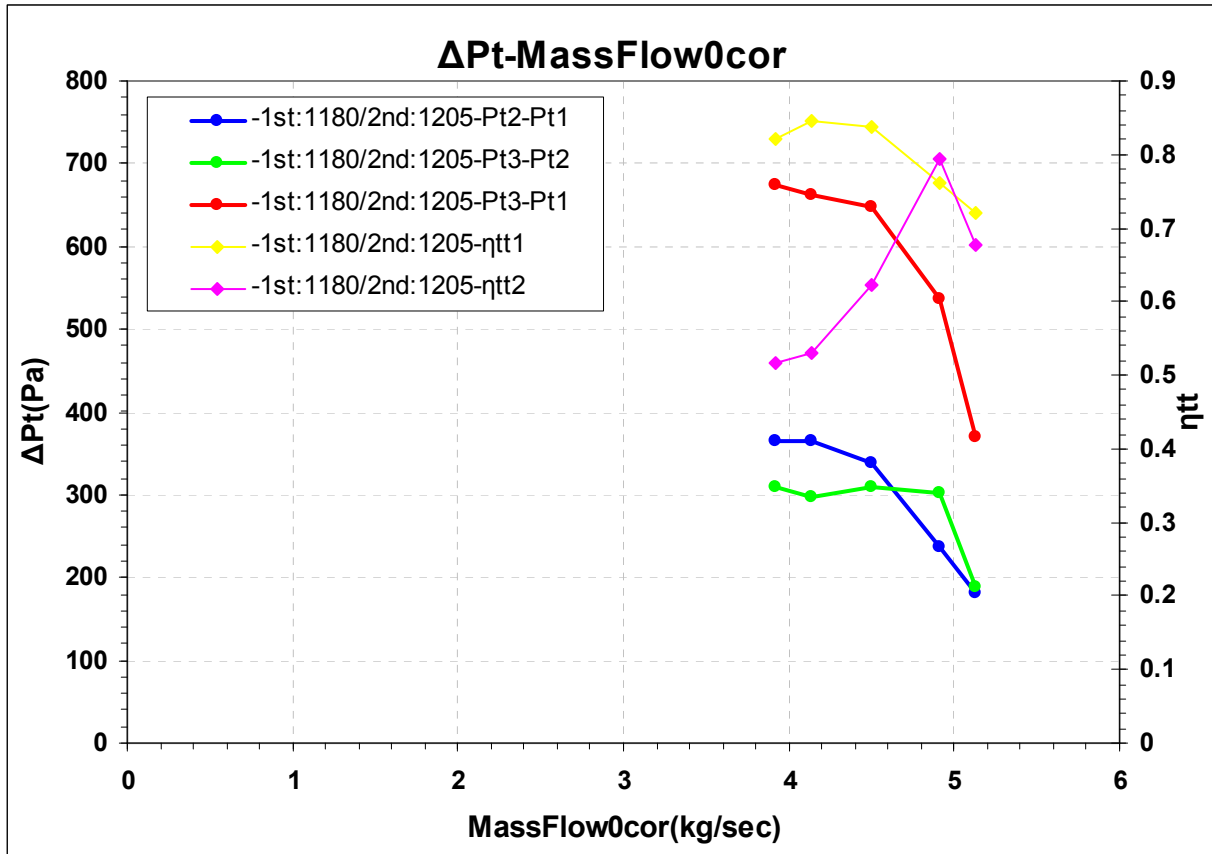
Σχήμα 4.45: Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης η_{t-t} του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



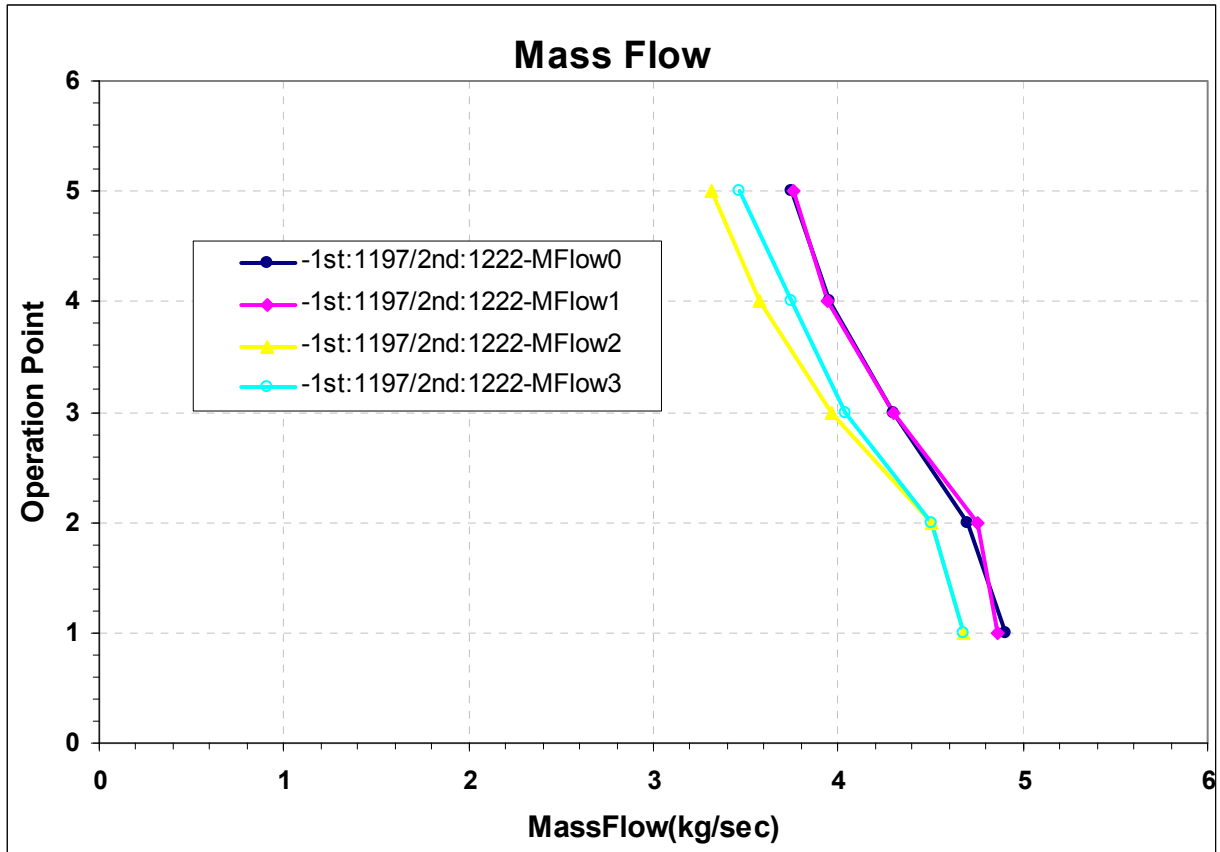
Σχήμα 4.46: Λόγος επιβράδυνσης συν/σει του συντ. απωλειών ω , του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



Σχήμα 4.47: Χαρακτηριστικές αδιάστατων συντελεστών Φ , Ψ_{is} του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



Σχήμα 4.48: Χαρακτηριστικές ΔP_t και ΔP_s συν/σει της παροχής, του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα.



Σχήμα 4.49: Παροχή που μετράμε στις θέσεις 1,2,3 και μέσω του Bellmouth.

4.5.3 Επίδραση γωνιών stagger γ , $N_1 = N_2 = 1200 \text{rpm}$.

Τα ζεύγη γωνιών stagger που μελετάμε είναι 43-53, 43-43 και 30-43 αναφερόμενοι στη γωνία stagger της μέσης ακτίνας για κάθε πτερωτή. Οι σ.α.λ. και των δύο πτερωτών είναι 1200. Στο τέλος της παραγράφου παραθέτουμε και χαρακτηριστικές λόγου πίεσης και παροχής όλου του συμπιεστή για τα παραπάνω ζεύγη γωνιών stagger αλλά και για επιπλέον ζεύγη σ.α.λ. των πτερωτών 800-1200 και 1200-1800.

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, έχουμε διαφορά στην παροχή που μετράμε με σαρώσεις, μεταξύ των θέσεων 1, 2 και 3 λόγω περιφερειακής ανομοιομορφίας. Για να έχουμε λοιπόν καλύτερη αντιστοιχία των σημείων λειτουργίας στις χαρακτηριστικές του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα, κάναμε αναγωγή του συντελεστή παροχής Φ_1 του 1^{ου} ρότορα στο Φ_2 του 2^{ου} με τον εξής τρόπο : Αφού το Φ του κάθε ρότορα υπολογίζεται βάση της παροχής εισόδου του (σχέσεις (4.111) και (4.112)), το νέο $\Phi_{1\text{new}}$ που χρησιμοποιούμε στα διαγράμματα είναι το $\Phi_{1\text{new}} = (m_2/m_1) \cdot \Phi_1$.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 1^ο Ρότορα (Σχήμα 4.50).

Παρατηρούμε πως οι καμπύλες για ζεύγη γωνιών γ 43-53 και 43-43 σχεδόν ταυτίζονται. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο αφού οι γωνίες εισόδου του 1^{ου} ρότορα παραμένουν σταθερές (αξονική ομοιόμορφη ροή στην είσοδο ανεξαρτήτως στροφών και παροχής). Ουσιαστικά, αυτό είναι το χαρακτηριστικό των περιστρεφόμενων πτερυγώσεων να κρατάνε αναλλοίωτες τις Φ - Ψ για σταθερές απόλυτες γωνίες εισόδου. Παρατηρούμε επίσης ότι στη χαρακτηριστική για γωνίες γ 43-43 βλέπουμε μεγαλύτερο κομμάτι της χαρακτηριστικής που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο Φ και αυτό είναι λογικό αφού από μείωση της γ_2 από 53° σε 43° τα πτερύγια του 2^{ου} ρότορα βλέπουν πιο αξονικά τη ροή με αποτέλεσμα να αυξάνεται η παροχή.

Στο ζεύγος γωνιών γ 30-43 η Φ - Ψ του 1^{ου} ρότορα έχει μετατοπιστεί επάνω και δεξιά σε σχέση με την Φ - Ψ για 43-43. Αυτό είναι λογικό αφού τα πτερύγια του 1^{ου} ρότορα βλέπουν πιο αξονικά τη ροή με αποτέλεσμα να αυξάνεται η παροχή. Παράλληλα, επειδή η ροή εισόδου του 1^{ου} ρότορα είναι αξονική ($\alpha_1 = \pm 1.5^\circ$) πάντα, και οι στροφές είναι σταθερές, σημαίνει ότι και η σχετική γωνία εισόδου β_1 θα είναι σταθερή για μια ίδια παροχή, άρα αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης και συνεπώς και η γωνία απόκλισης θ_1 (στροφή ροής) αφού η γωνία παρέκκλισης δ_1 δε μεταβάλλεται σημαντικά. Έτσι, έχουμε αύξηση της ολικής ενθαλπίας h_{t12} (Θ . Euler) άρα αύξηση του Ψ . Η ακτινική κατανομή της γωνίας απόκλισης για $\Phi=0.8$ για τα ζεύγη γωνιών γ 43-43 και 30-43 φαίνεται στο Σχήμα 4.54 όπου παρατηρούμε την αυξημένη γωνία απόκλισης για το ζεύγος γ 30-43, όπως περιγράψαμε παραπάνω.

Παράλληλα, για τη χαρακτηριστική 30-43 παρατηρούμε μια οριζοντίωση και πλάτυνση της Φ - Ψ που σημαίνει ότι μεγαλώνει το περιθώριο λειτουργίας η μείωση της γωνίας stagger του 1^{ου} ρότορα.

Αντίστοιχα ισχύουν και για τους βαθμούς απόδοσης των πτερωτών, όπου και εδώ βλέπουμε ότι η καμπύλη η - Φ για γ 30-43 παρουσιάζει αυξημένο β.α. για μεγάλο εύρος παροχής.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.51).

Παρατηρούμε πως με μείωση της γωνίας stagger του 2^{ου} ρότορα γ_2 από 53° σε 43° (καμπύλη 43-43) έχουμε μετατόπιση της χαρακτηριστικής προς μεγαλύτερα Φ και Ψ , γεγονός που αιτιολογείται με τον ίδιο τρόπο όπως και στον 1^ο ρότορα που αναλύσαμε παραπάνω. Και εδώ μπορούμε να δούμε ότι για $\Phi=0.9$ το προφίλ της θ_2 για την χαρακτηριστική 43-43 δίνουν μεγαλύτερες γωνίες απόκλισης από ότι το προφίλ της θ_2 για την χαρακτηριστική 43-53 (βλ. Σχήμα 4.55).

Με διατήρηση της γ_2 στις 43° (καμπύλη 43-43) και μείωση της γ_1 σε 30° (καμπύλη 30-43) παρατηρούμε μετατόπιση της Φ - Ψ του 2^{ου} ρότορα προς τα δεξιά. Αυτό που γίνεται είναι ότι αλλάζει η σχετική γωνία εισόδου β_{22} του 2^{ου} ρότορα η οποία μάλιστα αυξάνεται όσο μειώνεται η γ_1 αφού αυξάνεται κατά απόλυτη τιμή η απόλυτη γωνία εισόδου στον 2^ο ρότορα α_{22} . Έτσι λοιπόν, εφόσον η σχετική γωνία εξόδου β_3 δεν μεταβάλλεται σημαντικά (όσο η ροή δεν είναι αποκολλημένη), η αύξηση της β_{22} σημαίνει αύξηση της γωνίας απόκλισης θ_2 για το ίδιο Φ , άρα και αύξηση της ολικής ενθαλπίας, άρα του Ψ . Θα περίμενε κανείς ότι θα είχαμε και μετατόπιση της Φ - Ψ και προς τα πάνω εκτός από δεξιά, όμως ο ρότορας σε σταθερές σ.α.λ. και σταθερή γεωμετρία έχει μια συγκεκριμένη ικανότητα αύξησης της ενέργειας του ρευστού η οποία εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και τον Re_c . Έτσι, για ένα μεγάλο εύρος γωνιών πρόσπτωσης (θετικές και αρνητικές) του 2^{ου} ρότορα θα έχουμε ένα αντίστοιχο εύρος γωνιών απόκλισης, άρα και Δh , άρα Ψ . Άρα λοιπόν, με τη μείωση της γ_1 αυξάνουμε την παροχή και αλλάζουμε ουσιαστικά το Φ στο οποίο ο 2^{ος} ρότορας θα έχει το ίδιο Ψ , γι αυτό η Φ - Ψ μετατοπίζεται μόνο δεξιά.

Αυτό μπορούμε να το δείξουμε και μέσω της εξής ανάλυσης στη μέση ακτίνα : Εφόσον το ρευστό το θεωρούμε ασυμπίεστο και το κανάλι ροής έχει σταθερό εμβαδόν σε όλες τις θέσεις (1, 2 και 3) τότε από την εξίσωση της συνέχειας μπορούμε να δούμε ότι η αξονική ταχύτητα είναι ίδια για όλες τις θέσεις. Έτσι, μέσω του ορισμού των αδιάστατων παραμέτρων Φ_I , Ψ_I , Φ_{II} , Ψ_{II} για τον 1^ο και 2^ο ρότορα αντίστοιχα, μπορούμε να καταλήξουμε στην σχέση (4.134) (η απόδειξη είναι απλή και βρίσκεται στο [20]).

$$\tan \beta_{22} = -\tan \beta_{21} - (R_U + 1) \frac{1}{\Phi_I} \quad (4.134)$$

Όμως, ισχύει ότι :

$$\Psi_{II} = \Phi_{II} \cdot (\tan \beta_3 - \tan \beta_{22}) \Rightarrow \tan \beta_3 - \tan \beta_{22} = \frac{\Psi_{II}}{\Phi_{II}} \quad (4.135)$$

αλλά και :

$$\Phi_{II} = \frac{V_a}{U_{II}} = \frac{V_a U_I}{U_I U_{II}} = \frac{\Phi_I}{R_U} \quad (4.136)$$

Έτσι, αν προσθέσουμε και στα δύο μέλη της σχέσης (4.134) τον όρο $-\tan \beta_3$ έχουμε :

$$-\tan \beta_3 + \tan \beta_{22} = -\tan \beta_3 - \tan \beta_{21} - (R_U + 1) \frac{1}{\Phi_I} \quad (4.137)$$

Άρα, μέσω των σχέσεων (4.135) έως (4.137) καταλήγουμε στη σχέση :

$$\Phi_{II} = \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{21} + \tan \beta_3} \stackrel{\text{Στο σημείο σχεδίασης}}{=} \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{12}' + \tan \beta_{22}'}, \text{ (προσημασμένες οι } \beta) \quad (4.138)$$

$\begin{matrix} \tan \beta_{21} = \tan \beta_{12}' \\ \tan \beta_3 = \tan \beta_{22}' \end{matrix}$

Όπως βλέπουμε, η σχέση (4.138) είναι μια συνάρτηση του Φ - Ψ που εξαρτάται μόνο από το λόγο στροφών R_U και από τις σχετικές γωνίες εξόδου από τους ρότορες οι οποίες στο σημείο σχεδίασης (βέλτιστου β.α.) είναι σχεδόν ίσες με τις γωνίες εξόδου μετάλλου.

Έτσι λοιπόν βλέπουμε ότι αν στη σχέση (4.138) κρατήσουμε σταθερό το R_U και το Ψ και μειώσουμε τη γωνία stagger του 1^{ου} ρότορα θα μειωθεί ανάλογα και το $\tan \beta_{12}'$ (κατά απόλυτη τιμή). Έτσι, ο παρονομαστής της σχέσης (4.138) θα μειωθεί, άρα θα αυξηθεί το Φ στο οποίο έχουμε το ίδιο Ψ . Άρα για τον ίδιο λόγο στροφών R_U , με μείωση της γωνίας stagger του 1^{ου} ρότορα έχουμε μετατόπιση της χαρακτηριστικής του 2^{ου} σε μεγαλύτερα Φ , άρα δεξιότερα.

Παράλληλα, για τη χαρακτηριστική 30-43 παρατηρούμε μια πλάτυνση της Φ - Ψ που σημαίνει ότι μεγαλώνει το περιθώριο λειτουργίας του 2^{ου} ρότορα η μείωση της γωνίας stagger του 1^{ου} ρότορα.

Παρόμοια συμπεριφορά του 2^{ου} ρότορα παρατηρούμε και για τα υπόλοιπα ζεύγη στροφών 800-1200 και 1200-1800 στο Σχήμα 4.52 και Σχήμα 4.53 αντίστοιχα, που αντιστοιχούν σε λόγο στροφών $R_U=1.5$. Βέβαια, και στα δύο αυτά διαγράμματα φαίνεται ότι η χαρακτηριστική Φ - Ψ για γωνίες κλίσης 43-43 είναι χαμηλότερα από την 30-43 και αυτό οφείλεται στο ότι η 43-43 για λόγο στροφών 1.5 στολάρει πολύ γρήγορα λόγω των πολύ μεγάλων γωνιών πρόσπτωσης, ήδη από μεγάλες παροχές.

Ο βαθμός απόδοσης του 2^{ου} ρότορα παρατηρούμε ότι για όλα τα ζεύγη γωνιών stagger, ξεκινάει από μεγάλες τιμές για τη μέγιστη παροχή και ελαττώνεται με τη μείωση της παροχής. Αυτό οφείλεται στο ότι "βλέπει" μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης ήδη από

μεγάλες παροχές επειδή "βλέπει" τη ροή που εξέρχεται από τον 1^ο ρότορα, με αποτέλεσμα όσο μειώνεται η παροχή να αυξάνεται ακόμα περισσότερο η γωνία πρόσπτωσης του 2^{ου} ρότορα αφού αυξάνεται η γωνία στροφής του 1^{ου}, και ταυτόχρονα μειώνεται η αξονική ταχύτητα. Έτσι, οδηγείται ο 2^{ος} πιο σύντομα στην αποκόλληση.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για stagger 43-53 για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.56).

Παρατηρούμε ότι οι δύο καμπύλες ξεκινάνε μαζί για μεγάλο Φ , αλλά ο 2^{ος} ρότορας στολάρει πρώτος. Αν δούμε τα προφίλ των γωνιών εισόδου, πρόσπτωσης και παρέκκλισης (βλ. προηγούμενη παράγραφο) για τους δύο ρότορες, θα παρατηρήσουμε ότι ο 2^{ος} ρότορας από το tip έως τη μέση ακτίνα δουλεύει με γωνίες πρόσπτωσης -20° έως -5° , όμως από τη μέση ακτίνα και κάτω δουλεύει αποκολλημένος. Όπως έχουμε αναλύσει στην προηγούμενη παράγραφο, αυτό συμβαίνει λόγω των έντονων 3Δ φαινομένων που προκαλούνται από την αποκολλημένη ροή στο πόδι του 1^{ου} ρότορα. Έτσι, αν οι γωνίες εξόδου του 1^{ου} στο πόδι, και κατ' επέκταση οι γωνίες εισόδου του 2^{ου} ήταν πιο "λογικές" η καμπύλη του 2^{ου} ρότορα θα ταυτιζόταν σχεδόν με αυτήν του 1^{ου}.

Αντίστοιχα ισχύουν και για τον βαθμό απόδοσης.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για stagger 43-43 για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.57).

Παρατηρούμε ότι ο 2^{ος} ρότορας παρουσιάζει υψηλότερη φόρτιση από τον 2^ο, αυτό είναι φυσιολογικό αφού στο ίδιο σ.λ. ο 1^{ος} ρότορας βλέπει μικρότερες γωνίες εισόδου απ' ότι ο 2^{ος} με αποτέλεσμα ο τελευταίος να προκαλεί μεγαλύτερη στροφή στη ροή, άρα να φορτίζεται περισσότερο. Για τον ίδιο λόγο μάλιστα, ο 2^{ος} στολάρει και πριν από τον 1^ο αφού η γωνία πρόσπτωσης του 2^{ου} μεγαλώνει πριν από αυτήν του 1^{ου}. Αυτό φαίνεται και από τον βαθμό απόδοσης όπου για τον 2^ο έχουμε μεγαλύτερο β.α. στη μέγιστη παροχή (άρα Φ).

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για stagger 30-43 για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.58).

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες για τους 2 ρότορες σχεδόν ταυτίζονται, με το 2^ο όμως να στολάρει πριν τον 1^ο. Εδώ ισχύει τι ίδιο με την περίπτωση για γωνίες stagger 43-53. Δηλαδή, οι δύο ρότορες βλέπουν σχεδόν ταυτόχρονα τις ίδιες γωνίες στην είσοδό τους για τους λόγους που εξηγήσαμε προηγουμένως. Βέβαια, το ότι οι δύο ρότορες φορτίζονται σχεδόν το ίδιο έχει να κάνει με το ζεύγος στροφών και γωνιών stagger που επιλέξαμε.

$\pi_c - m_{ocor}$ για τον 1^ο και τον 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.59 και Σχήμα 4.60).

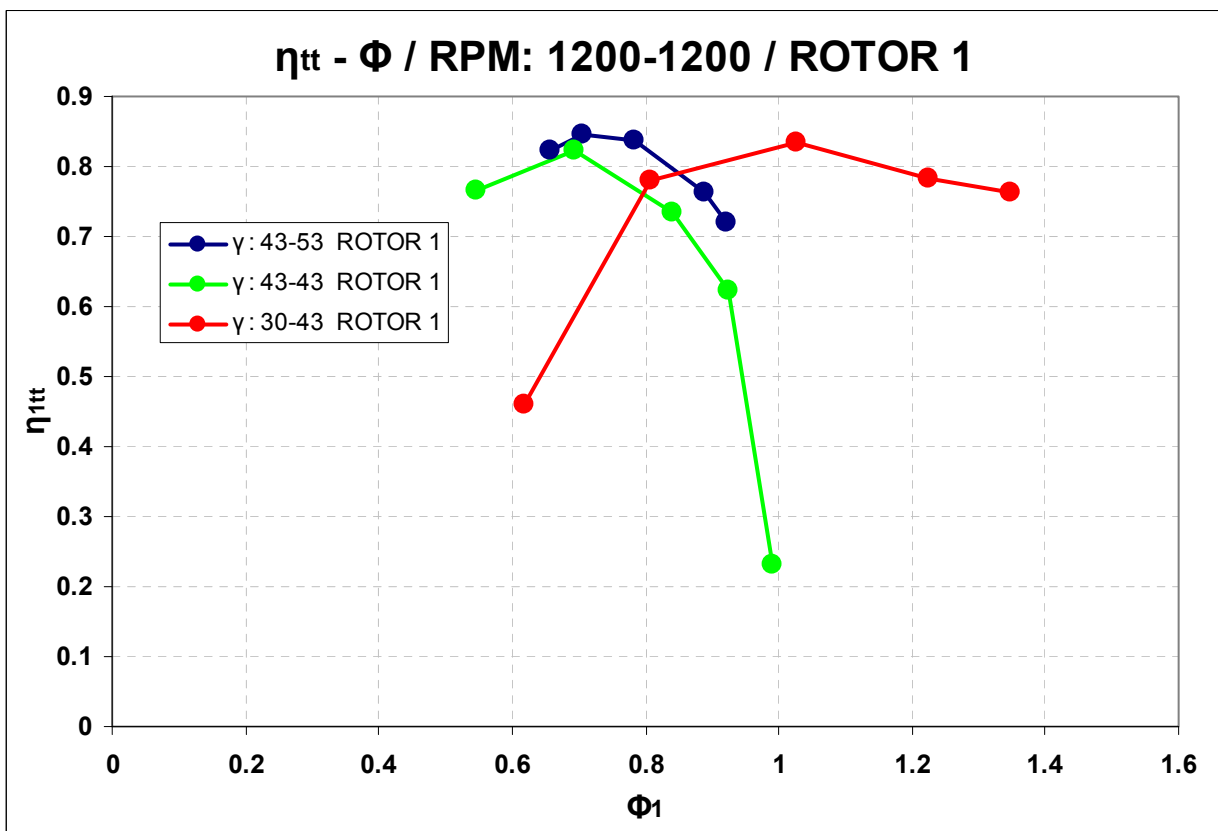
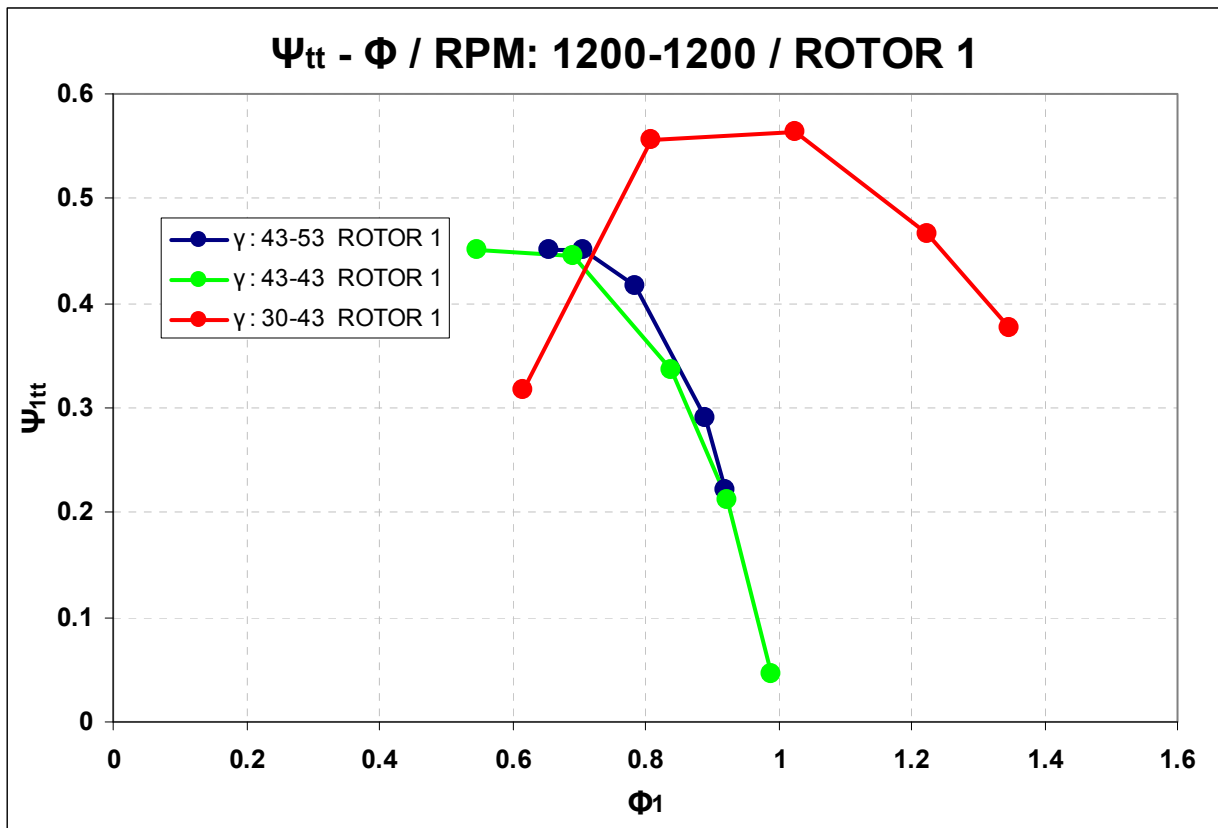
Παρατηρούμε ότι οι χαρακτηριστικές λόγου πίεσης των βαθμίδων συναρτήσει της διορθωμένης παροχής έχουν την αναμενόμενη, ίδια μορφή με τα αντίστοιχα διαγράμματα Φ-Ψ.

$\pi_c - m_{0cor}$ του συμπιεστή για ζεύγη στροφών 800-1200, 1200-1200, 1200-1800 και ζεύγη γωνιών stagger 43-53, 43-43, 30-43 (Σχήμα 4.61, Σχήμα 4.62 και Σχήμα 4.63).

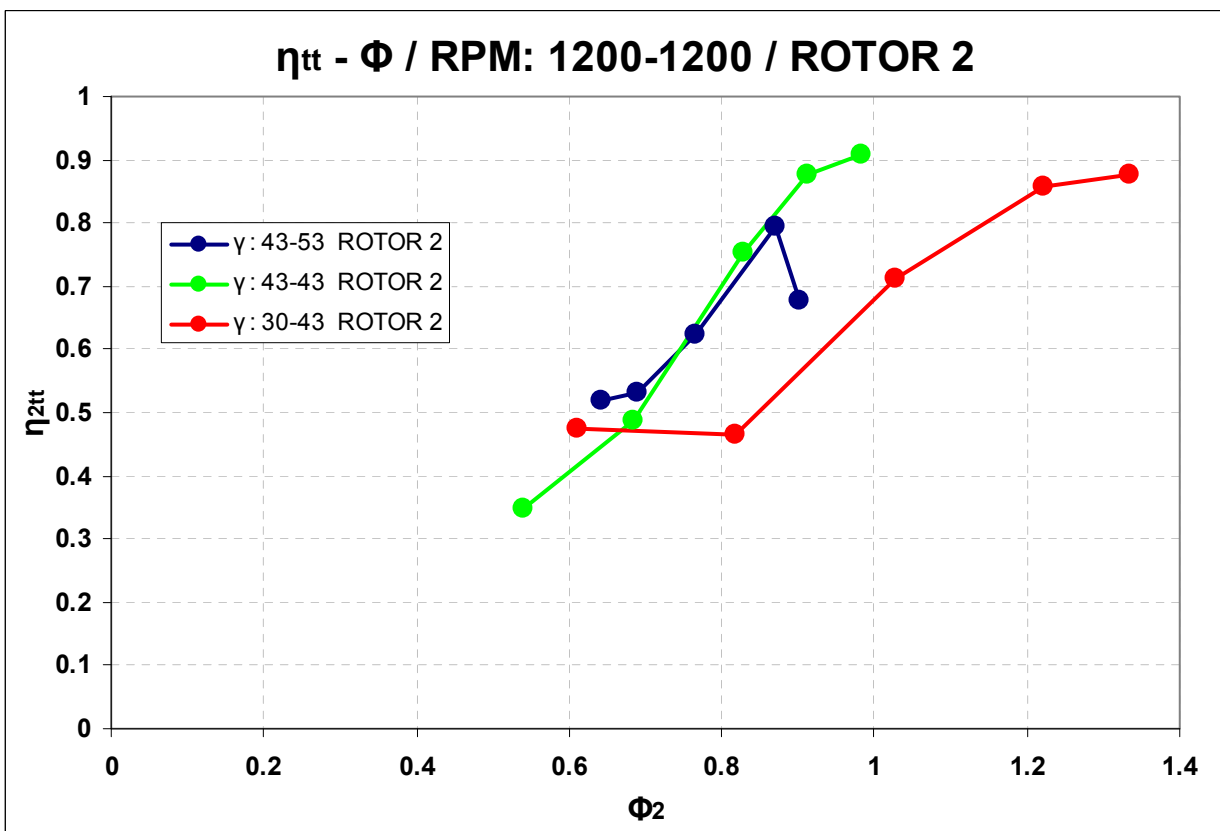
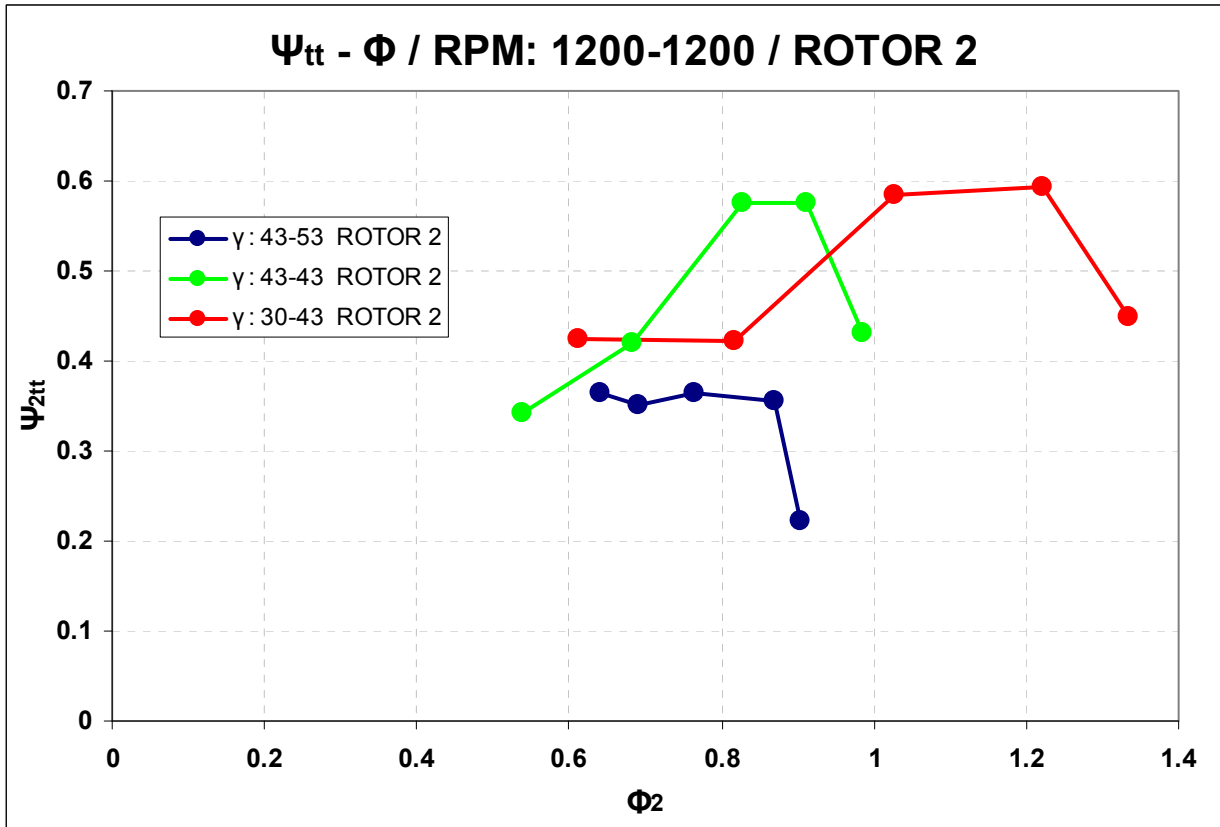
Σε όλα τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι μείωση των γωνιών stagger αυξάνει την παροχή και το λόγο πίεσης του συμπιεστή, που είναι αναμενόμενο. Όμως, η μείωση της γωνίας stagger του 1⁰⁰ ρότορα προκαλεί πολύ μεγαλύτερη αύξηση στη πίεση και την παροχή απ' ό,τι η μείωση της stagger του 2⁰⁰ ρότορα. Επίσης, παρατηρούμε ότι με τη μείωση των γωνιών stagger έχουμε οριζόντιωση της χαρακτηριστικής που σημαίνει ότι για μεγαλύτερο εύρος παροχών ο συμπιεστής λειτουργεί σε υψηλότερους λόγους πίεσης.

Όταν ο λόγος στροφών είναι 1.5, τότε φαίνεται πως ανεξαρτήτως στροφών έχουμε την ίδια μεταβολή στις χαρακτηριστικές για διάφορα ζεύγη γωνιών stagger.

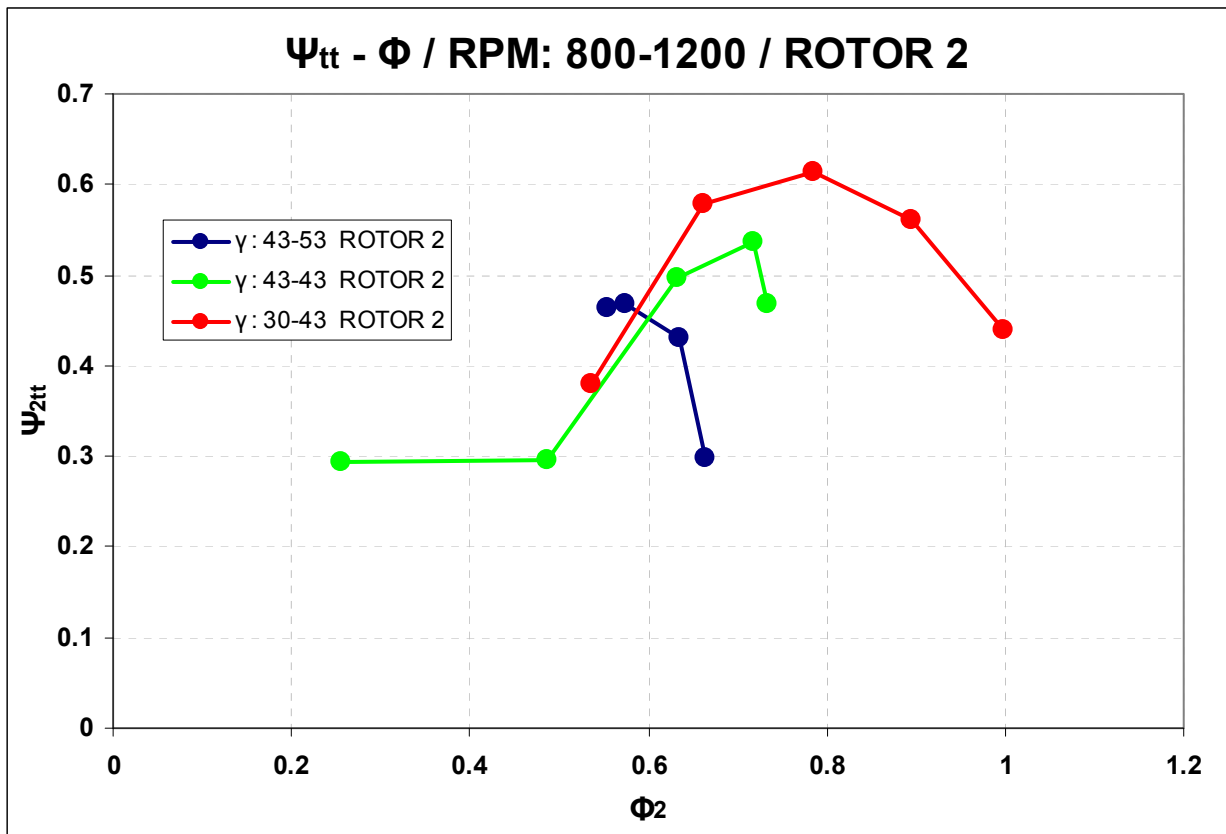
Τέλος, η διαφορά μεταξύ λόγου στροφών 1 και 1.5 διαπιστώνεται για την χαρακτηριστική με ζεύγος γωνιών stagger 43-43, όπου για λόγο στροφών 1 παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά, ενώ για λόγο στροφών 1.5 η ίδια χαρακτηριστική έχει μειωμένο περιθώριο λειτουργίας. Αυτό είναι λογικό αν αναλογιστούμε ότι όταν ο 2⁰⁵ ρότορας στρέφεται γρηγορότερα από τον 1⁰ (λόγος στροφών 1.5) και με τους δύο ρότορες να έχουν τις ίδιες γωνίες stagger, τότε ο 2⁰⁵ ρότορας θα βλέπει μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης από αυτές που θα έβλεπε αν στρεφόταν στις ίδιες σ.α.λ. με τον πρώτο. Αυτό σημαίνει ότι θα στολάρει γρηγορότερα.



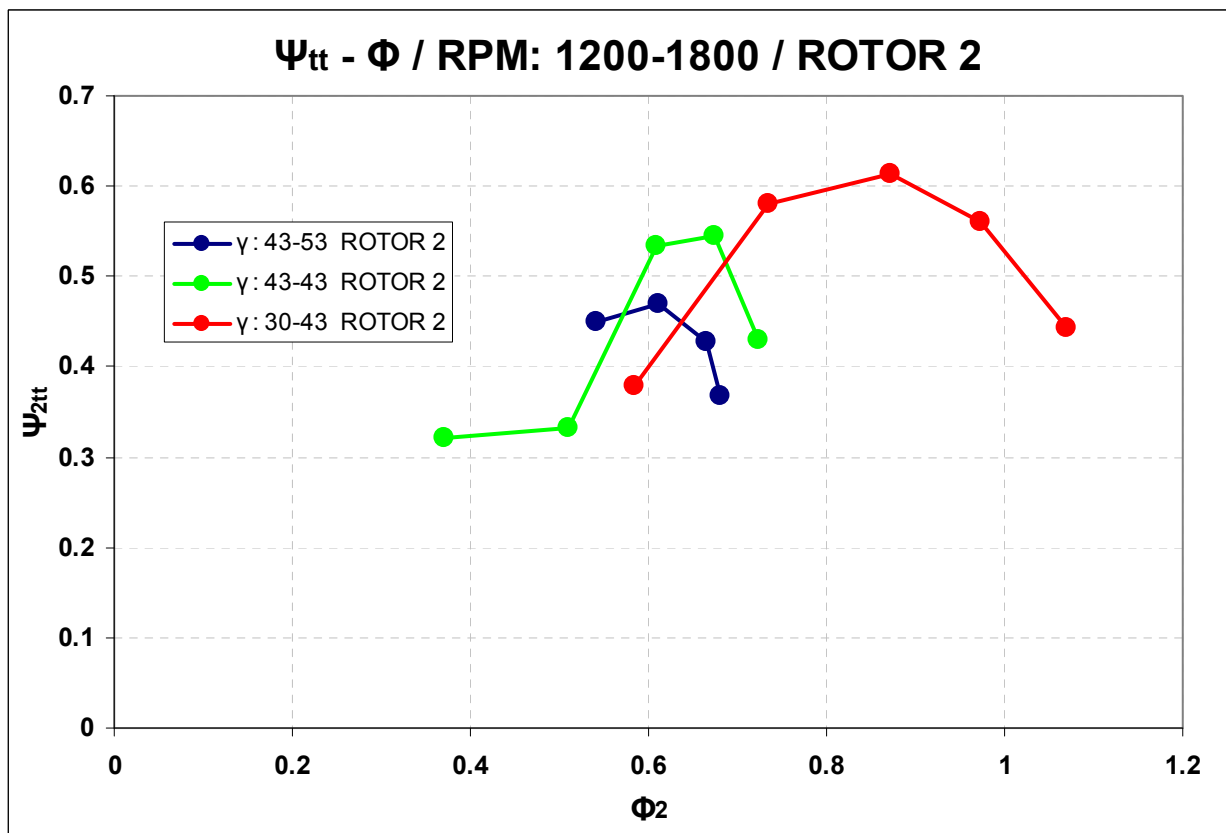
Σχήμα 4.50: Ψ_{is,t-t} - η_{t-t} - Φ για τον 1^ο Ρότορα για N₁=N₂=1200. Παράμετρος: γωνία stagger.



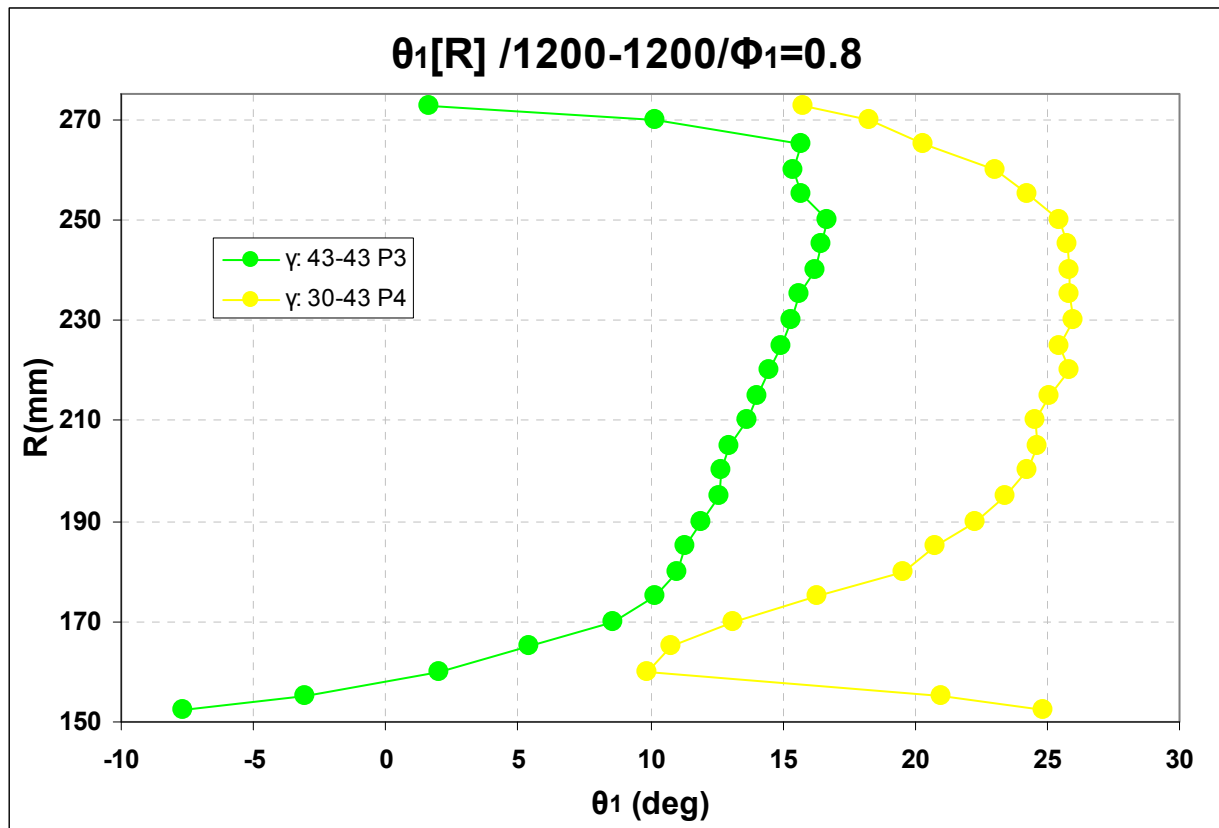
Σχήμα 4.51: $\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_1=N_2=1200$. Παράμετρος: γωνία stagger.



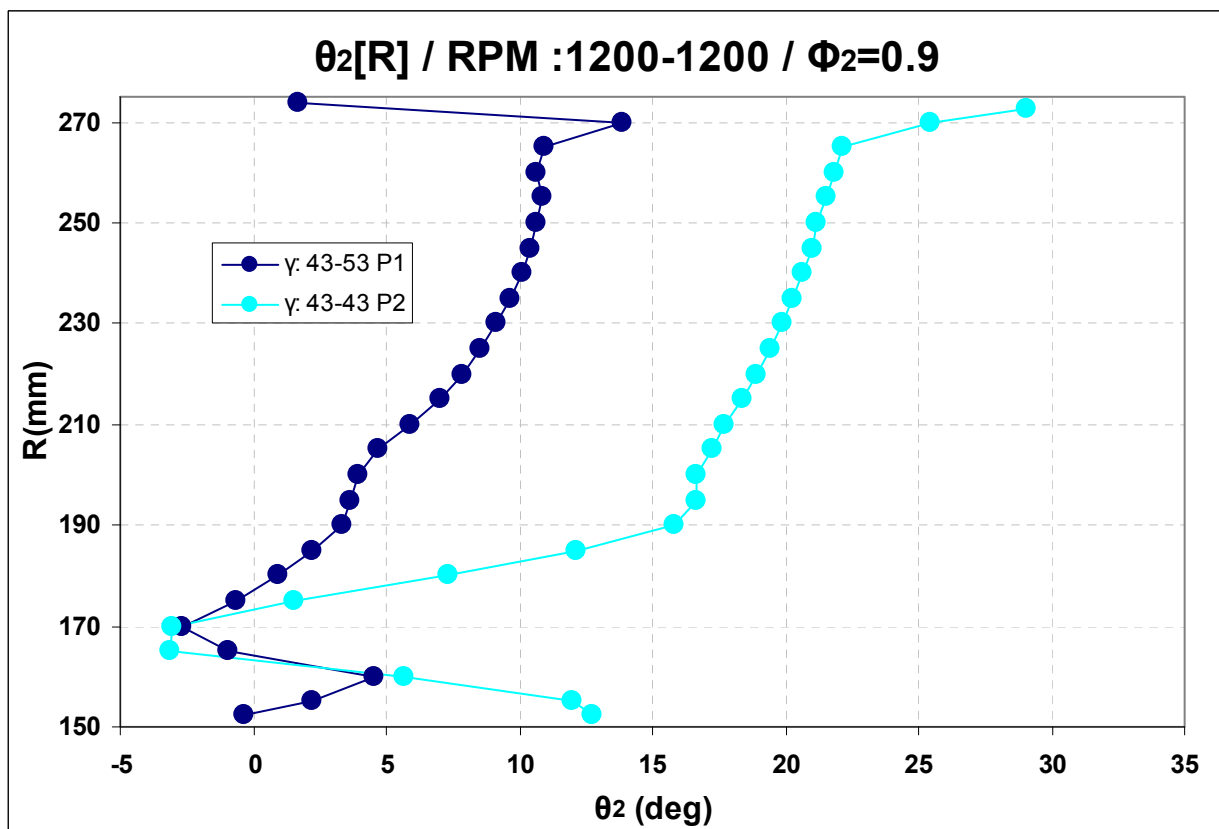
Σχήμα 4.52: Ψ_{is,t-t} - Φ για τον 2^ο Ρότορα για 800/1200. Παράμετρος: γωνία stagger.



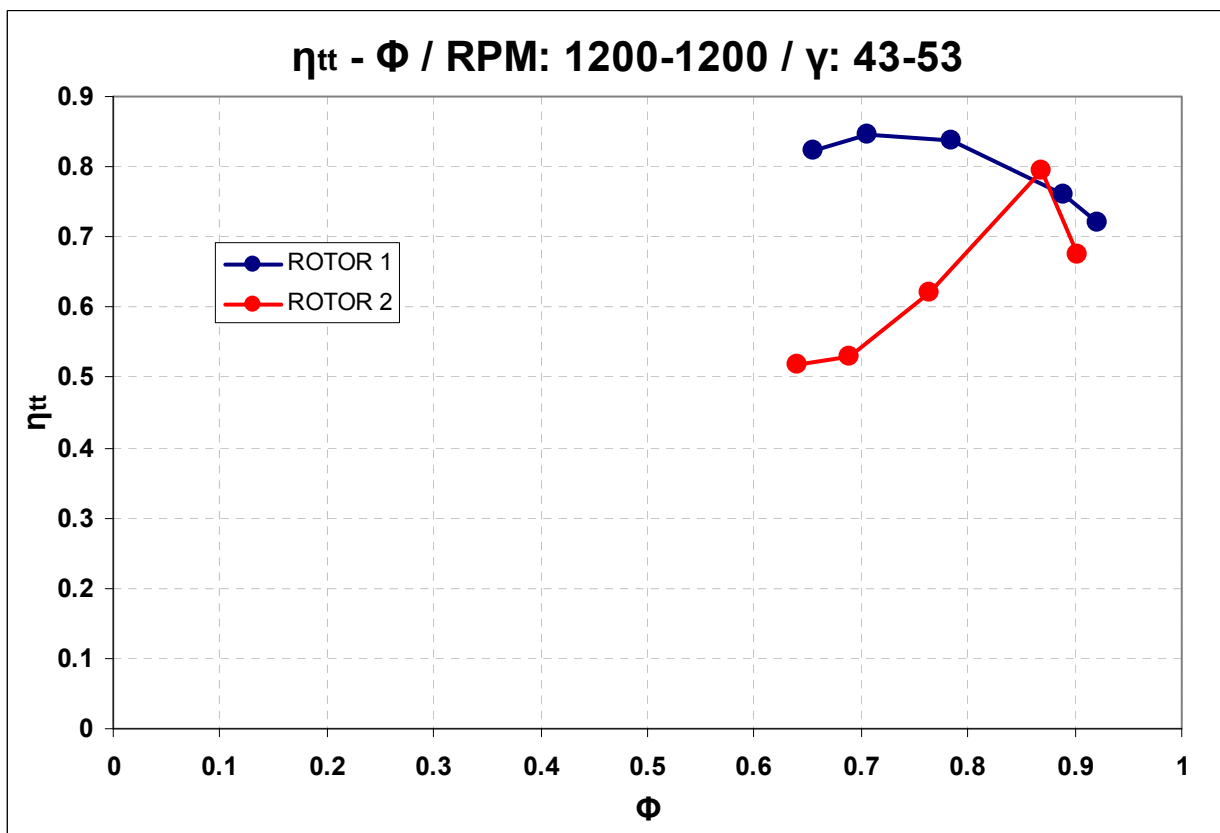
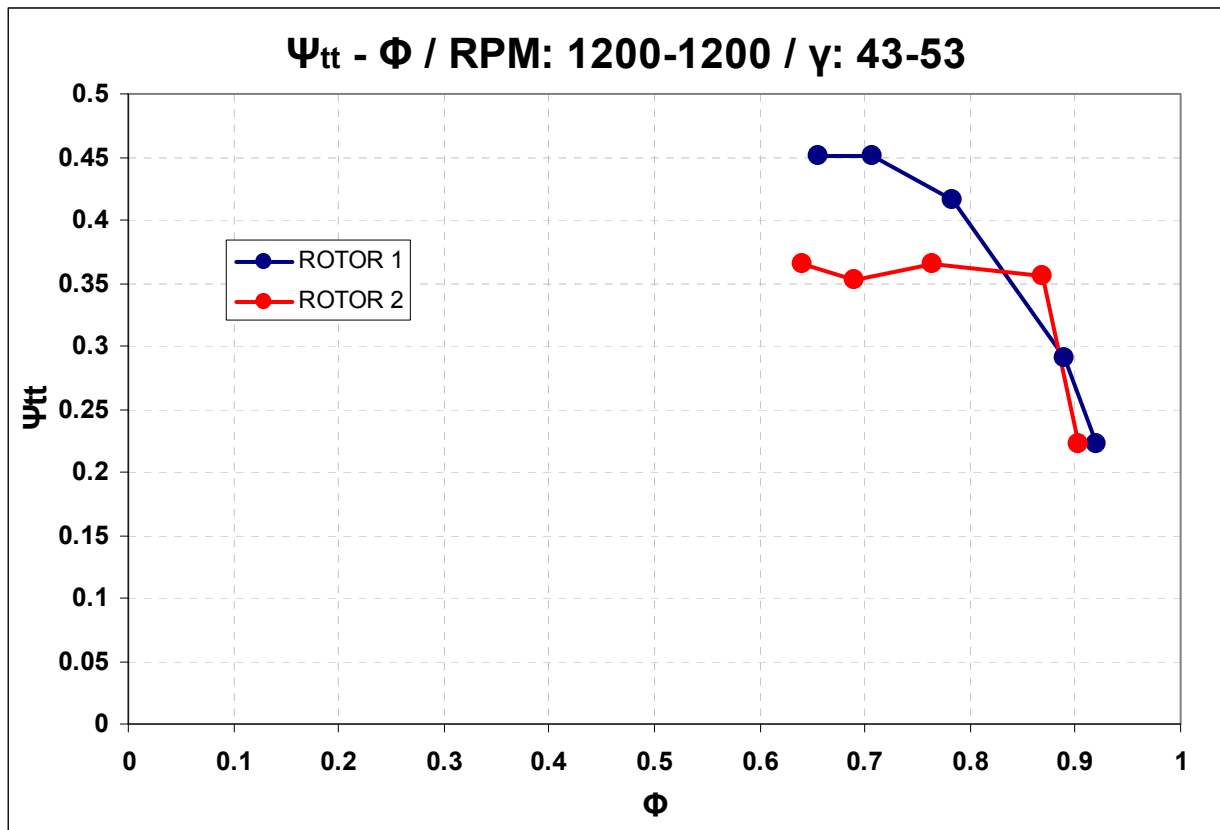
Σχήμα 4.53: Ψ_{is,t-t} - Φ για τον 2^ο Ρότορα για 1200/1800. Παράμετρος: γωνία stagger.



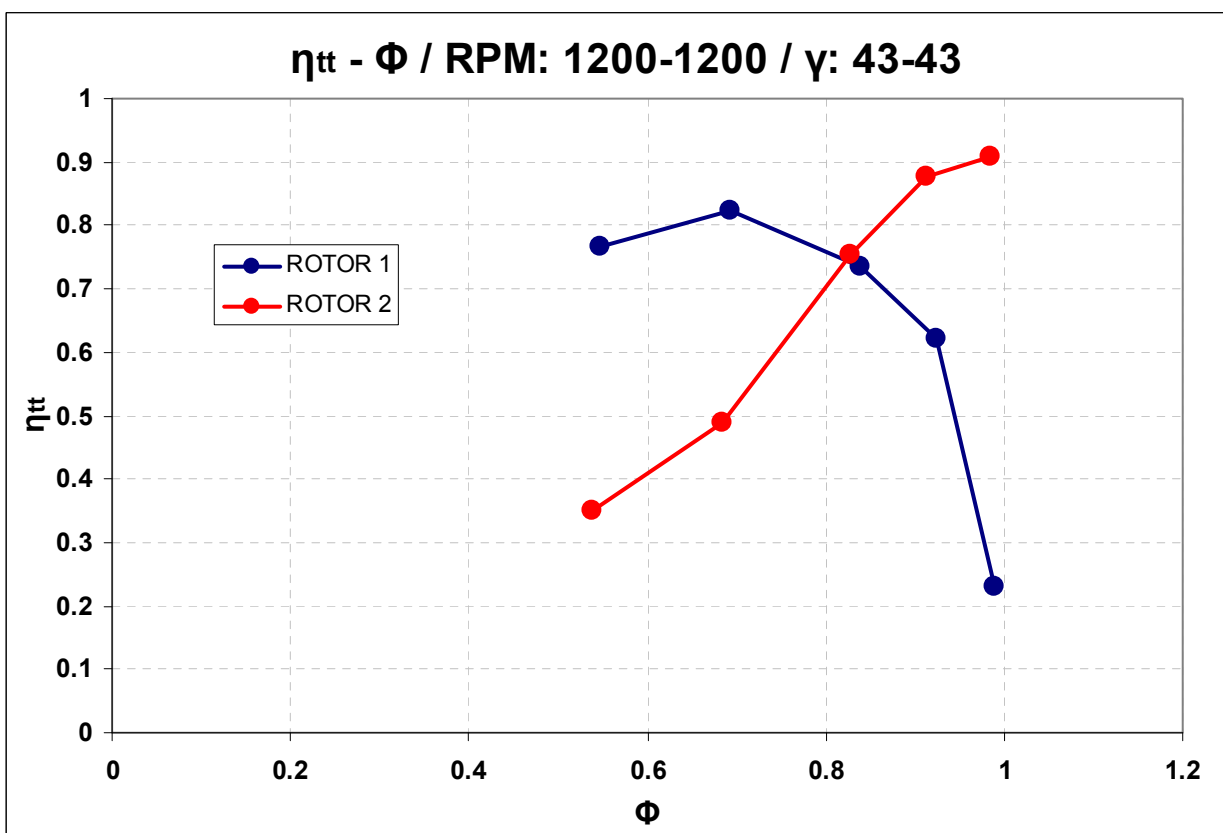
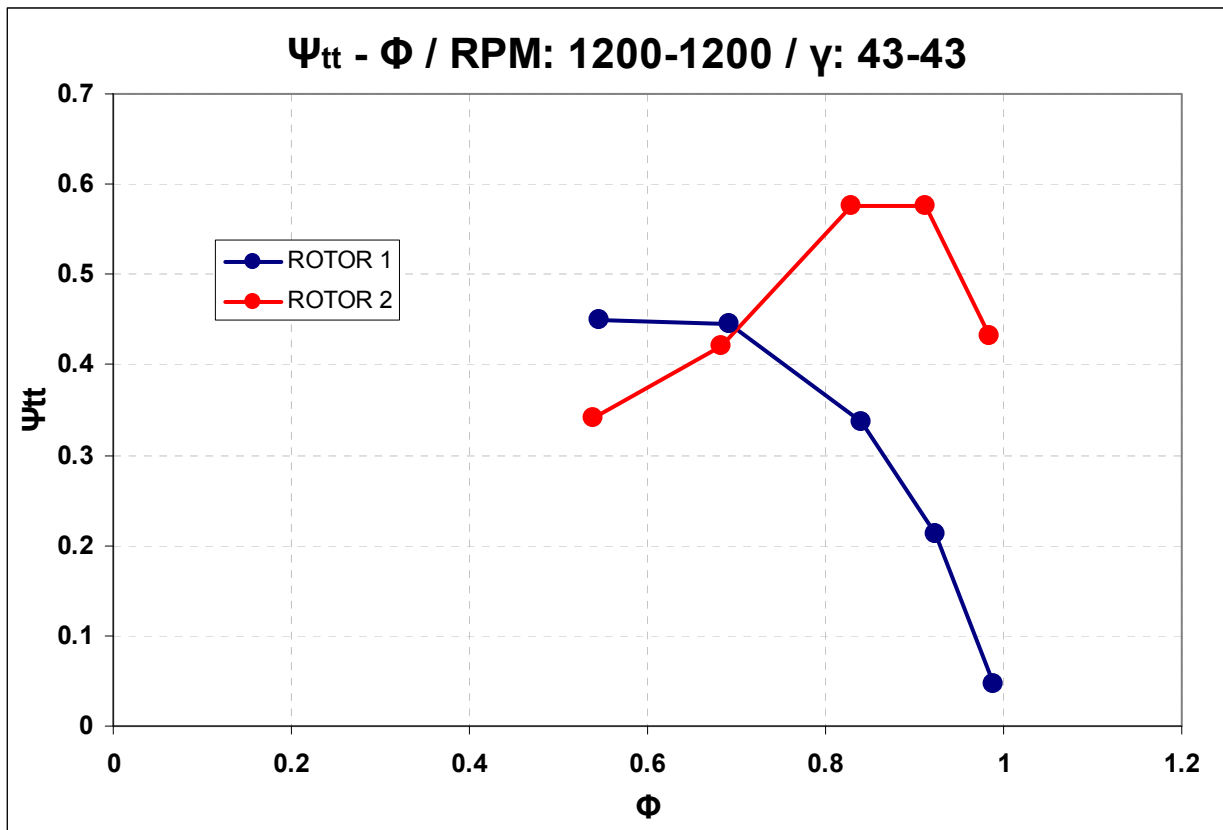
Σχήμα 4.54: Γωνία απόκλισης θ_1 για τον 1^ο Ρότορα για ζεύγη γ 43-43 και 30-43 και $\Phi=0.8$.



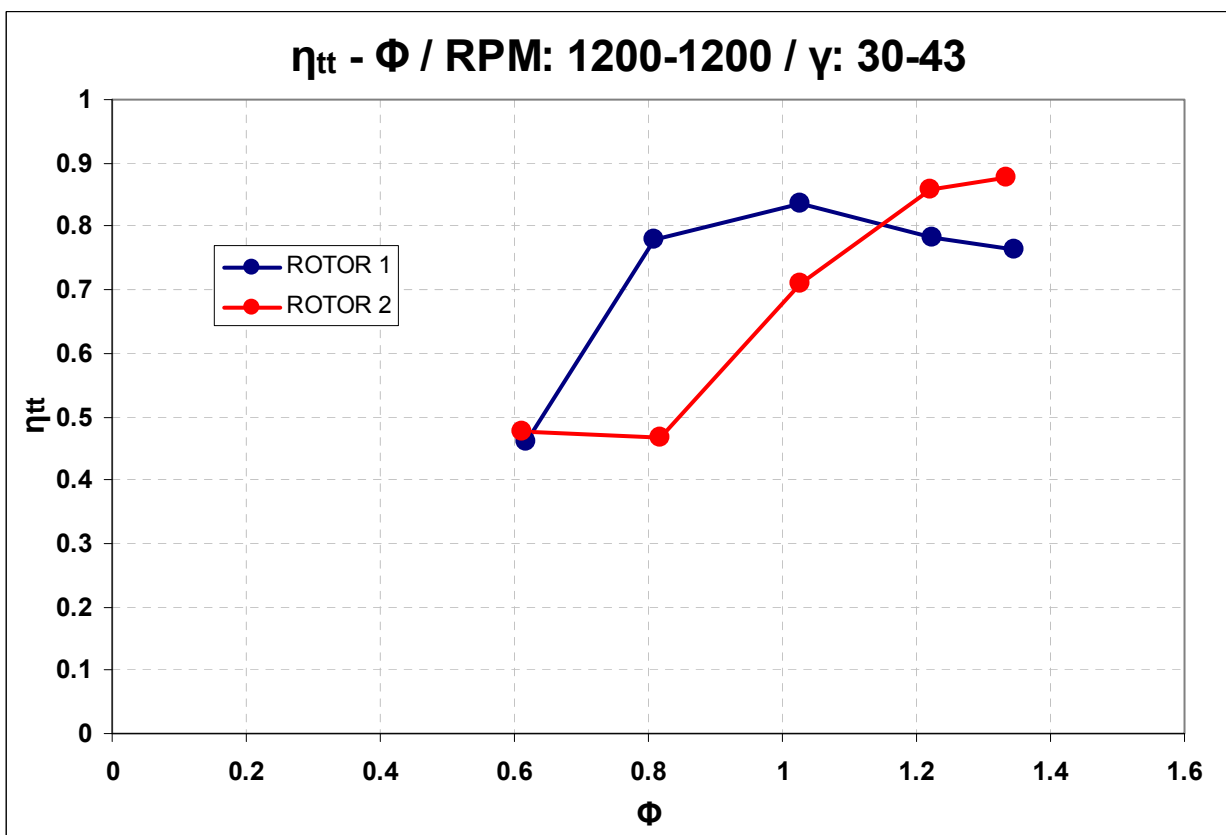
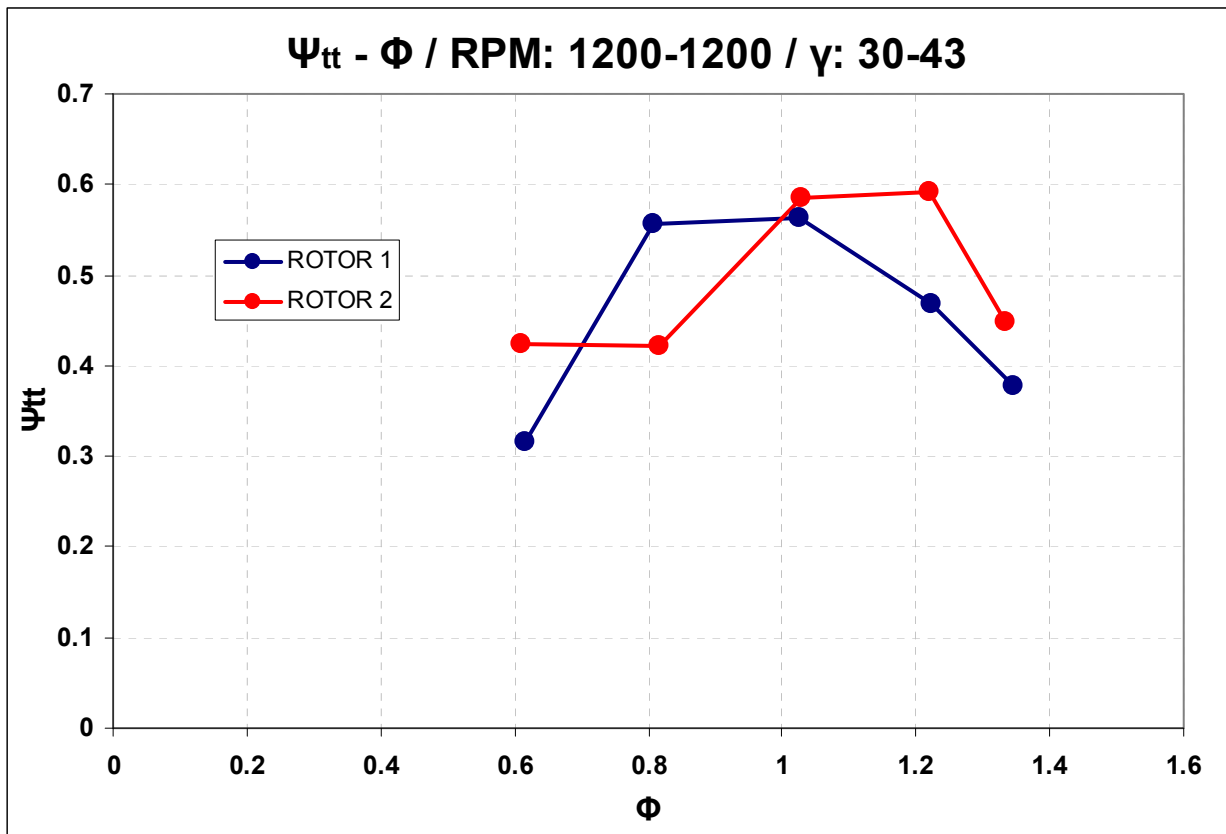
Σχήμα 4.55: Γωνία απόκλισης θ_2 για τον 2^ο Ρότορα για ζεύγη γ 43-53 και 43-43 και $\Phi=0.9$.



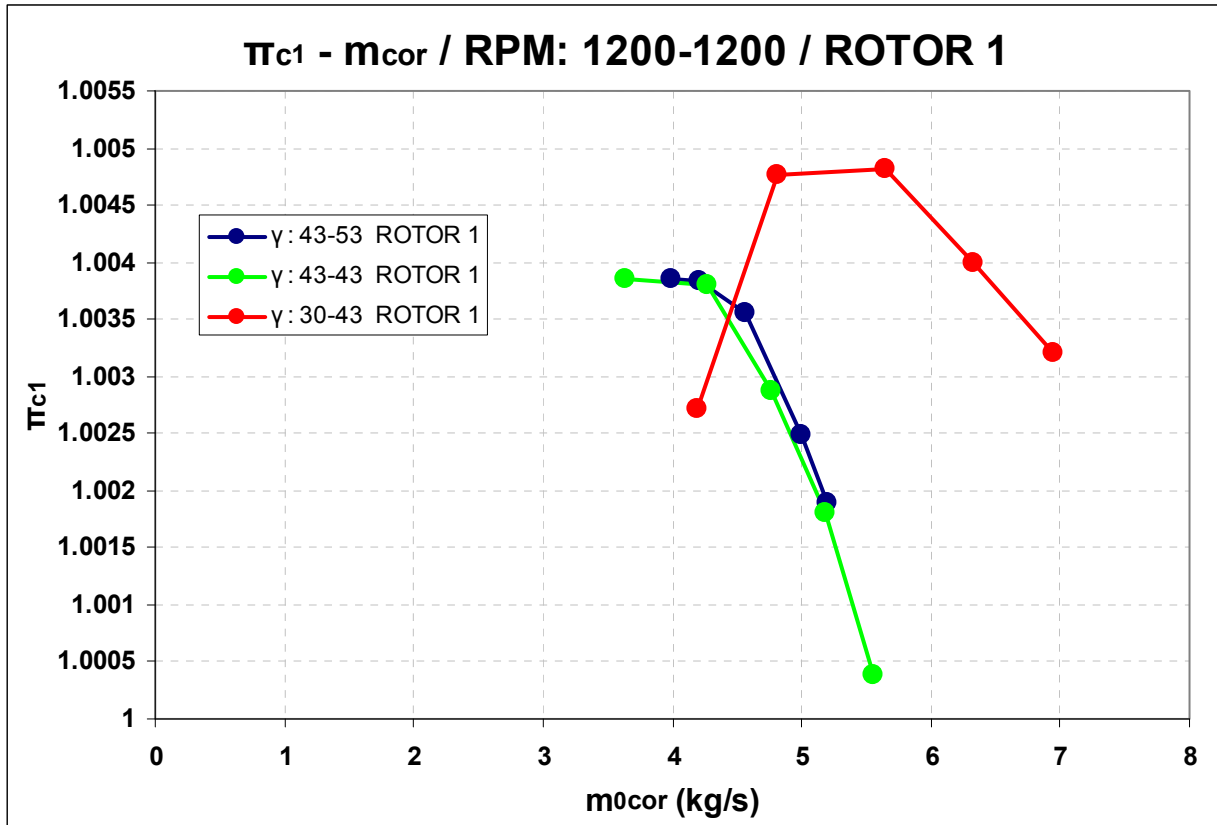
Σχήμα 4.56: $\Psi_{is,t,t} - \eta_{t,t} - \Phi$ για 1^ο και 2^ο Ρότορα για $N_1=N_2=1200$. Γωνία stagger : 43-53.



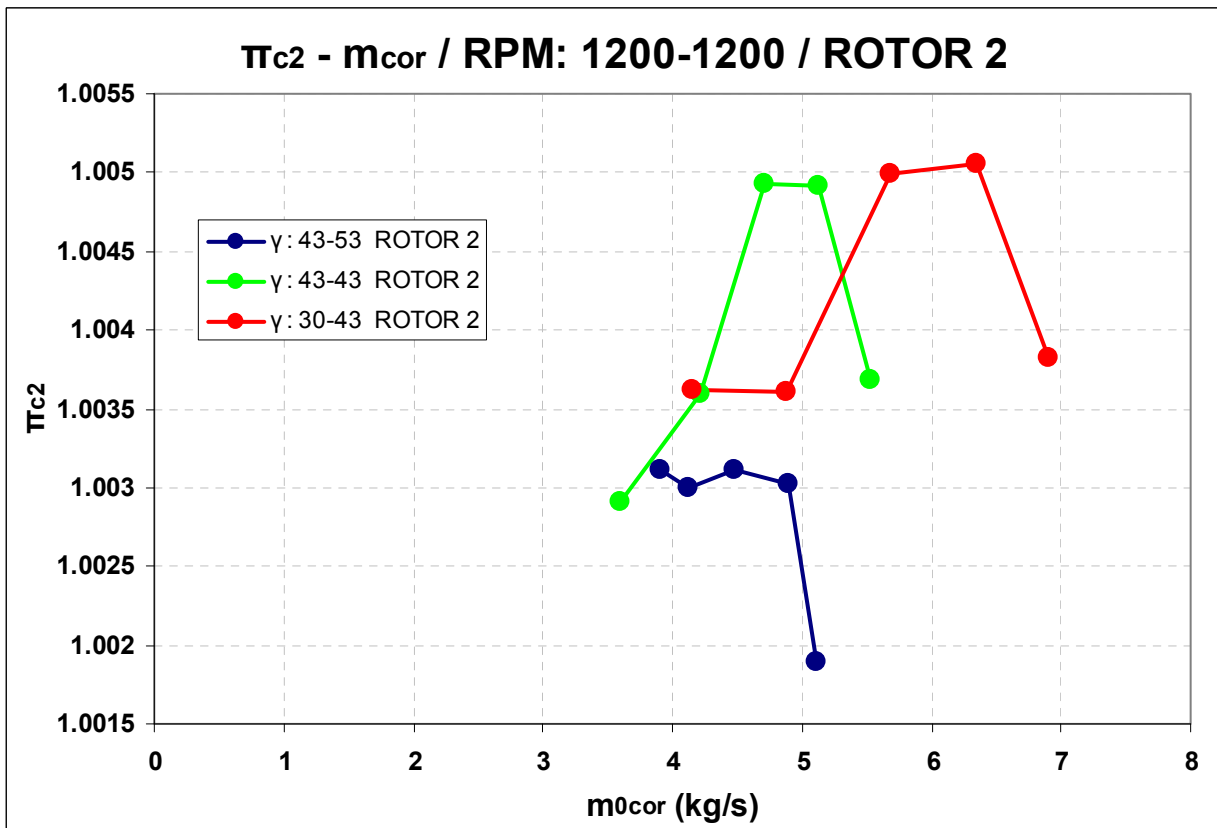
Σχήμα 4.57: $\Psi_{is,t,t} - \eta_{t,t} - \Phi$ για 1^ο και 2^ο Ρότορα για $N_1=N_2=1200$. Γωνία stagger : 43-43.



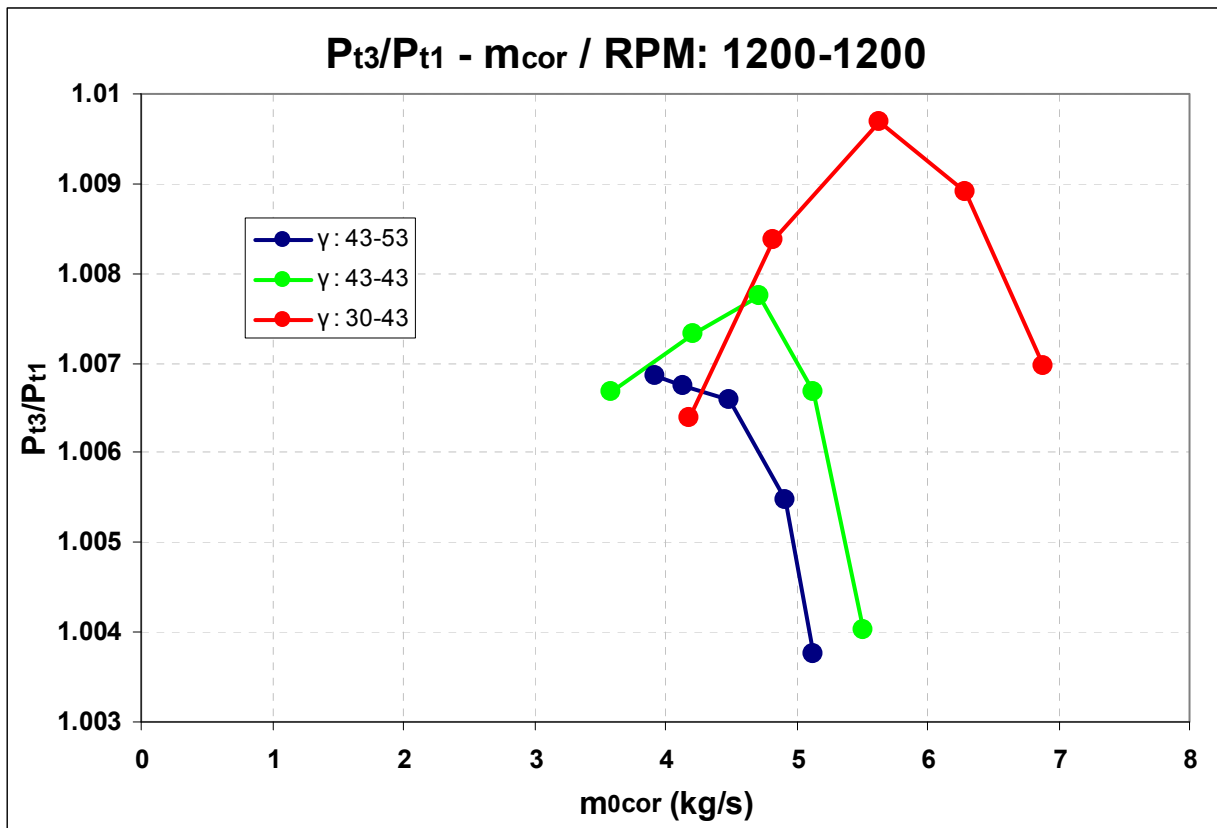
Σχήμα 4.58: $\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για 1^ο και 2^ο Ρότορα για $N_1=N_2=1200$. Γωνία stagger : 30-43.



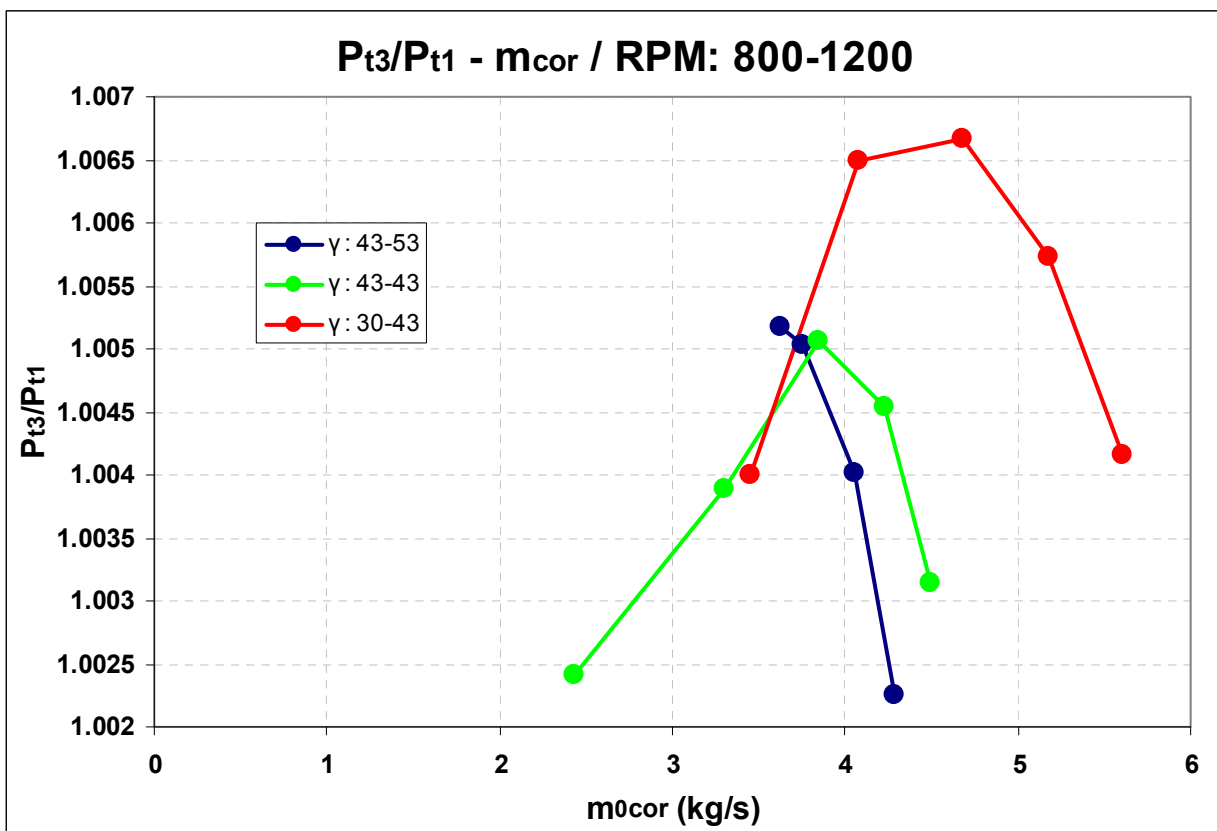
Σχήμα 4.59: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 1^ο Ρότορα για $N_1=N_2=1200$. Παράμετρος: γωνία stagger.



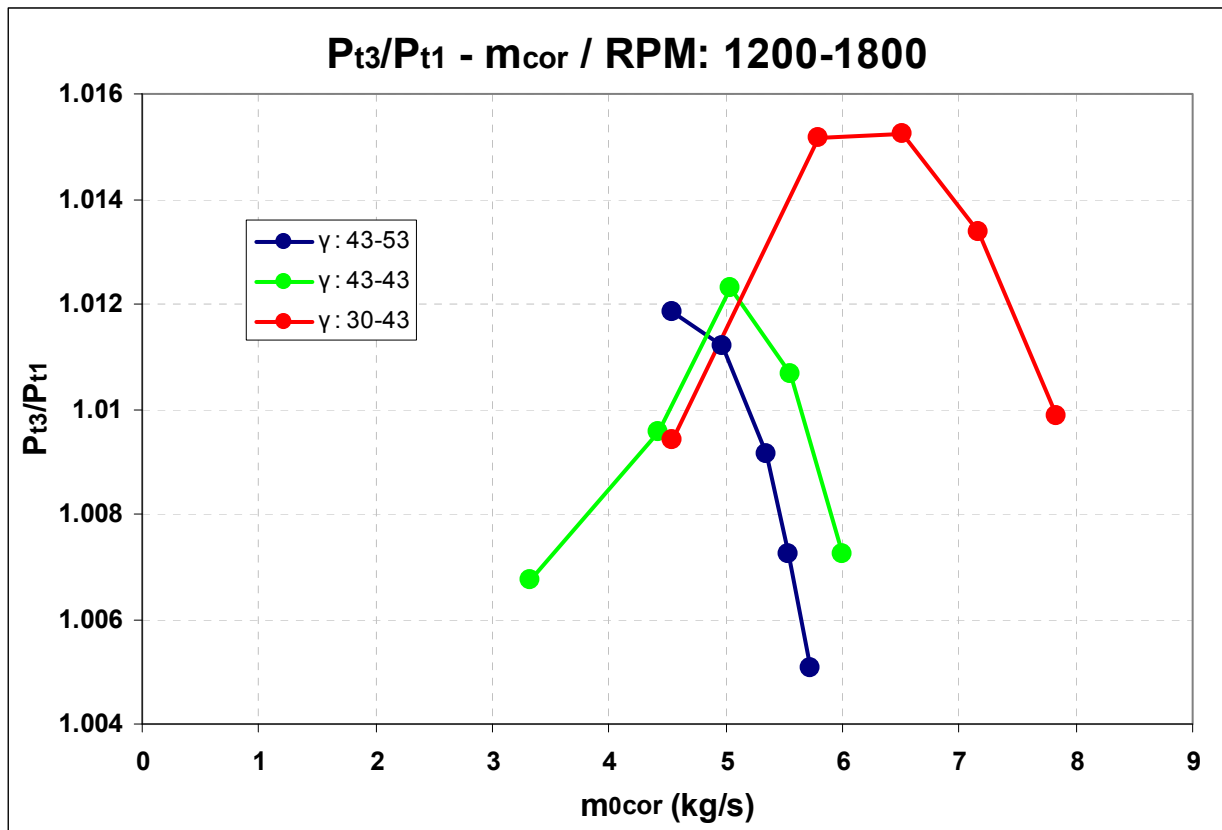
Σχήμα 4.60: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_1=N_2=1200$. Παράμετρος: γωνία stagger.



Σχήμα 4.61: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $N_1=N_2=1200$. Παράμετρος: γωνία stagger.



Σχήμα 4.62: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $N_1=800, N_2=1200$. Παράμετρος: γωνία stagger.



Σχήμα 4.63: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $N_1=1200, N_2=1800$. Παράμετρος: γωνία stagger.

4.5.4 Επίδραση λόγου στροφών $R_U = N_2/N_1$ για $N_1=1200rpm$.

Οι λόγοι στροφών $R_U=N_2/N_1$ που μελετάμε είναι 1 και 1.5, με τον 1^ο ρότορα να στρέφεται στις 1200rpm, δηλαδή για τα ζεύγη στροφών 1200-1200 και 1200-1800. Οι γωνίες κλίσης (stagger) των περυγίων είναι 43-53 για τον 1^ο και 2^ο ρότορα αντίστοιχα. Στο τέλος της παραγράφου παραθέτουμε και χαρακτηριστικές λόγου πίεσης και παροχής όλου του συμπιεστή για τους παραπάνω λόγους στροφών αλλά και για επιπλέον ζεύγη γωνιών stagger 43-43 και 30-43.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 1^ο Ρότορα (Σχήμα 4.64).

Παρατηρούμε ότι οι χαρακτηριστικές ταυτίζονται κι αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η απόλυτη γωνία εισόδου του 1^{ου} ρότορα μένει σταθερή ($\alpha_1 \approx 0^\circ \div -2^\circ$). Βέβαια, η καμπύλη για λόγο στροφών $R_U=1.5$ είναι κομμάτι της χαρακτηριστικής $\Phi-\Psi$ του 1^{ου} ρότορα που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες παροχές (άρα Φ), αφού με την αύξηση των στροφών του 2^{ου} ρότορα αυξάνουμε την παροχή. Οι καμπύλες βαθμού απόδοσης παρατηρούμε ότι σχεδόν ταυτίζονται στα κοινά Φ , με την μία καμπύλη να είναι συνέχεια της άλλης.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.65, Σχήμα 4.66, Σχήμα 4.67).

Παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική του 2^{ου} ρότορα έχει μετατοπιστεί αριστερά προς μικρότερα Φ για λόγο στροφών $R_U=1.5$. Επίσης, φαίνεται να φορτίζεται περισσότερο απ' ό,τι όταν ο λόγος στροφών είναι $R_U=1$. Βέβαια, όπως είπαμε παραπάνω, ο 2^{ος} ρότορας στη μέτρηση για γωνίες κλίσης 43-53 και σε στροφές 1200-1200 βλέπει διαταραγμένο πεδίο στην είσοδό του γι' αυτό στολάρει γρήγορα. Θα περιμέναμε να έφτανε στο ίδιο Ψ με την καμπύλη για $R_U=1.5$. Με ανάλογο τρόπο ερμηνεύονται και οι καμπύλες των βαθμών απόδοσης.

Η μετατόπιση αυτή προς αριστερά φαίνεται και στα υπόλοιπα διαγράμματα για γωνίες κλίσης 43-43 και 30-43 (Σχήμα 4.66 και Σχήμα 4.67).

Η μετατόπιση αυτή μπορεί να ερμηνευθεί όπως και στην προηγούμενη παράγραφο μέσω της σχέσης (4.138) η οποία είναι :

$$\Phi_{II} = \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{21} + \tan \beta_3} \stackrel{\text{Στο σημείο σχεδίασης}}{=} \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{12}' + \tan \beta_{22}'}, \text{ (προσημασμένες οι } \beta)$$

$\tan \beta_{21} = \tan \beta_{12}'$
 $\tan \beta_3 = \tan \beta_{22}'$

Όπως παρατηρούμε, για σταθερό Ψ , εάν το R_U αυξηθεί (ανέβουν οι σ.α.λ. του 2^{ου}) ο αριθμητής της σχέσης μειώνεται, άρα μειώνεται και Φ_{II} αφού ο παρονομαστής μένει σχεδόν σταθερός τουλάχιστον κοντά στο σημείο σχεδίασης. Άρα, με την αύξηση του

λόγου στροφών R_U η χαρακτηριστική Φ - Ψ του 2^{00} μετατοπίζεται αριστερά προς μικρότερα Φ .

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για λόγο στροφών $R_U=1$ για τον 1^0 και 2^0 Ρότορα (Σχήμα 4.68).

Εδώ παρατηρούμε ότι για τους λόγους που παραθέσαμε παραπάνω θα έπρεπε η καμπύλη του 2^{00} ρότορα να ταυτιζόταν σχεδόν με αυτή του 1^{00} , εάν ο 2^{05} ρότορας έβλεπε όχι τόσο διαταραγμένο πεδίο ροής στην είσοδό του. Να επαναλάβουμε ότι το γεγονός ότι θα ταυτιζόνταν έχει να κάνει με το ζεύγος γωνιών κλίσης που επιλέξαμε και δεν ισχύει πάντα. Τα ίδια ισχύουν και για τους βαθμούς απόδοσης.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για λόγο στροφών $R_U=1.5$ για τον 1^0 και 2^0 Ρότορα (Σχήμα 4.69).

Εδώ παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική Φ - Ψ του 1^{00} ρότορα αντιστοιχεί σε μικρότερα Φ και είναι λογικό αν αναλογιστούμε ότι $V_a \approx$ σταθερό και ότι ο 2^{05} ρότορας στρέφεται ταχύτερα από τον 1^0 . Επίσης παρατηρούμε ότι ο 2^{05} ρότορας στολάρει πρώτος και αυτό φαίνεται και από τους βαθμούς απόδοσης όπου ο 2^{05} ξεκινά ήδη από μεγάλο β.α. και μειώνοντας την παροχή ο β.α. ελαττώνεται. Το αντίθετο συμβαίνει στον 1^0 ρότορα. Ο λόγος είναι ότι ο 2^{05} τρέφεται ταχύτερα από τον 1^0 και βλέπει μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης από τον 1^0 για την ίδια παροχή.

$\pi_c - m_{0cor}$ για τον 1^0 Ρότορα (Σχήμα 4.70).

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, όπως ακριβώς και οι Φ - Ψ χαρακτηριστικές. Η ερμηνεία είναι ακριβώς ίδια με αυτή που δώσαμε για τις Φ - Ψ χαρακτηριστικές.

$\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^0 Ρότορα (Σχήμα 4.71, Σχήμα 4.72, Σχήμα 4.73).

Εδώ παρατηρούμε την αναμενόμενη διαφορά στο λόγο πίεσης της χαρακτηριστικής για λόγο στροφών $R_U=1.5$, αφού οι σ.α.λ. του 2^{00} ρότορα έχουν αυξηθεί.

$\pi_c - m_{0cor}$ για λόγο στροφών $R_U=1$ για τον 1^0 και 2^0 Ρότορα (Σχήμα 4.74).

Εδώ ισχύουν ακριβώς τα ίδια με αυτά που αναλύσαμε για τις χαρακτηριστικές Φ - Ψ .

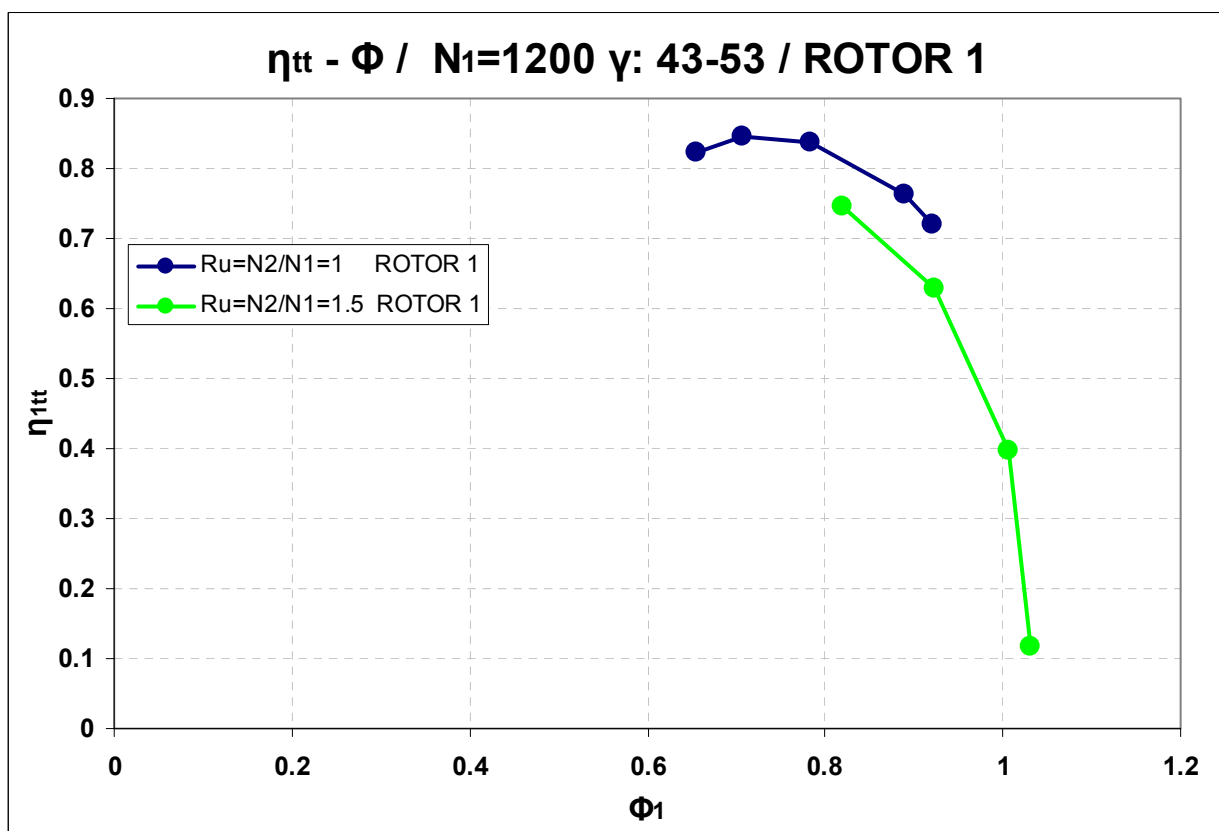
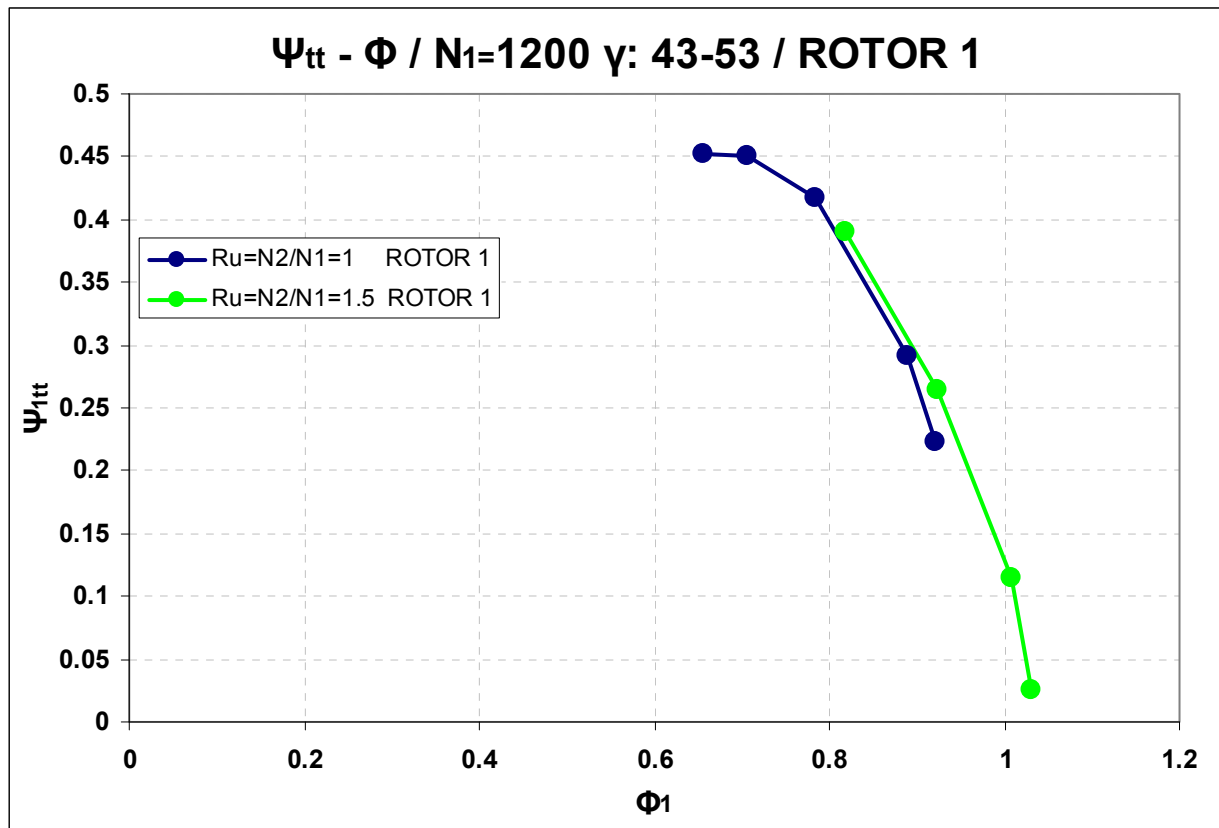
$\pi_c - m_{0cor}$ για λόγο στροφών $R_U=1.5$ για τον 1° και 2° Ρότορα (Σχήμα 4.75).

Εδώ παρατηρούμε την αναμενόμενη αυξημένη πίεση που παράγει ο 2^{0s} αφού στρέφεται ταχύτερα από τον 1° . Επίσης είναι φανερό ότι πρώτα στολάρει ο 2^{0s} ρότορας ενώ ο 1^{0s} δεν έχει ακόμα φτάσει στο σημείο αποκόλλησης.

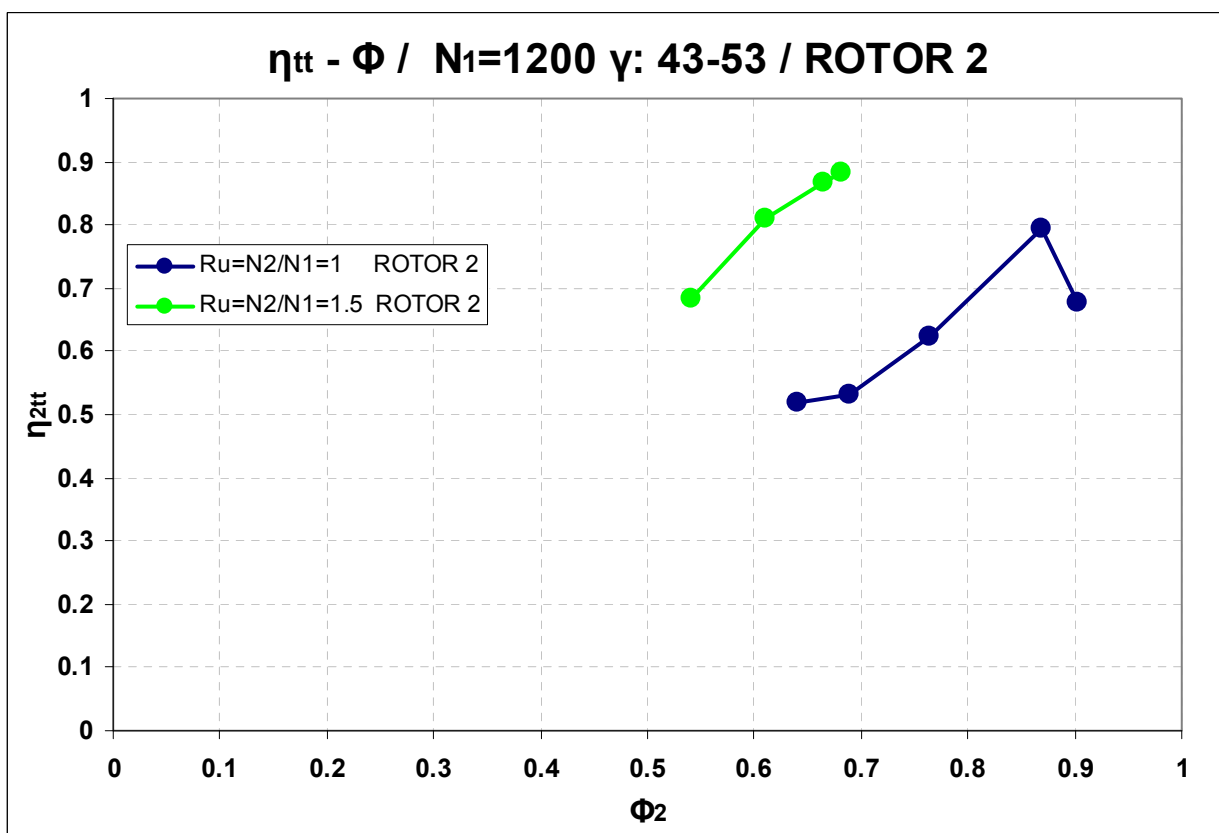
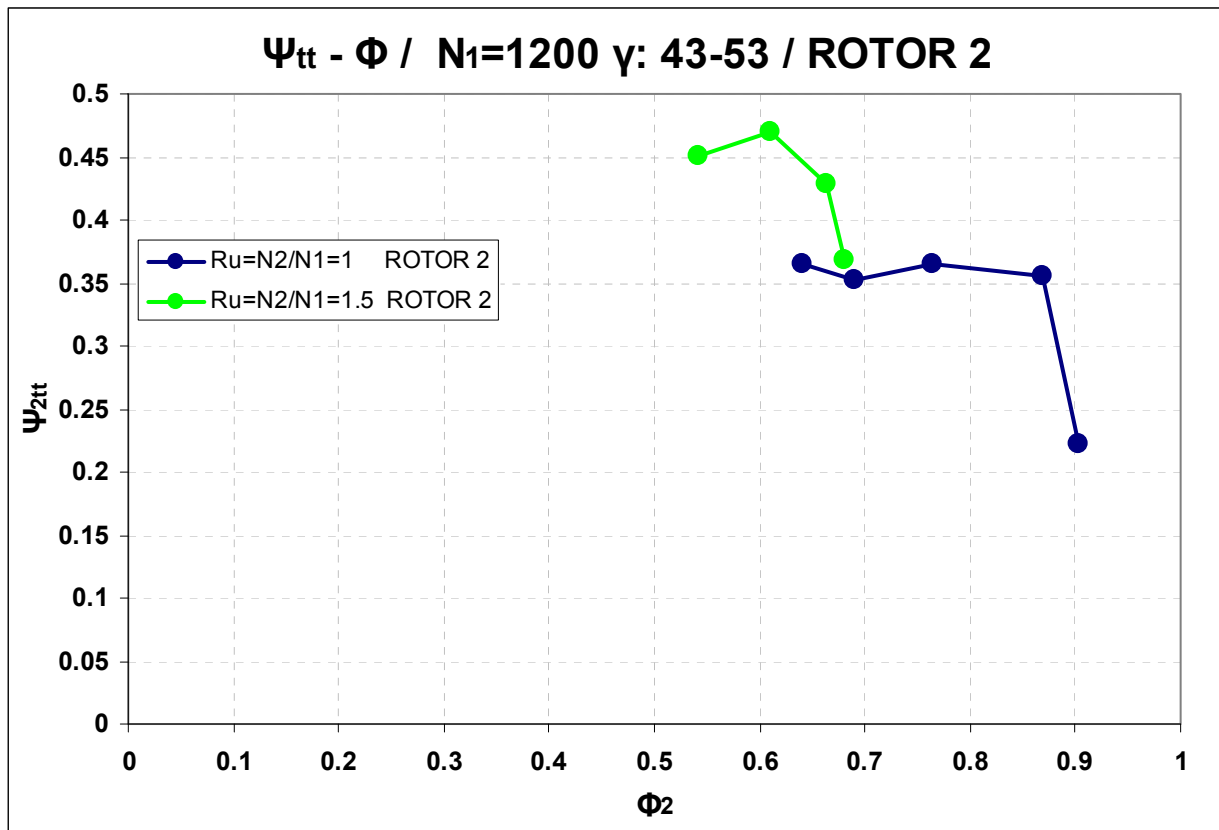
$\pi_c - m_{0cor}$ του συμπιεστή για λόγο στροφών 1 και 1.5 και ζεύγη γωνιών stagger 43-53, 43-43, 30-43 (Σχήμα 4.76, Σχήμα 4.77, Σχήμα 4.78).

Στις χαρακτηριστικές για όλα τα ζεύγη γωνιών κλίσης παρατηρούμε την αναμενόμενη αύξηση του λόγου πίεσης και παροχής για αύξηση των στροφών του 2^{00} ρότορα από τις 1200 στις 1800rpm. Παράλληλα, παρατηρούμε μια πλάτυνση των χαρακτηριστικών για αυξημένες σ.α.λ. του 2^{00} ρότορα, γεγονός που σημαίνει ότι με την αύξηση στροφών του 2^{00} ρότορα έχουμε μεγαλύτερο περιθώριο λειτουργίας του συμπιεστή.

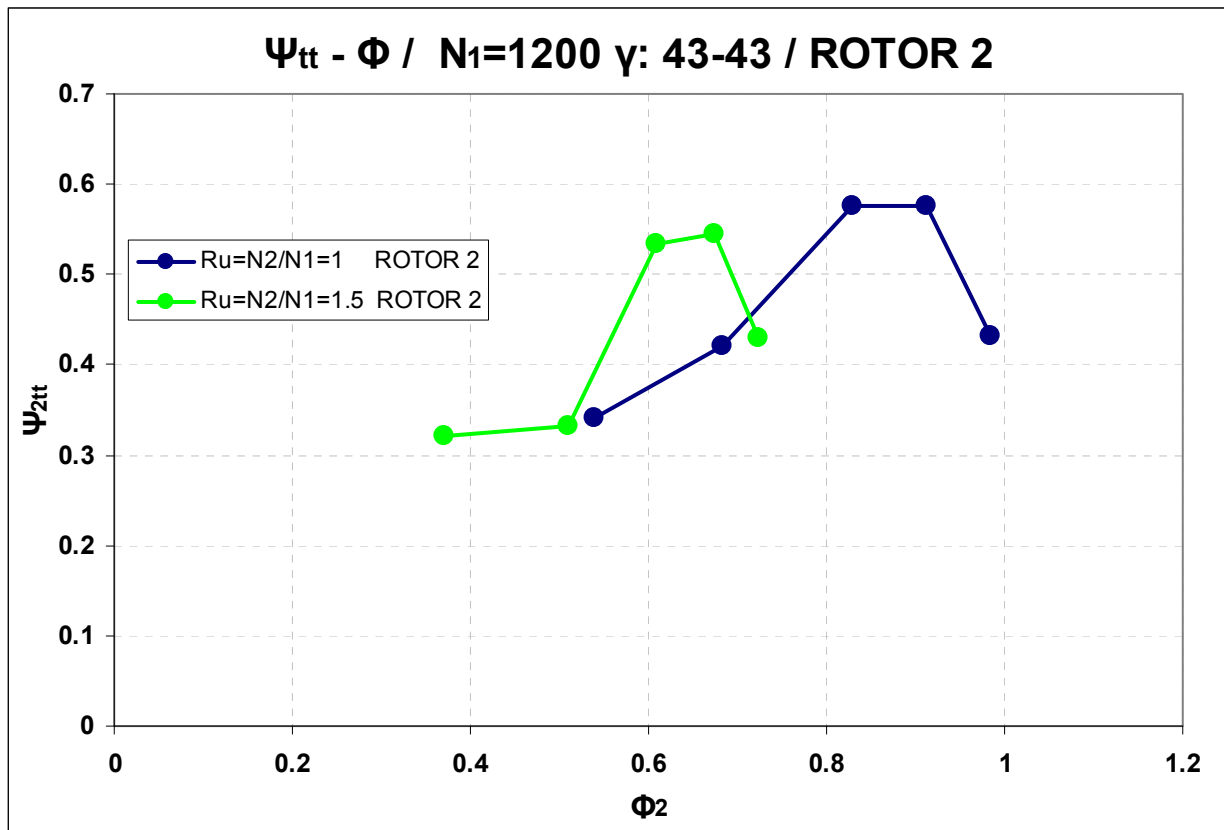
Επίσης, για το ζεύγος γωνιών κλίσης 43-43 παρατηρούμε ότι με την αύξηση των στροφών του 2^{00} ρότορα έχουμε αρκετά γρήγορα μερική αποκόλληση της ροής. Αυτό οφείλεται στο ότι ο 2^{0s} ρότορας έχει την ίδια γωνία κλίσης με τον 1° και παράλληλα, στρεφόμενος σε υψηλότερες στροφές, βλέπει ήδη από μεγάλες παροχές μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης.



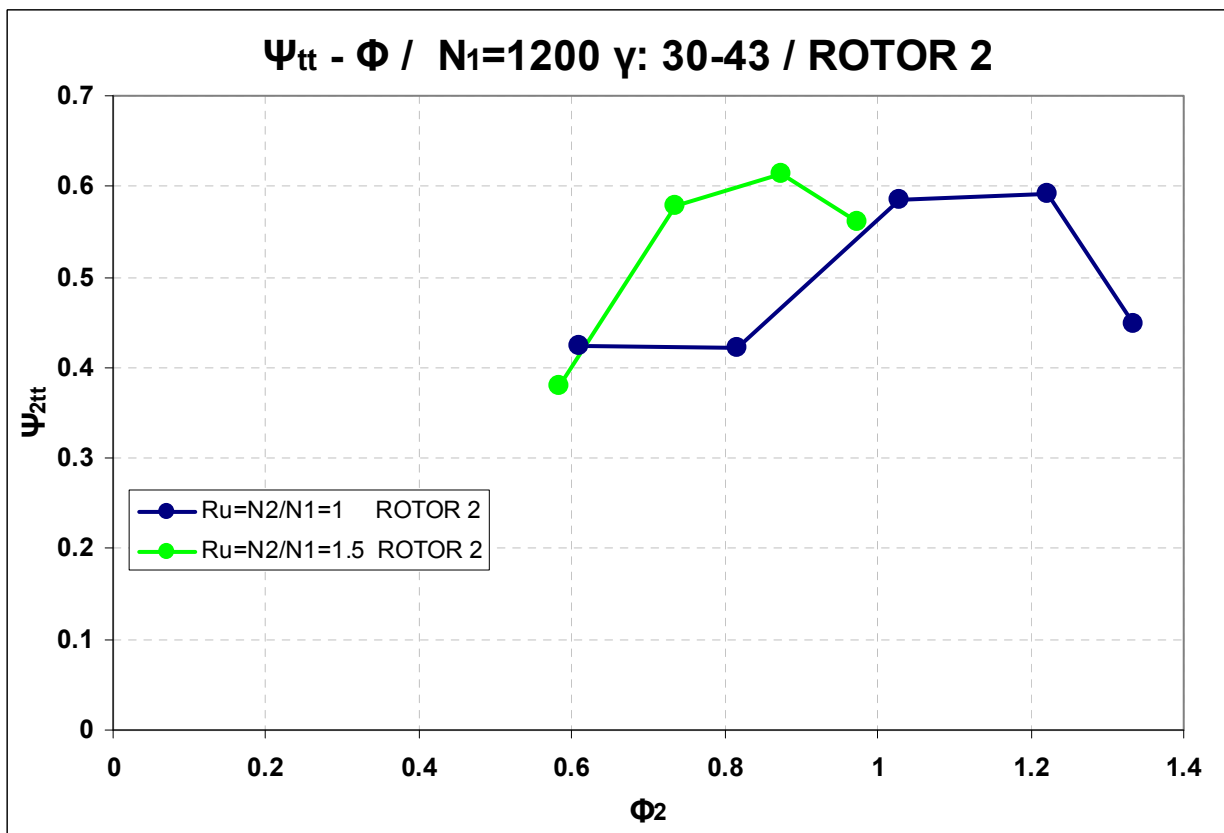
Σχήμα 4.64: $\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 1^ο Ρότορα για $N_1=1200$. Παράμετρος: Λόγος στροφών.



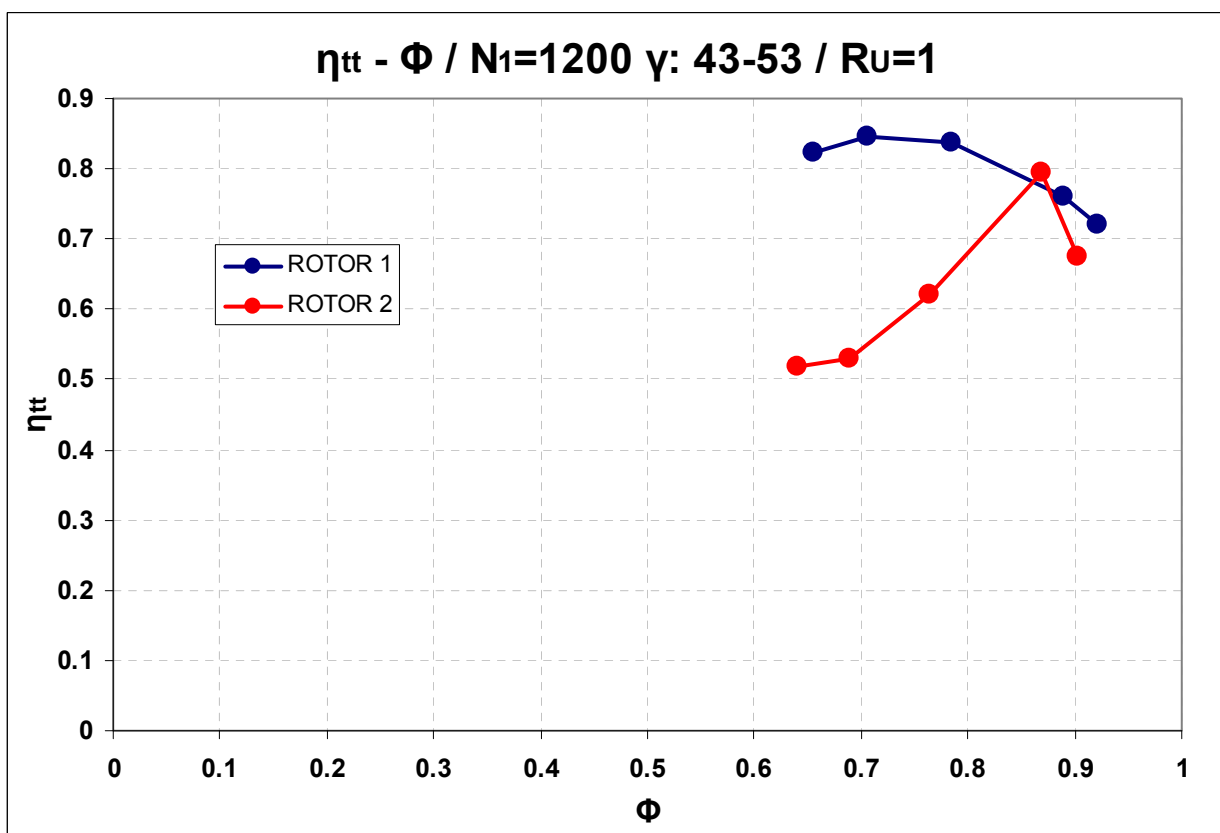
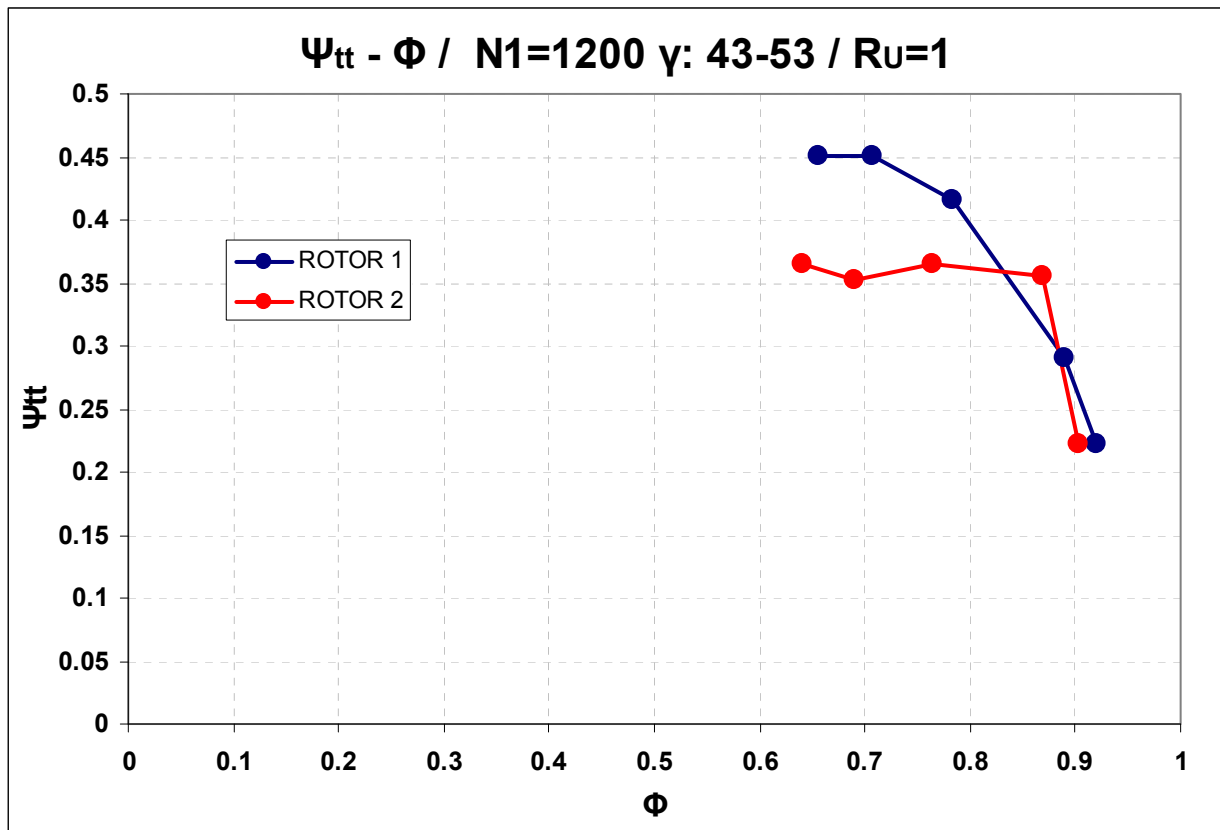
Σχήμα 4.65: Ψ_{is,t-t} - η_{t-t} - Φ για τον 2^ο Ρότορα για N₁= 1200, γ : 43-53. Παράμετρος: R_U.



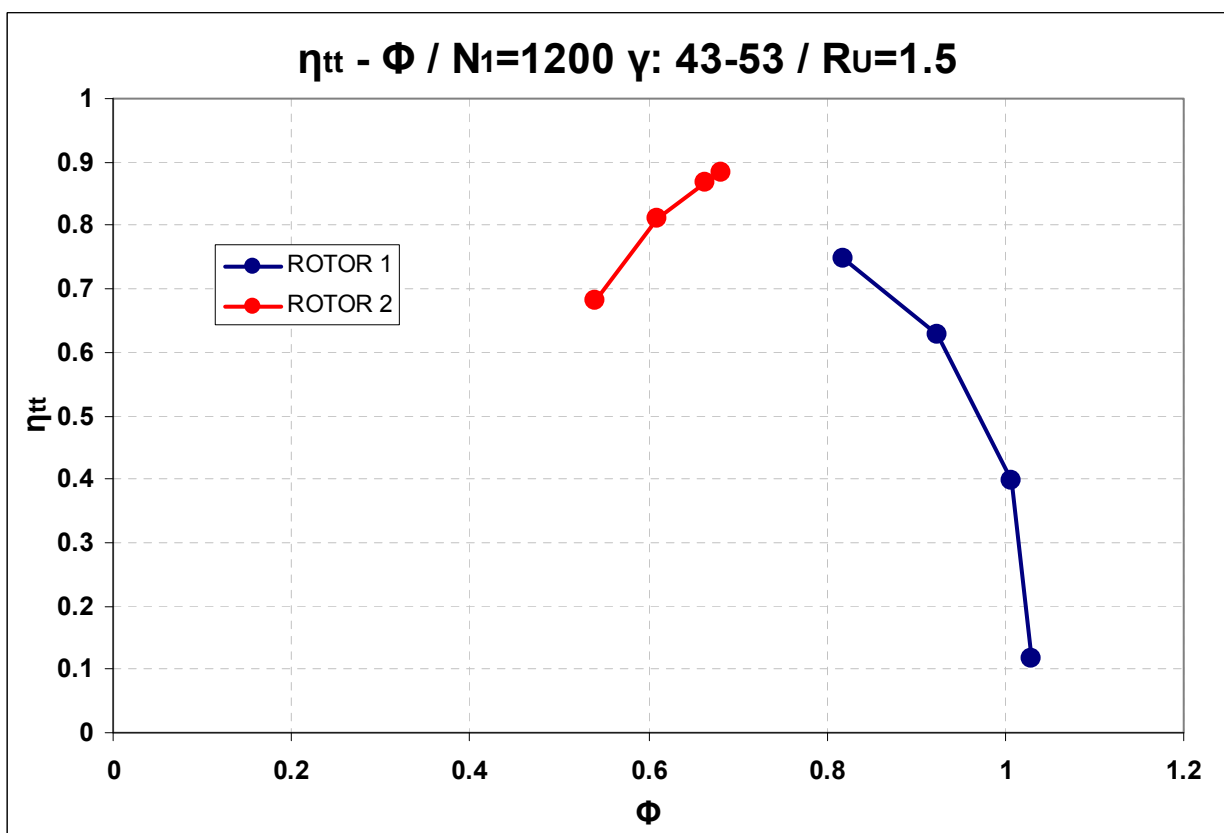
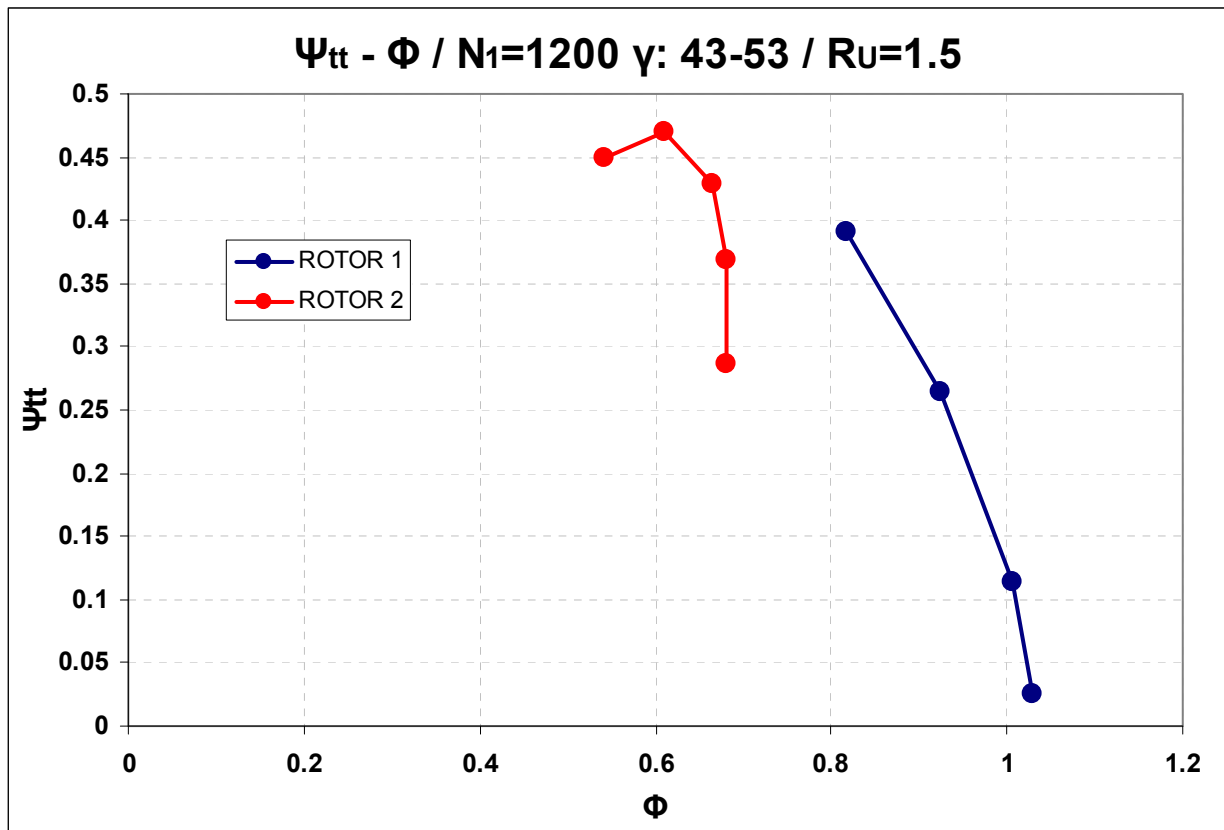
Σχήμα 4.66: $\Psi_{is,t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_1=1200$, γ : 43-43. Παράμετρος: R_u .



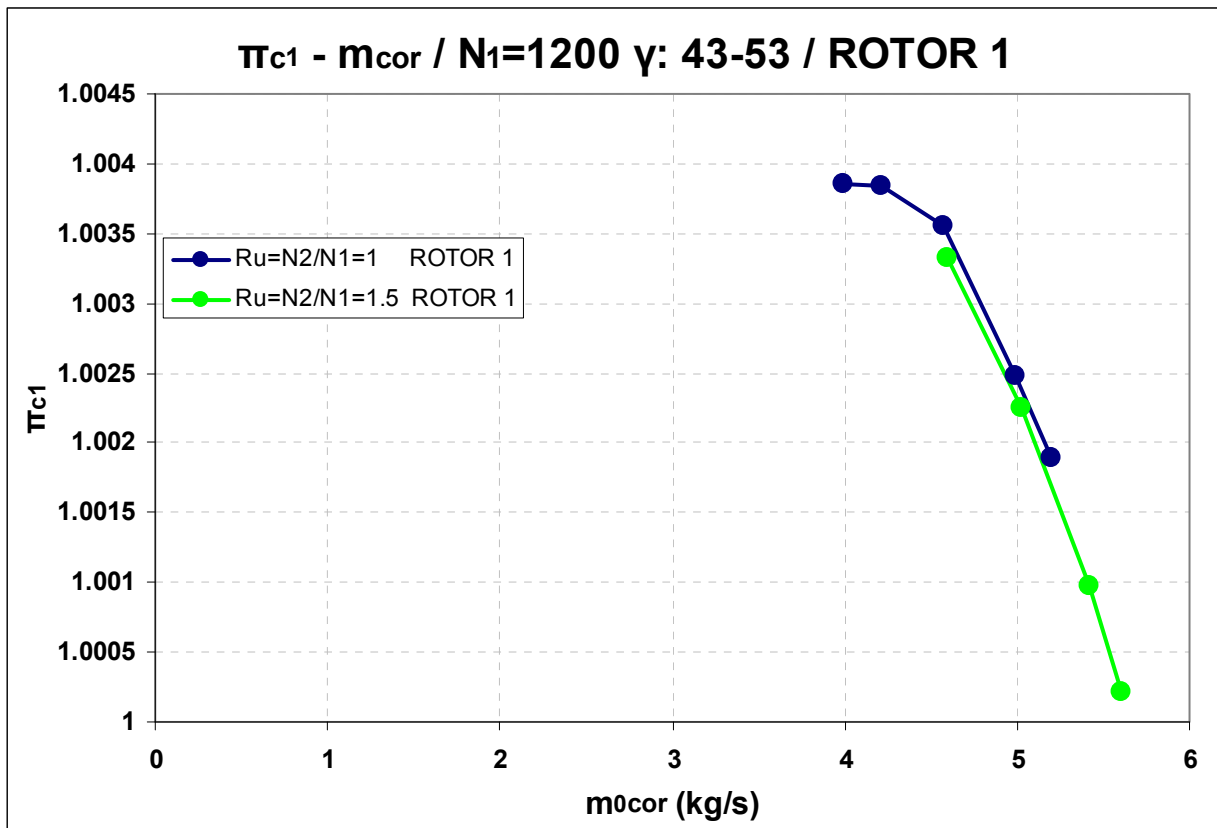
Σχήμα 4.67: $\Psi_{is,t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_1=1200$, γ : 30-43. Παράμετρος: R_u .



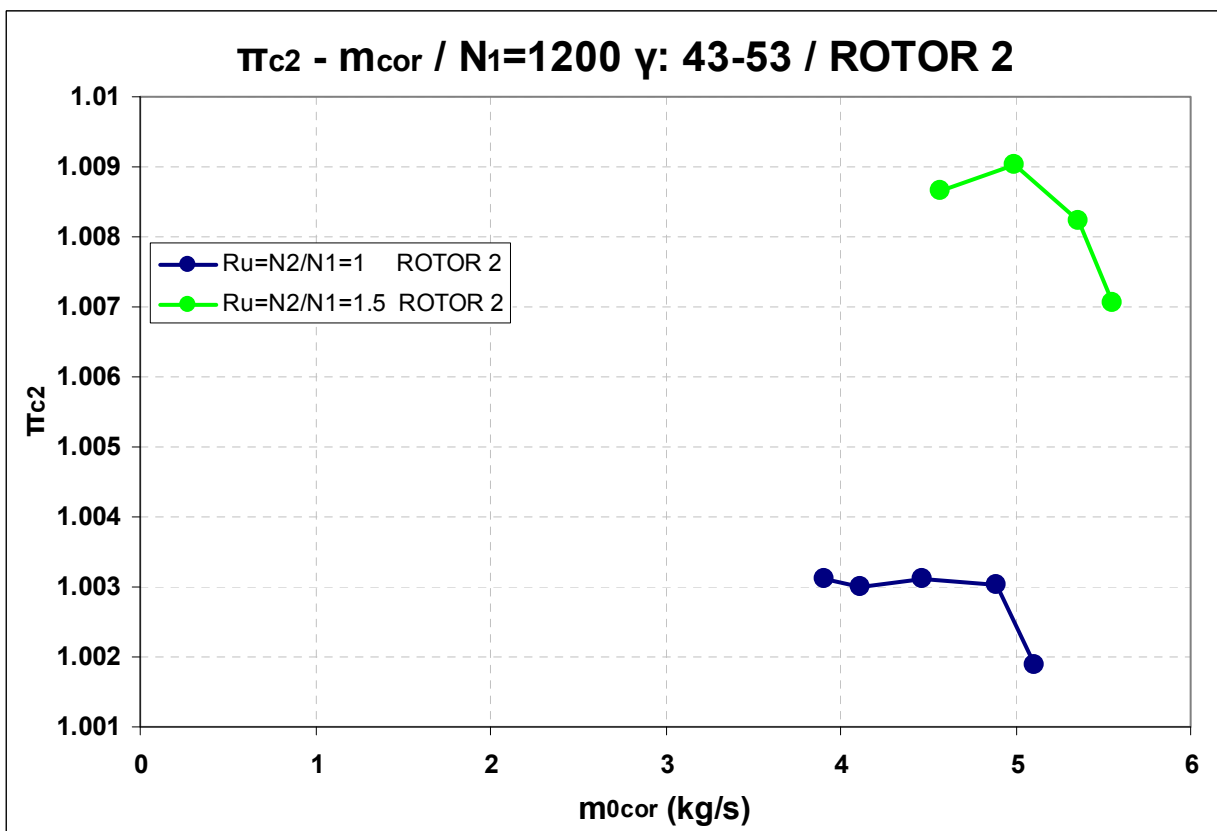
Σχήμα 4.68: Ψ_{is,t-t} - η_{t-t} - Φ για 1^ο και 2^ο Ρότορα για N₁ =1200. Λόγος στροφών : R_U=1.



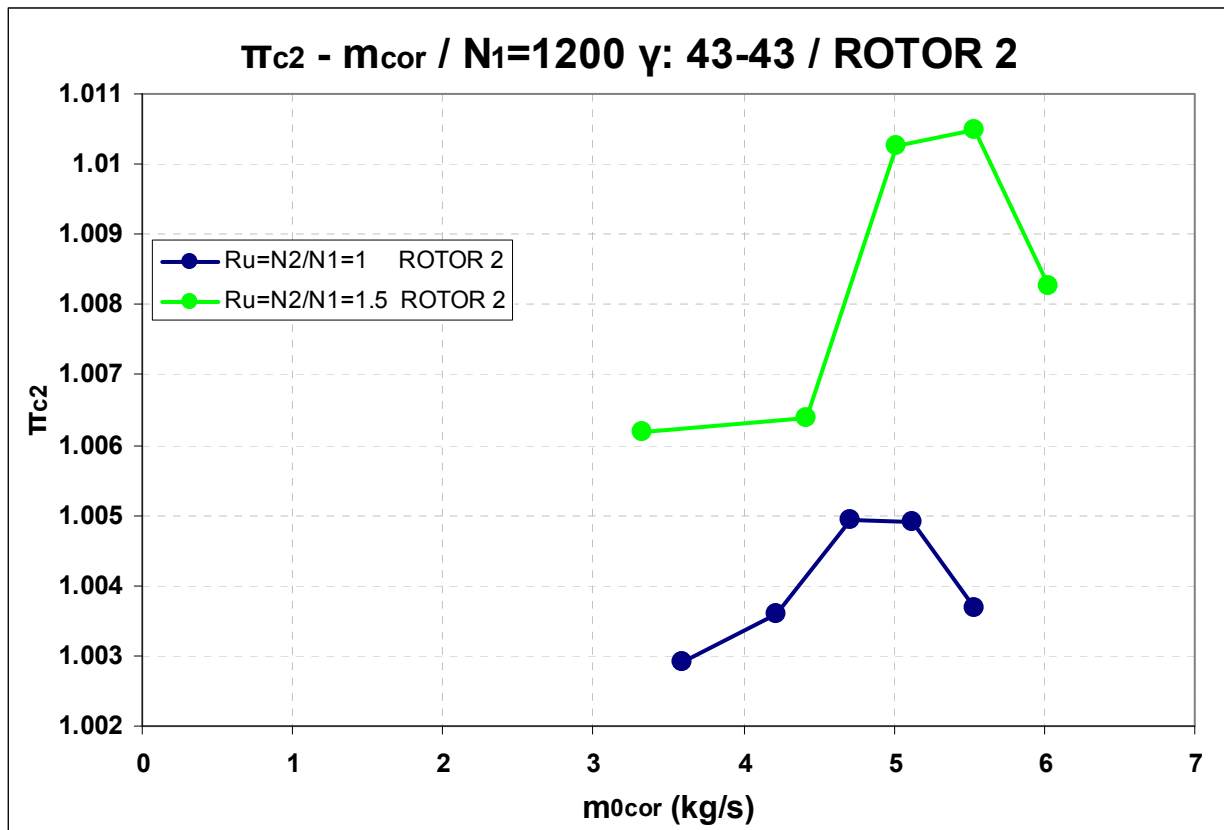
Σχήμα 4.69: $\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για 1^ο και 2^ο Ρότορα για $N_1=1200$. Λόγος στροφών : $R_U=1.5$.



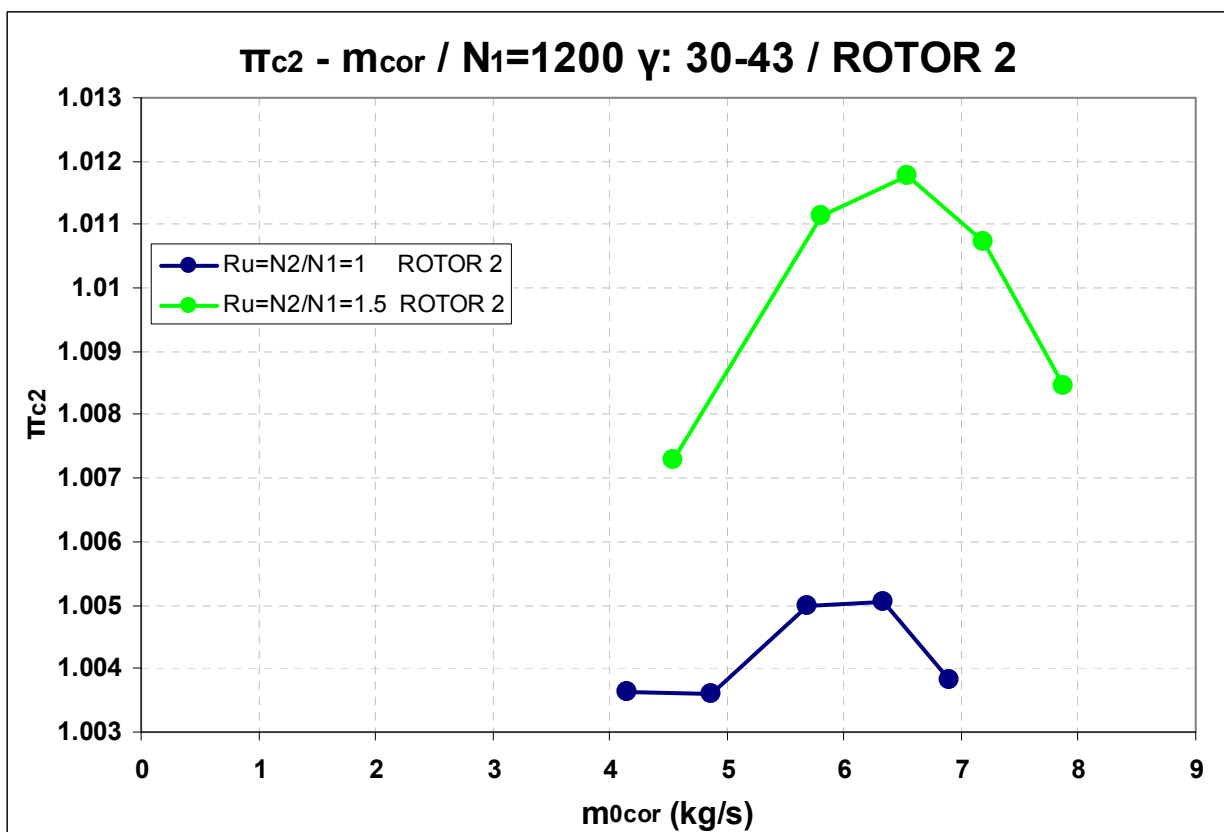
Σχήμα 4.70: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 1^ο Ρότορα για $N_1=1200$. Παράμετρος: Λόγος στροφών.



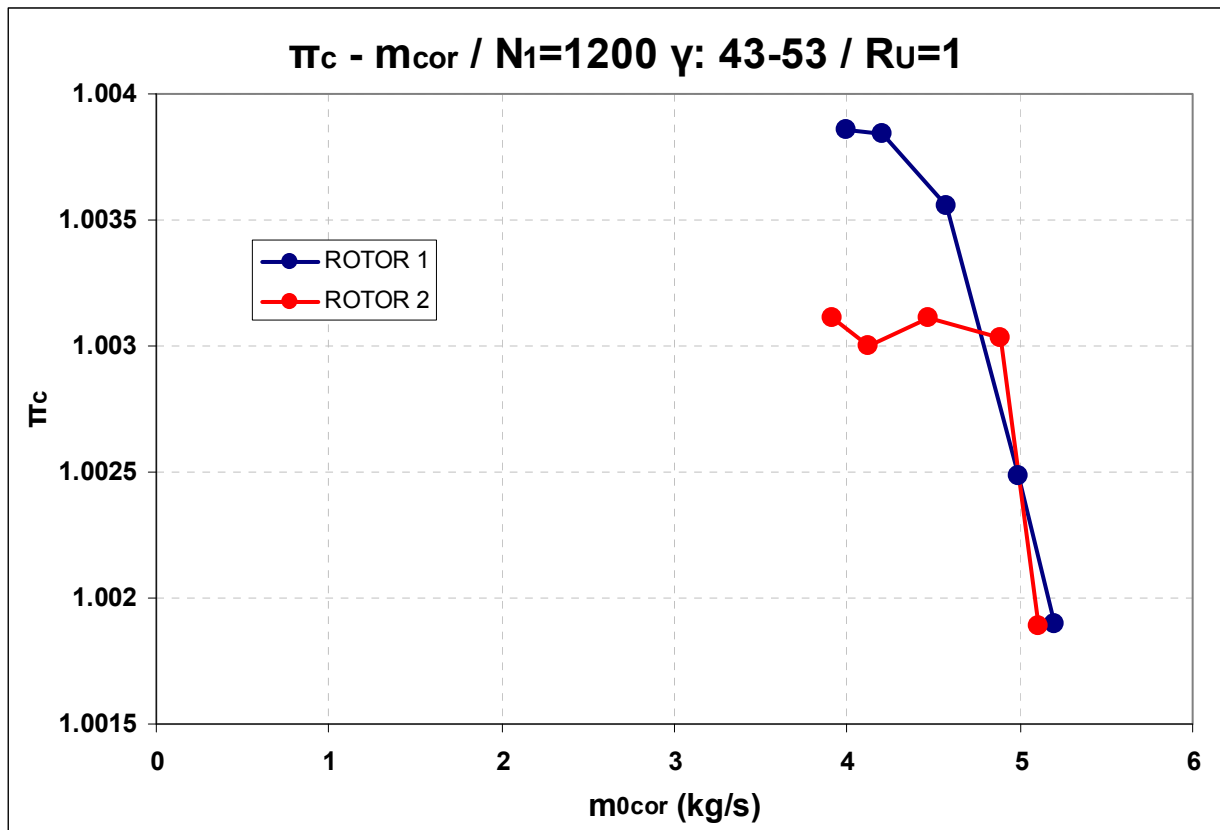
Σχήμα 4.71: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_1=1200$, $\gamma : 43-53$. Παράμετρος: R_u .



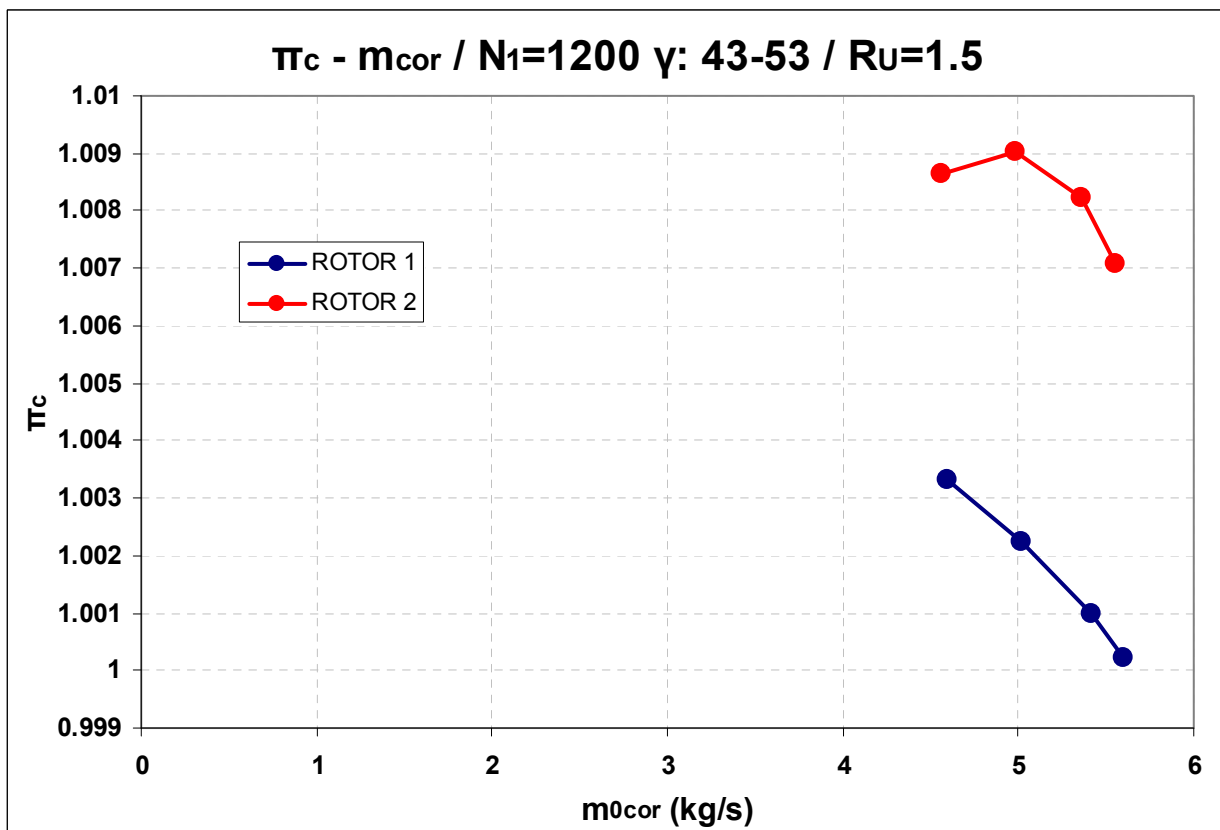
Σχήμα 4.72: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_1=1200$, $\gamma: 43-43$. Παράμετρος: R_u .



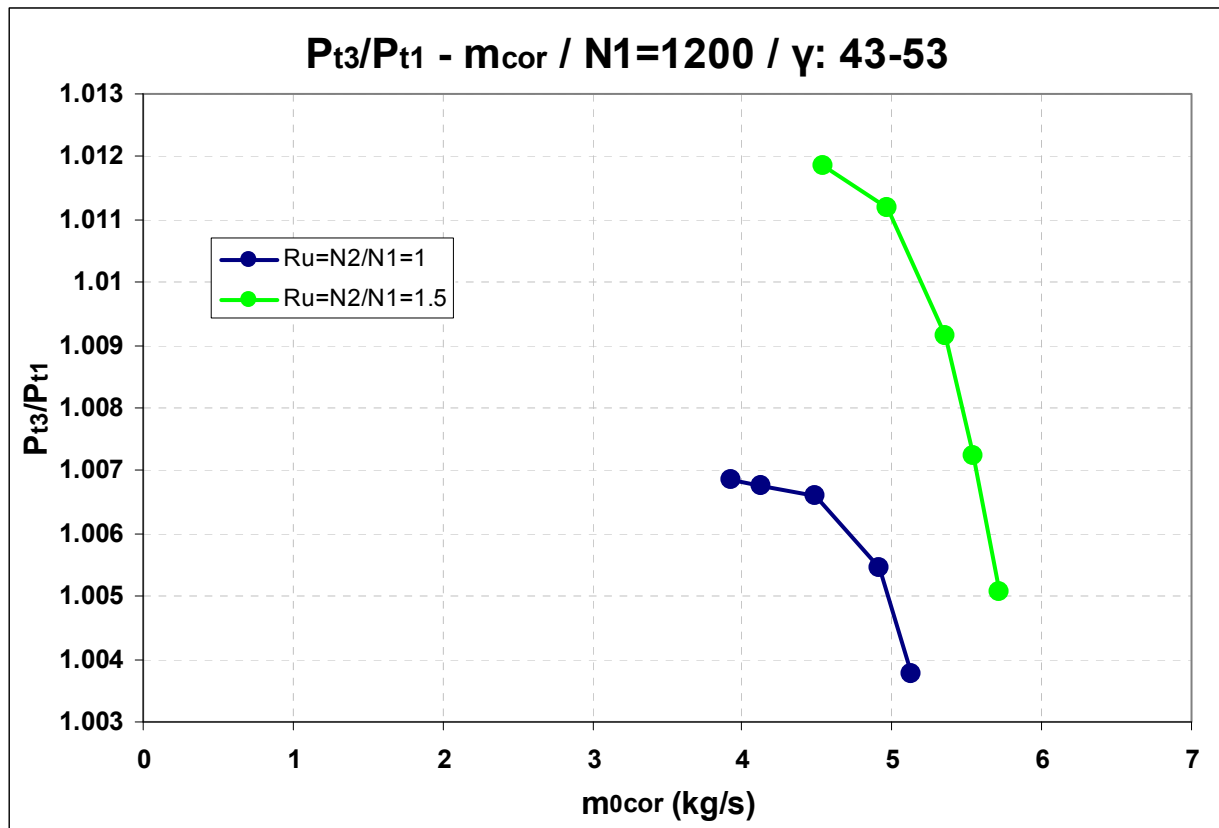
Σχήμα 4.73: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_1=1200$, $\gamma: 30-43$. Παράμετρος: R_u .



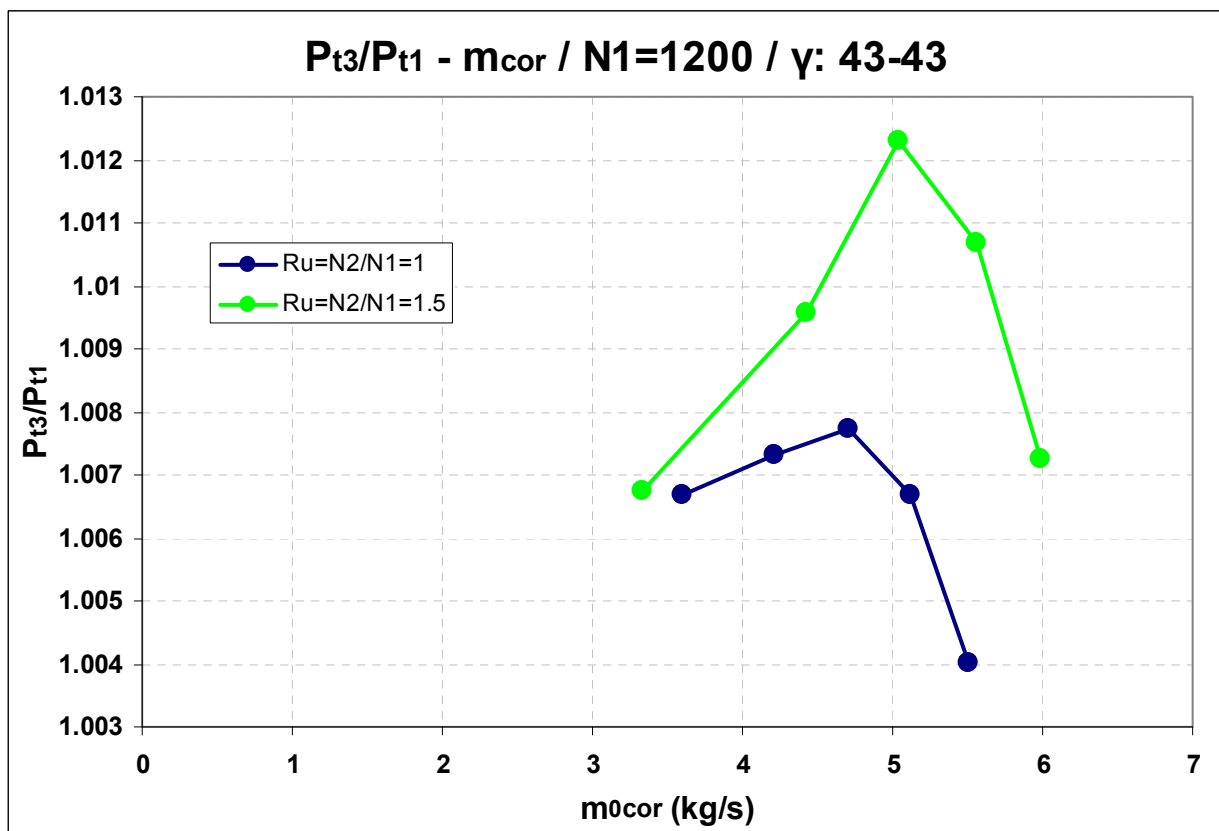
Σχήμα 4.74: π_c - m_{0cor} για 1^ο και 2^ο Ρότορα για N₁ =1200. Λόγος στροφών : R_U=1.



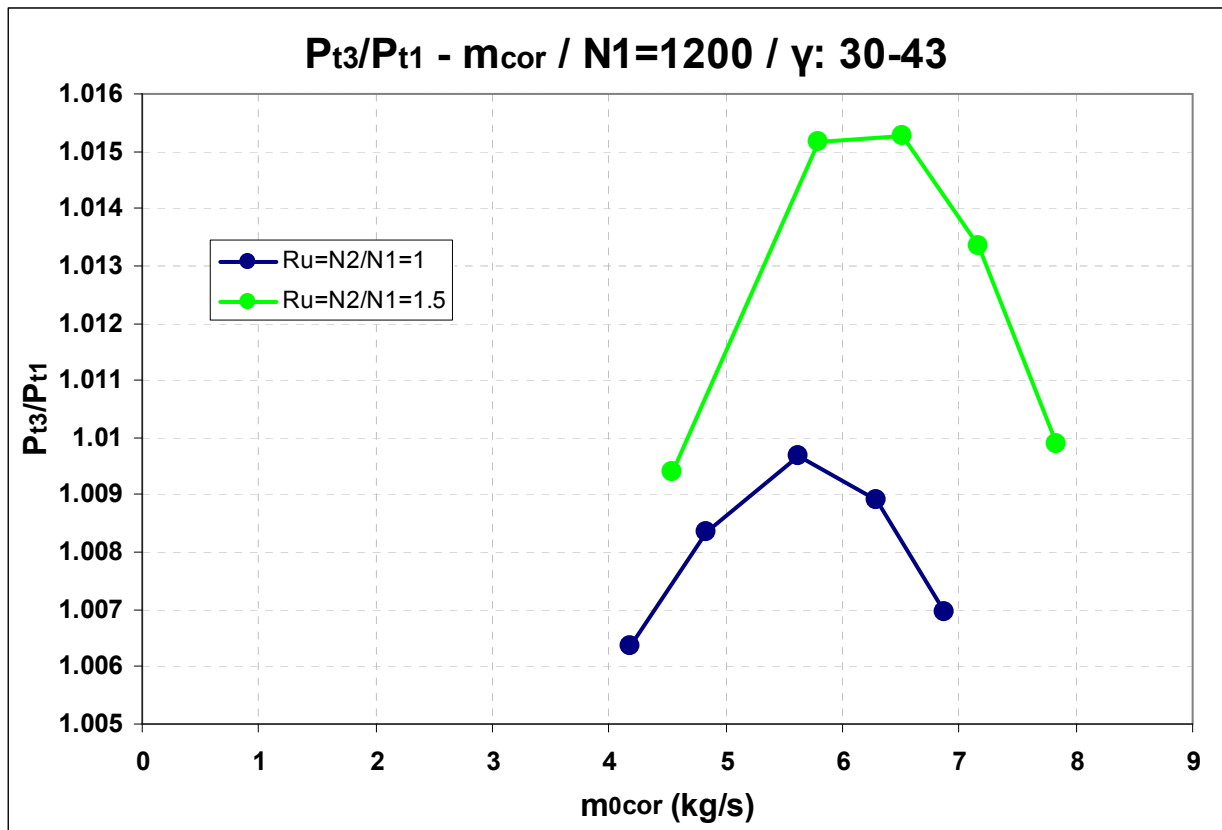
Σχήμα 4.75: π_c - m_{0cor} για 1^ο και 2^ο Ρότορα για N₁ =1200. Λόγος στροφών : R_U=1.5.



Σχήμα 4.76: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $N_1=1200$, $\gamma: 43-53$. Παράμετρος: R_u .



Σχήμα 4.77: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $N_1=1200$, $\gamma: 43-43$. Παράμετρος: R_u .



Σχήμα 4.78: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $N_1 = 1200$, $\gamma : 30-43$. Παράμετρος: R_U .

4.5.5 Επίδραση λόγου στροφών $R_U = N_2/N_1$ για $N_2=1200rpm$.

Οι λόγοι στροφών $R_U=N_2/N_1$ που μελετάμε είναι 1 και 1.5, με τον 2^ο ρότορα να στρέφεται στις 1200rpm, δηλαδή για τα ζεύγη στροφών 1200-1200 και 800-1200. Οι γωνίες κλίσης (stagger) των πτερυγίων είναι 43-53 για τον 1^ο και 2^ο ρότορα αντίστοιχα. Στο τέλος της παραγράφου παραθέτουμε και χαρακτηριστικές λόγου πίεσης και παροχής όλου του συμπιεστή για τους παραπάνω λόγους στροφών αλλά και για επιπλέον ζεύγη γωνιών stagger 43-43 και 30-43.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 1^ο Ρότορα (Σχήμα 4.79).

Εδώ παρατηρούμε και πάλι ότι οι χαρακτηριστικές Φ - Ψ του 1^{ου} ρότορα ταυτίζονται παρά τη μεταβολή στις στροφές του. Επιβεβαιώνεται έτσι η ανεξαρτησία της Φ - Ψ του 1^{ου} ρότορα από τον αριθμό στροφών του. Βέβαια, για λόγο στροφών $R_U=1.5$ βλέπουμε κομμάτι της Φ - Ψ που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα Φ και αυτό είναι λογικό αφού ο 1^{ος} ρότορας σε χαμηλότερες στροφές. Τα ίδια ισχύουν και για τους βαθμούς απόδοσης.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.80, Σχήμα 4.81, Σχήμα 4.82).

Εδώ παρατηρούμε τη μετατόπιση της χαρακτηριστικής του 2^{ου} προς μικρότερα Φ με αύξηση του λόγου στροφών R_U από 1 σε 1.5. Βέβαια, η μετατόπιση αυτή δε φαίνεται να είναι μόνο προς μικρότερα Φ , αλλά και προς μεγαλύτερα Ψ για την περίπτωση γωνιών κλίσης 43-53. Αυτό οφείλεται στο διαταραγμένο πεδίο ροής που βλέπει ο 2^{ος} ρότορας στη περίπτωση στροφών 1200-1200 όπως έχουμε ήδη αναφέρει, και θα περιμέναμε να μην στολάρει τόσο σύντομα, άρα να φτάνει το μέγιστο Ψ της περίπτωσης στροφών 800-1200. Επίσης, στην περίπτωση γωνιών κλίσης 43-43, η Φ - Ψ για $R_U=1.5$ είναι μεν μετατοπισμένη αριστερά, αλλά και προς μικρότερα Ψ , και αυτό οφείλεται στο ότι στην περίπτωση αυτή ο 2^{ος} ρότορας λειτουργεί ήδη από μεγάλες παροχές σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, με αποτέλεσμα να στολάρει αρκετά σύντομα. Η μετατόπιση της Φ - Ψ μόνο προς μικρότερα Φ είναι εμφανής για την περίπτωση γωνιών κλίσης 30-43.

Η φυσική ερμηνεία της μετατόπισης αυτής είναι αντίστοιχη με αυτήν που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4.5.3, όπου η παράμετρος ήταν οι γωνίες κλίσης των πτερυγίων. Έτσι κι εδώ λοιπόν, εφ' όσον οι στροφές του 2^{ου} ρότορα και η γεωμετρία του παραμένουν σταθερά, έχει μια συγκεκριμένη ικανότητα αύξησης του Ψ που εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και τον Re_c . Αλλάζοντας τις στροφές του 1^{ου} ρότορα αλλάζουμε την παροχή (άρα το Φ) στην οποία ο 2^{ος} ρότορας θα έχει την ίδια φόρτιση Ψ .

Η μετατόπιση αυτή μπορεί να ερμηνευθεί όπως και στην προηγούμενη παράγραφο μέσω της σχέσης (4.138) η οποία είναι :

$$\Phi_{II} = \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{21} + \tan \beta_3} \stackrel{\text{Στο σημείο σχεδίασης}}{=} \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{12}' + \tan \beta_{22}'}, \text{ (προσημασμένες οι } \beta)$$

Όπως παρατηρούμε, για σταθερό Ψ , εάν το R_U αυξηθεί (ελαττωθούν οι σ.α.λ. του 1^{ου}) ο αριθμητής της σχέσης μειώνεται, άρα μειώνεται και Φ_{II} αφού ο παρονομαστής μένει σχεδόν σταθερός τουλάχιστον κοντά στο σημείο σχεδίασης. Άρα, με την αύξηση του λόγου στροφών R_U η χαρακτηριστική Φ - Ψ του 2^{ου} μετατοπίζεται αριστερά προς μικρότερα Φ .

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για λόγο στροφών $R_U=1$ για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.68).

Η περίπτωση αυτή έχει αναλυθεί παραπάνω στο κεφάλαιο 4.5.4.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για λόγο στροφών $R_U=1.5$ για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.83).

Εδώ παρατηρούμε την ίδια συμπεριφορά όπως περιγράψαμε στην αντίστοιχη περίπτωση στο κεφάλαιο 4.5.4 στο Σχήμα 4.69.

$\pi_c - m_{cor}$ για τον 1^ο Ρότορα (Σχήμα 4.84).

Παρατηρούμε την αναμενόμενη μείωση του λόγου πίεσης και παροχής του 1^{ου} ρότορα για λόγο στροφών $R_U=1.5$, αφού με την αύξηση του R_U οι στροφές του 1^{ου} ρότορα ελαττώνονται από τις 1200 στις 800rpm.

$\pi_c - m_{cor}$ για τον 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.85, Σχήμα 4.86, Σχήμα 4.87).

Εδώ ισχύουν αυτά ακριβώς που ισχύουν για τις χαρακτηριστικές Φ - Ψ που αναφέραμε προηγουμένως. Η ομοιότητα αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι στροφές του 2^{ου} ρότορα είναι σταθερές.

$\pi_c - m_{cor}$ για λόγο στροφών $R_U=1$ για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.70).

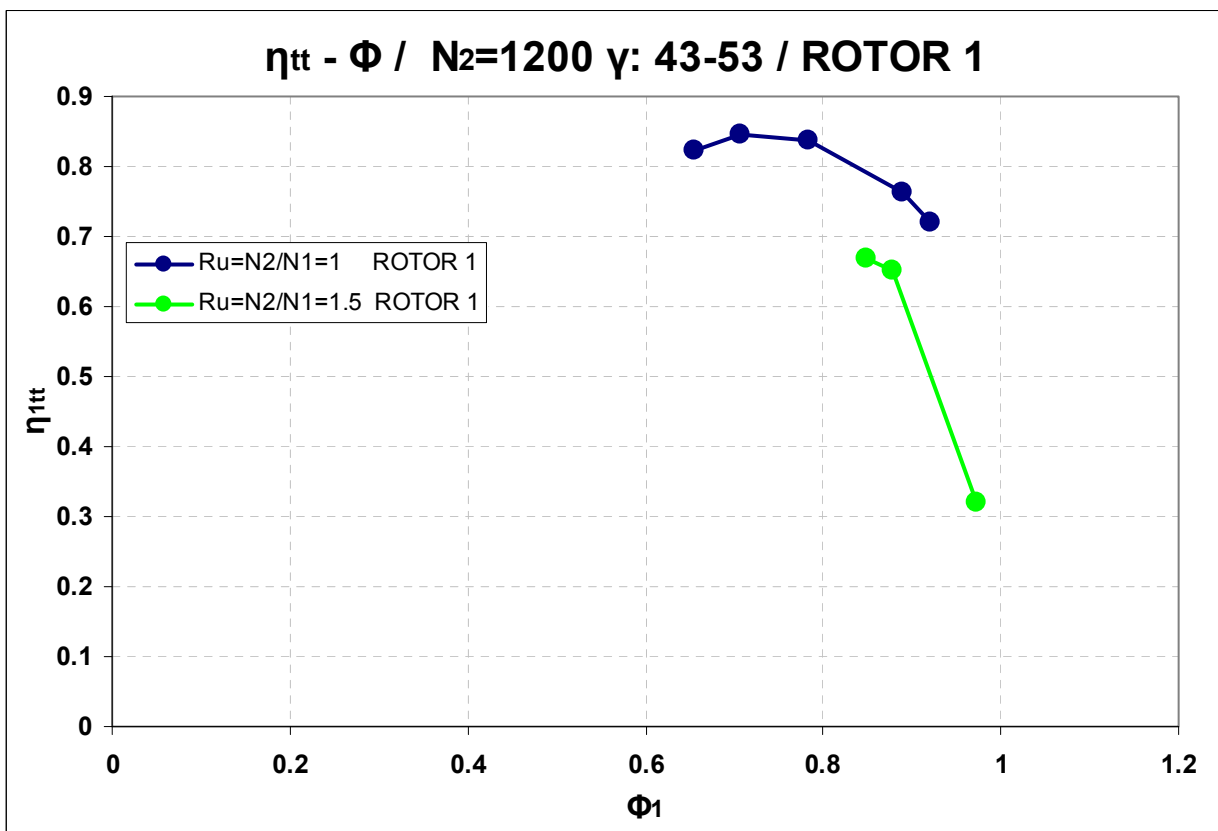
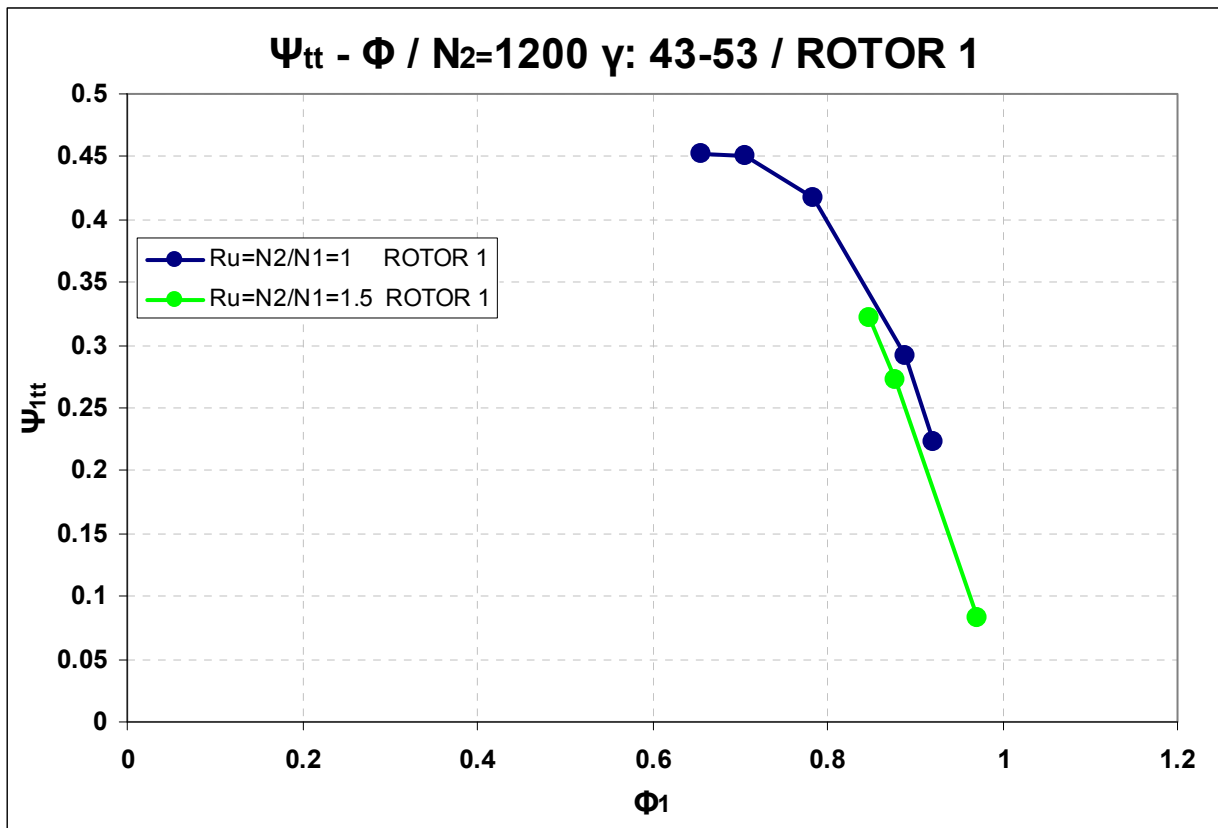
Η περίπτωση αυτή έχει αναλυθεί παραπάνω στο κεφάλαιο 4.5.4.

$\pi_c - m_{cor}$ για λόγο στροφών $R_U=1.5$ για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.88).

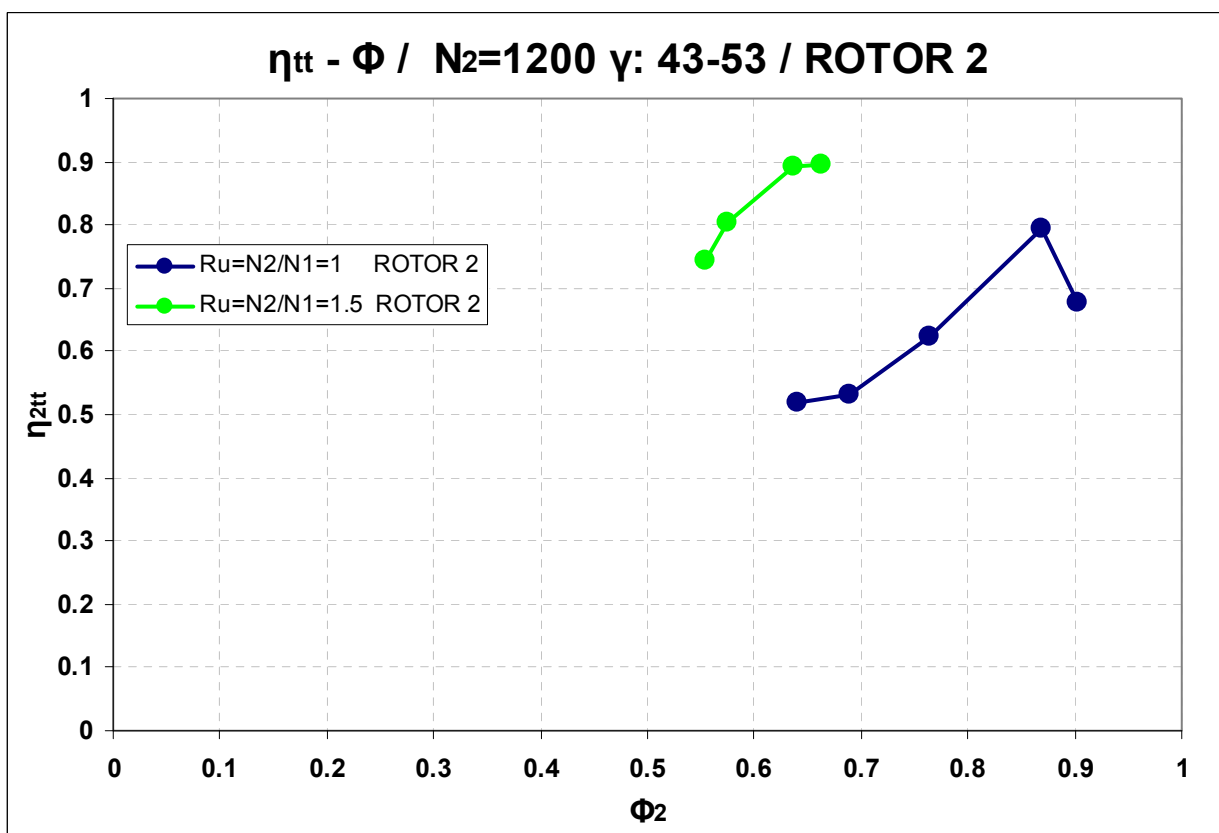
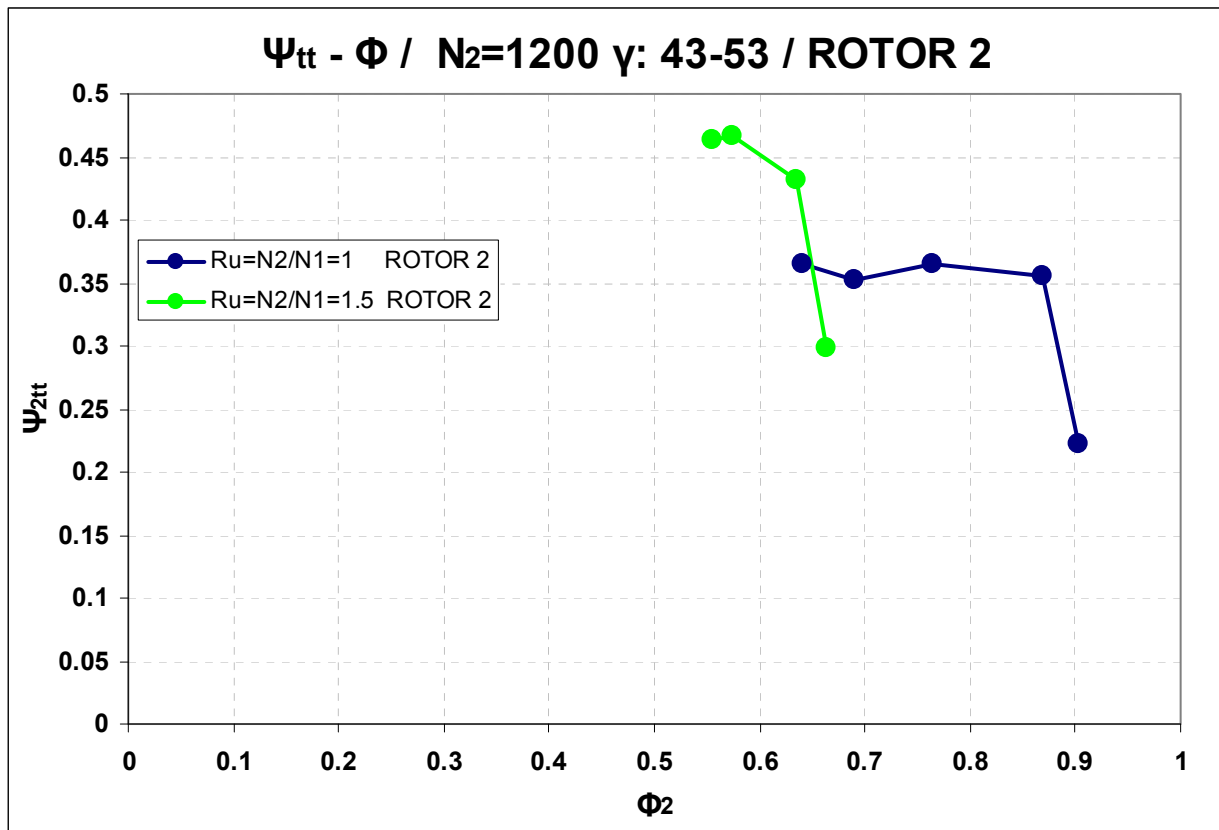
Εδώ παρατηρούμε την αναμενόμενη αυξημένη πίεση που παράγει ο 2^{ος} αφού στρέφεται ταχύτερα από τον 1^ο. Επίσης είναι φανερό ότι πρώτα στολάρει ο 2^{ος} ρότορας ενώ ο 1^{ος} δεν έχει ακόμα φτάσει στο σημείο αποκόλλησης.

$\pi_c - m_{0cor}$ του συμπιεστή για λόγο στροφών 1 και 1.5 και ζεύγη γωνιών stagger 43-53, 43-43, 30-43 (Σχήμα 4.89, Σχήμα 4.90, Σχήμα 4.91).

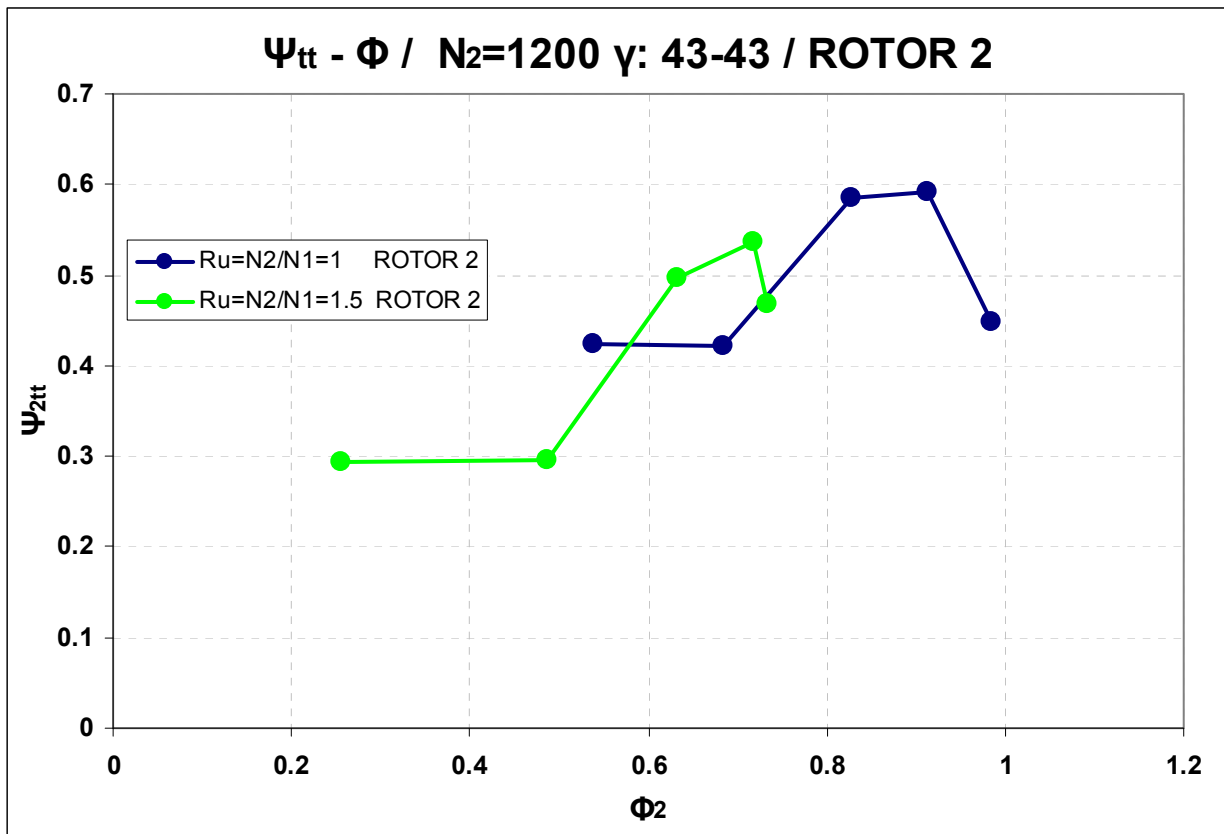
Στις χαρακτηριστικές για όλα τα ζεύγη γωνιών κλίσης παρατηρούμε την αναμενόμενη αύξηση του λόγου πίεσης και παροχής για αύξηση των στροφών του 1^{ου} ρότορα από τις 800 στις 1200rpm. Παράλληλα, παρατηρούμε μια πλάτυνση των χαρακτηριστικών για αυξημένες σ.α.λ. του 1^{ου} ρότορα, γεγονός που σημαίνει ότι με την αύξηση στροφών του 2^{ου} ρότορα έχουμε μεγαλύτερο περιθώριο λειτουργίας του συμπιεστή.



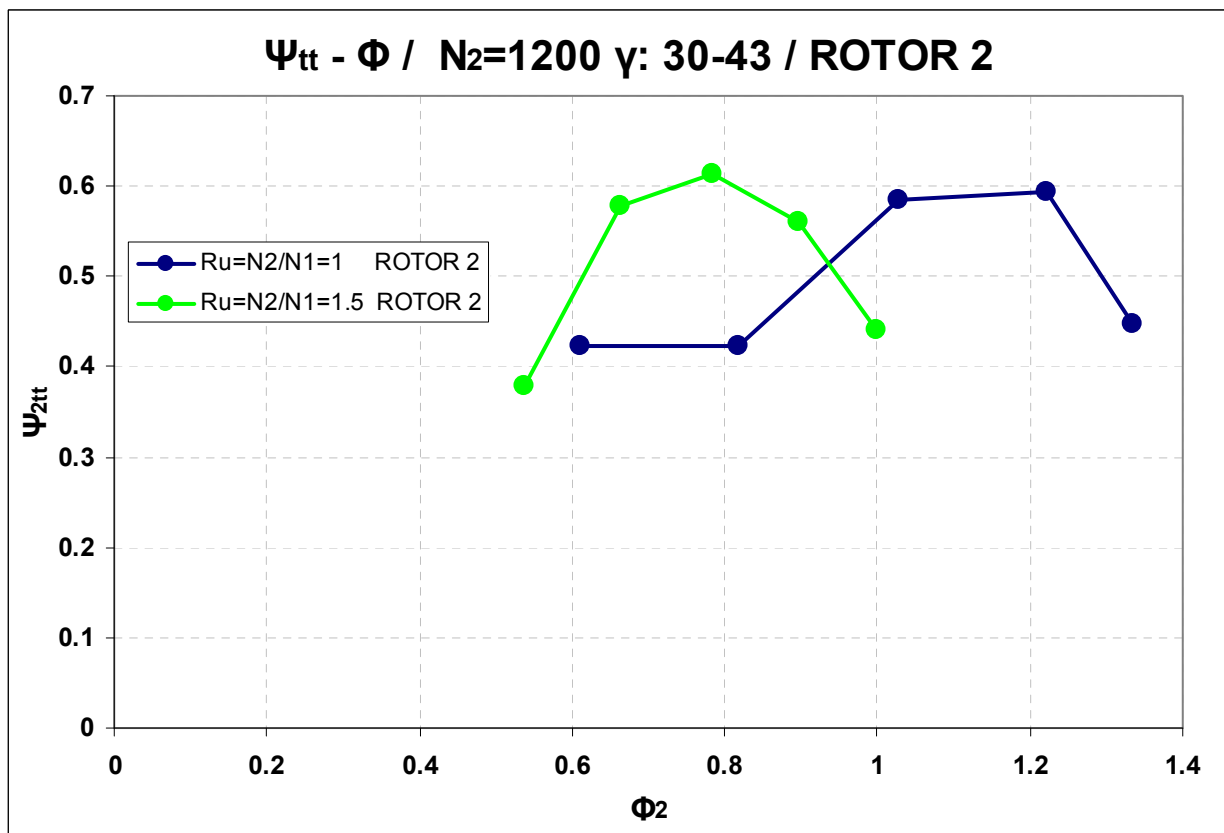
Σχήμα 4.79: Ψ_{is,t-t} - η_{t-t} - Φ για τον 1^ο Ρότορα για N₂= 1200. Παράμετρος: Λόγος στροφών.



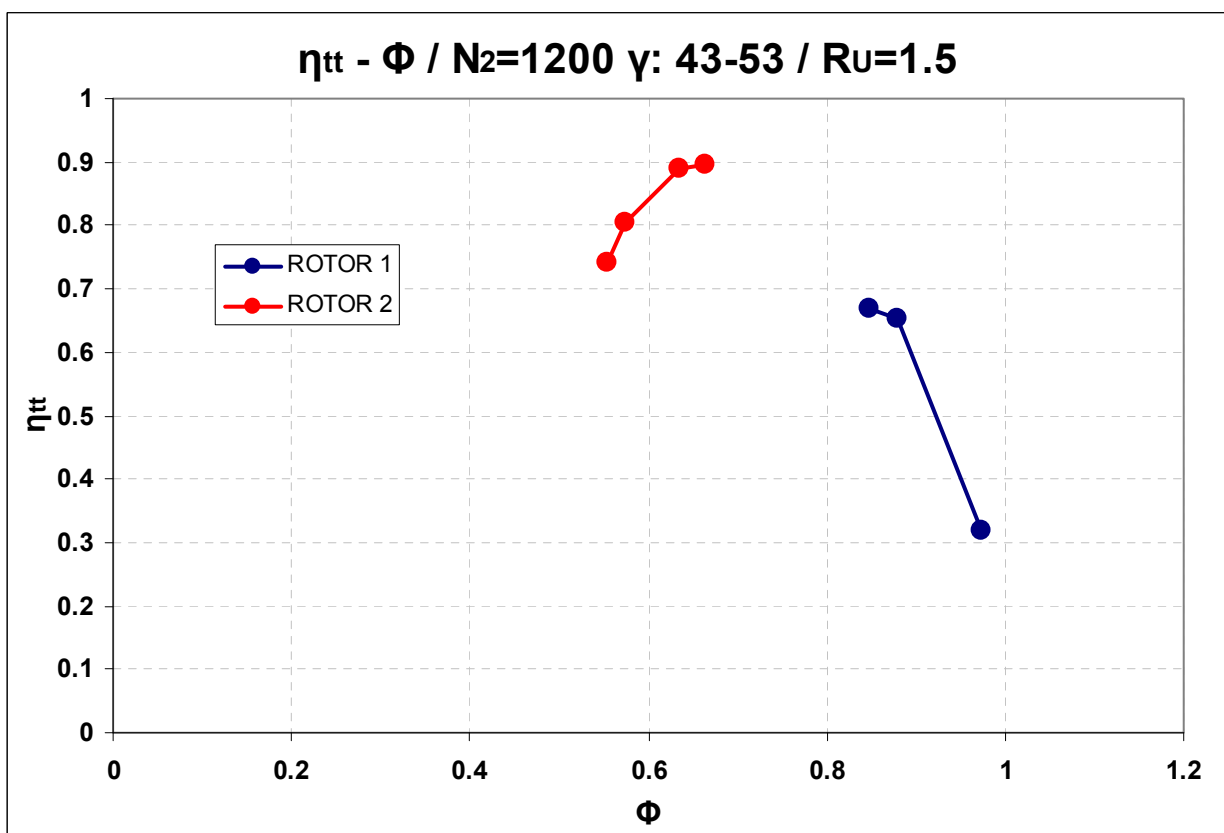
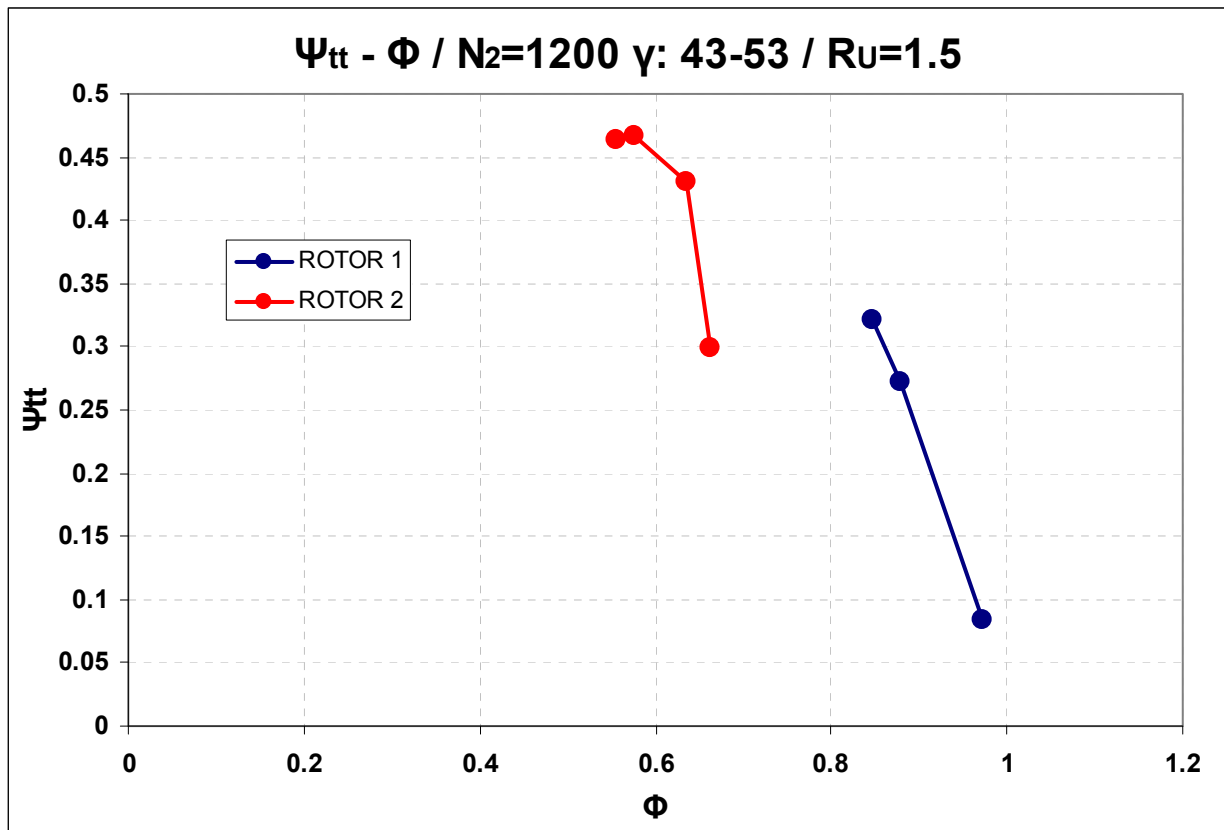
Σχήμα 4.80: $\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_2=1200$, $\gamma: 43-53$. Παράμετρος: R_U .



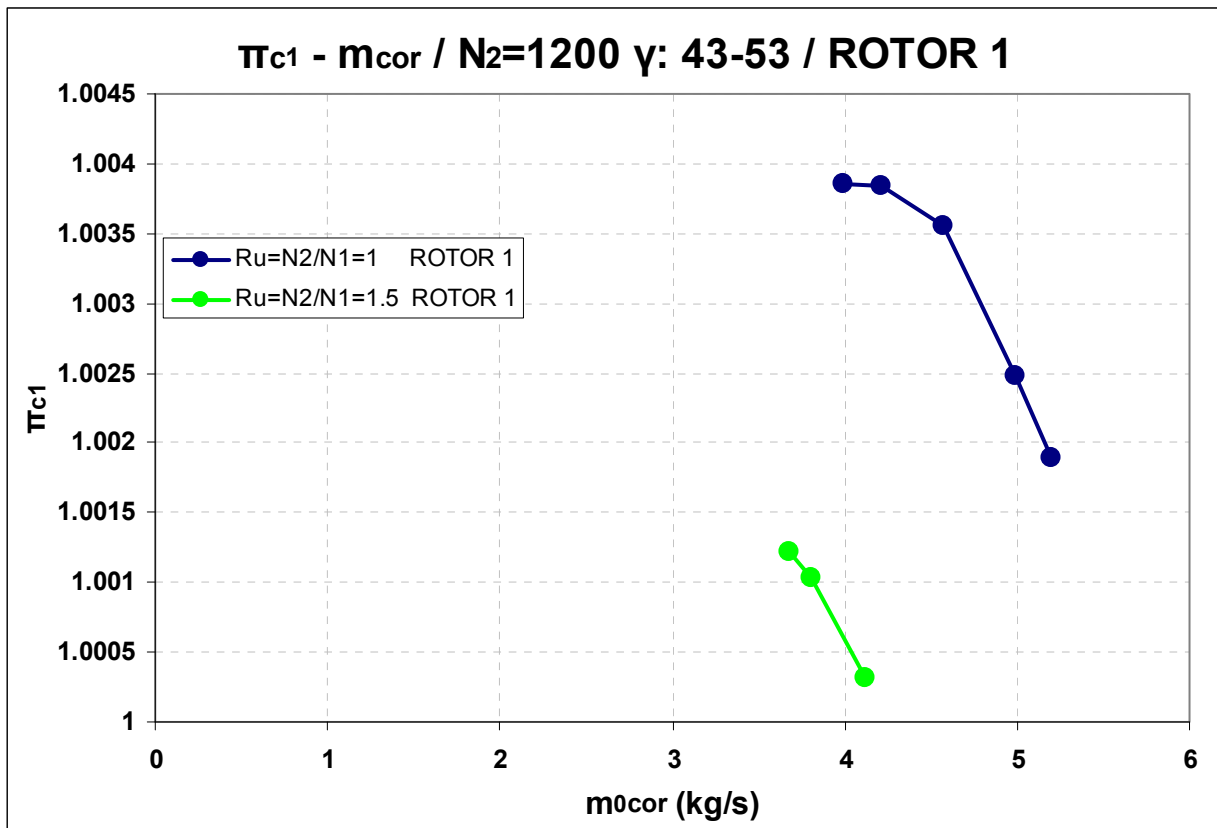
Σχήμα 4.81: Ψ_{is,t-t}-Φ για τον 2^ο Ρότορα για N₂= 1200, γ : 43-43. Παράμετρος: R_U.



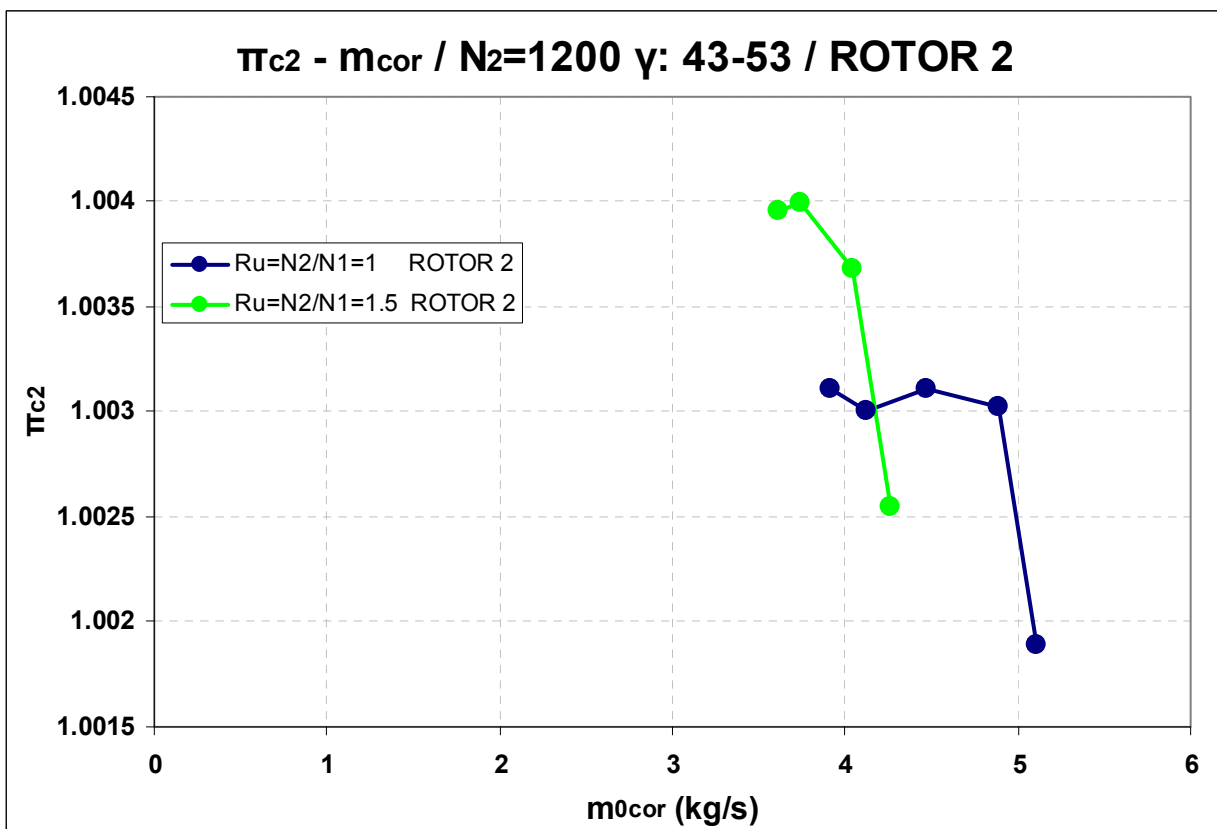
Σχήμα 4.82: Ψ_{is,t-t}-Φ για τον 2^ο Ρότορα για N₂= 1200, γ : 30-43. Παράμετρος: R_U.



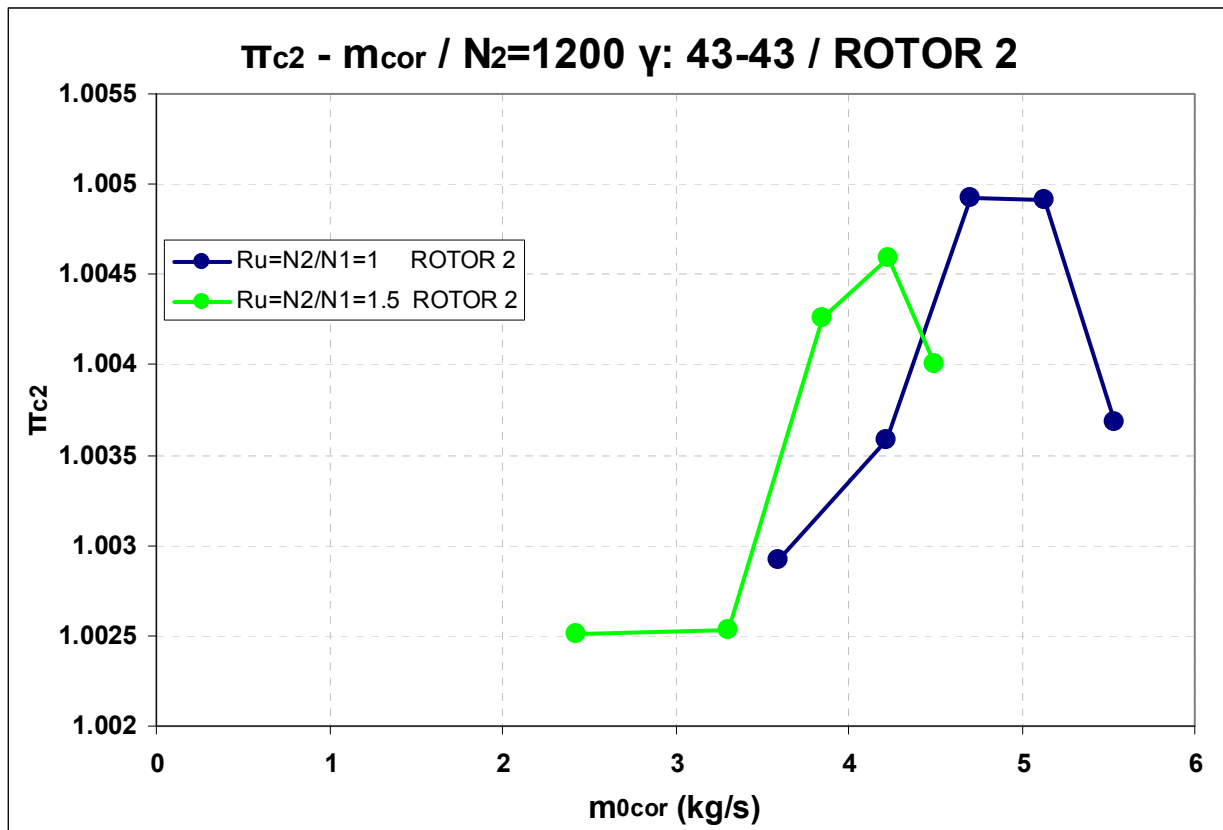
Σχήμα 4.83: $\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για 1^ο και 2^ο Ρότορα για $N_2 = 1200$. Λόγος στροφών : $R_U = 1.5$.



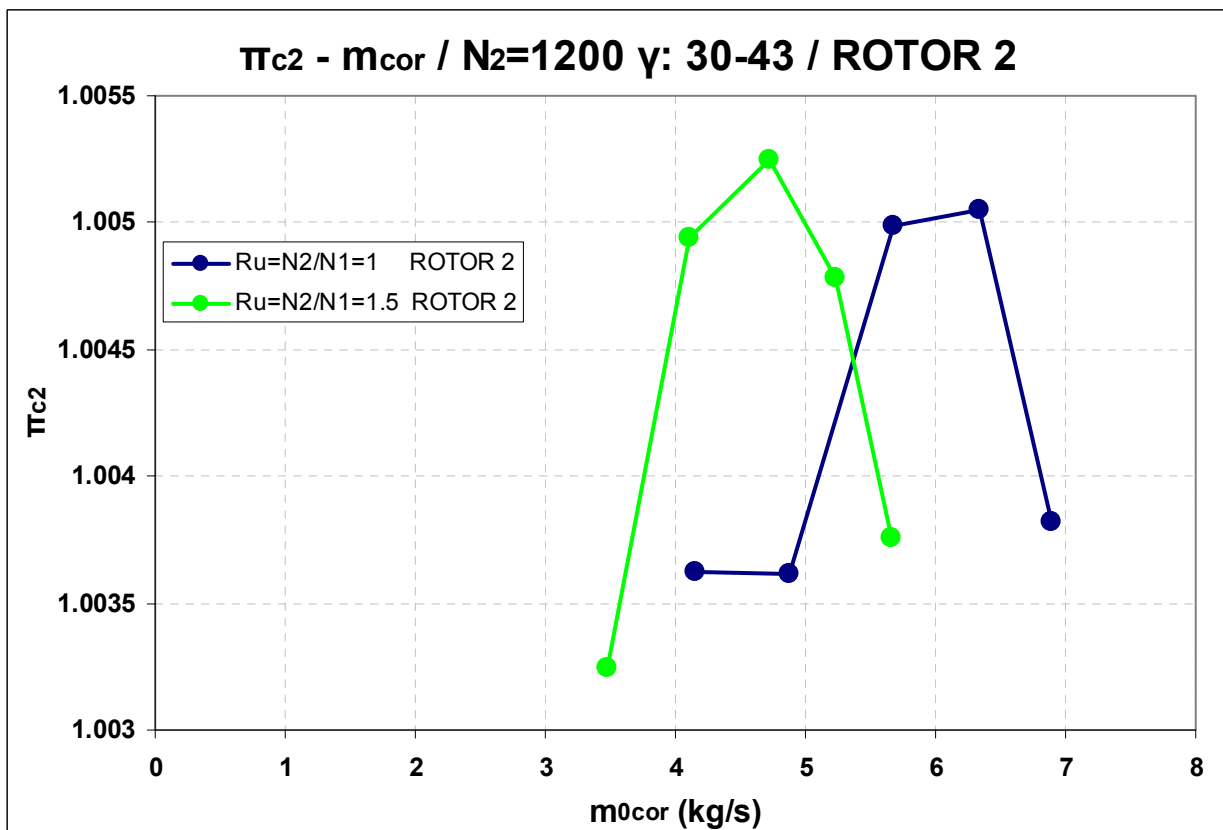
Σχήμα 4.84: π_c - m_{0cor} για τον 1^ο Ρότορα για N₂= 1200. Παράμετρος: Λόγος στροφών.



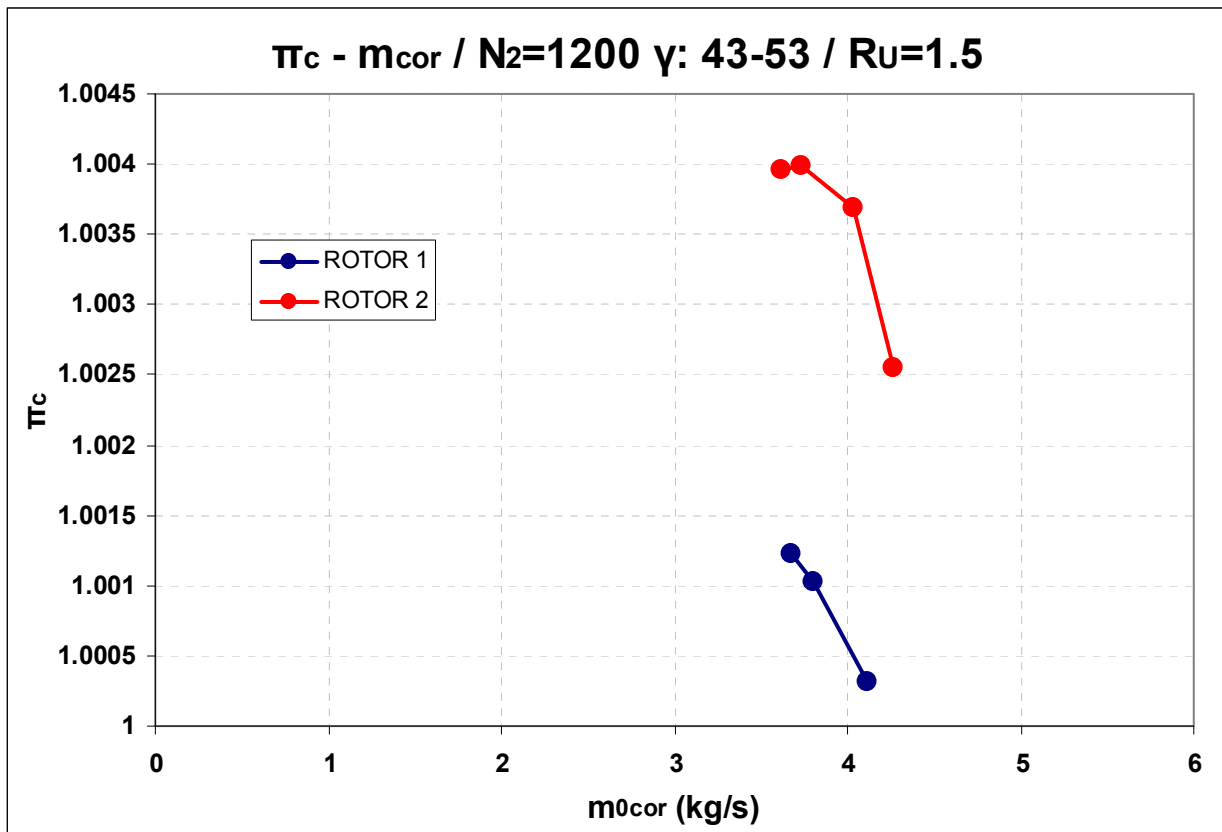
Σχήμα 4.85: π_c - m_{0cor} για τον 2^ο Ρότορα για N₂= 1200, γ : 43-53. Παράμετρος: R_U.



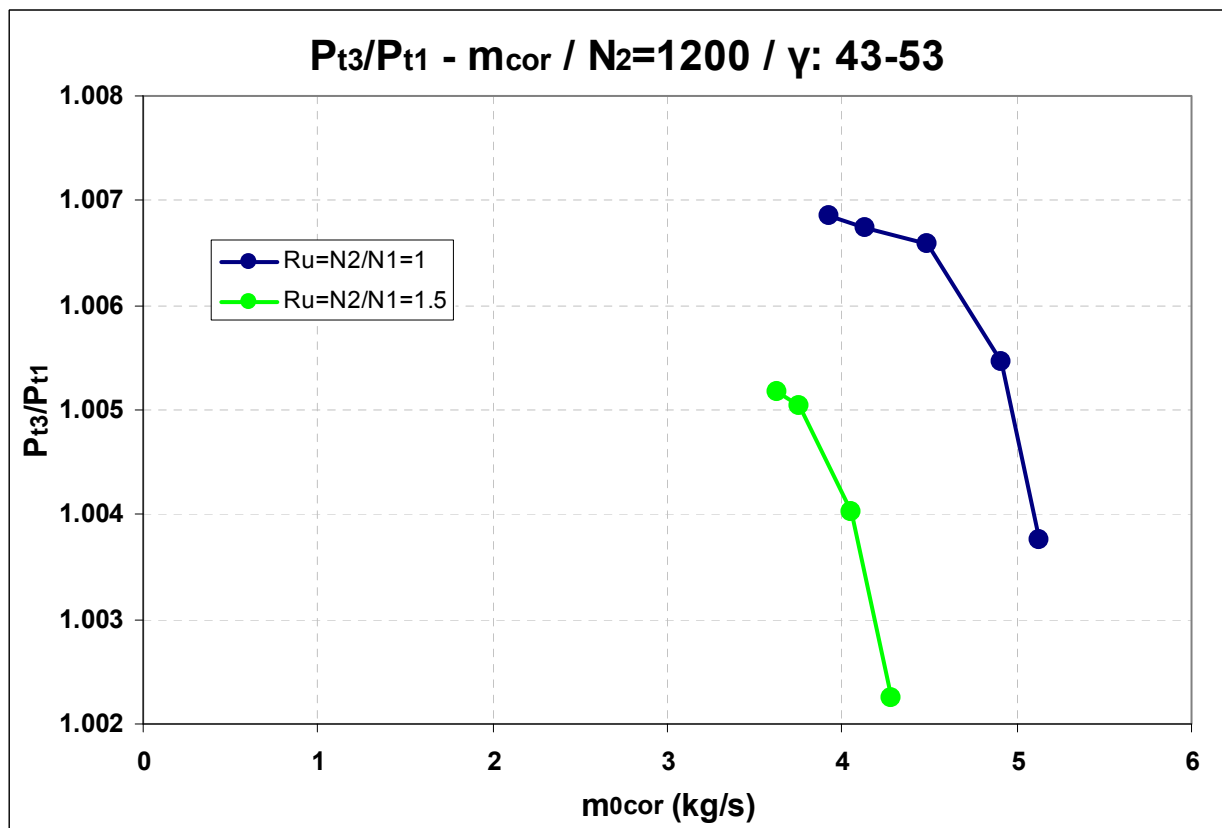
Σχήμα 4.86: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_2=1200$, $\gamma: 43-43$. Παράμετρος: R_u .



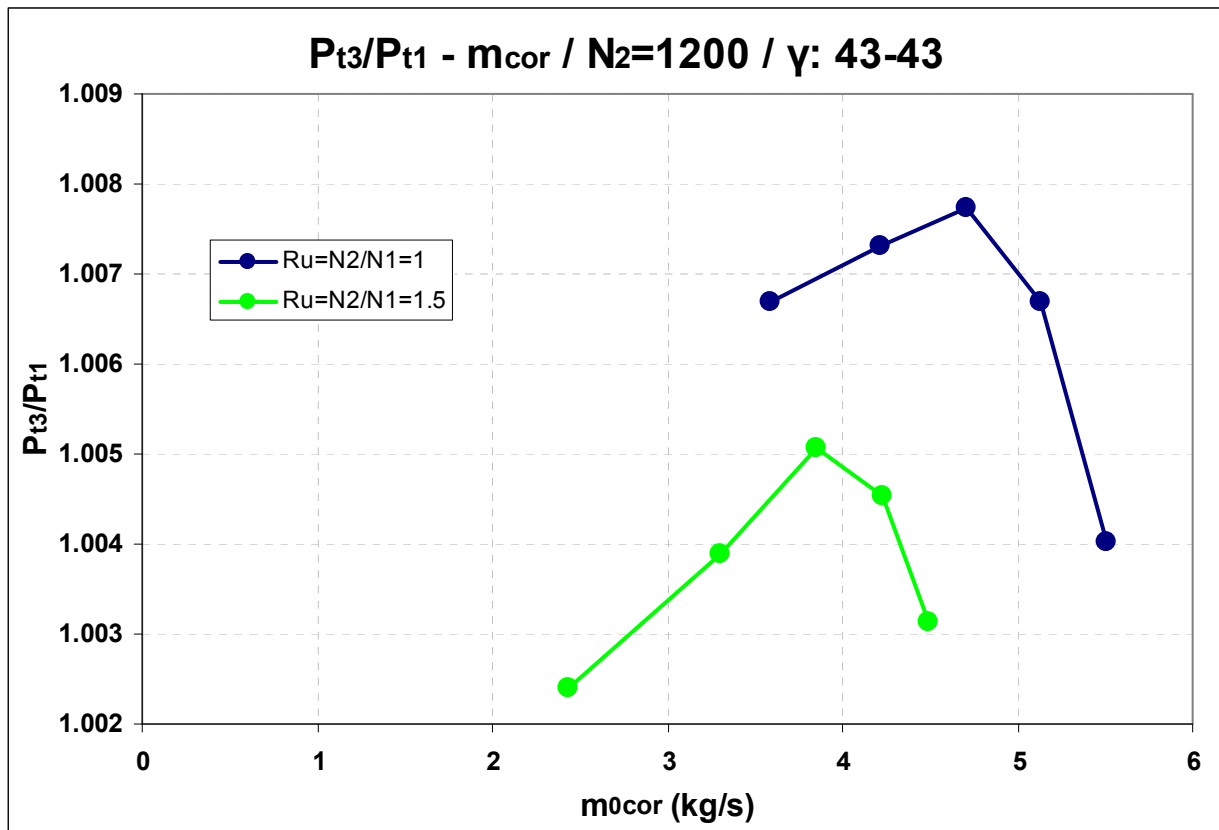
Σχήμα 4.87: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^ο Ρότορα για $N_2=1200$, $\gamma: 30-43$. Παράμετρος: R_u .



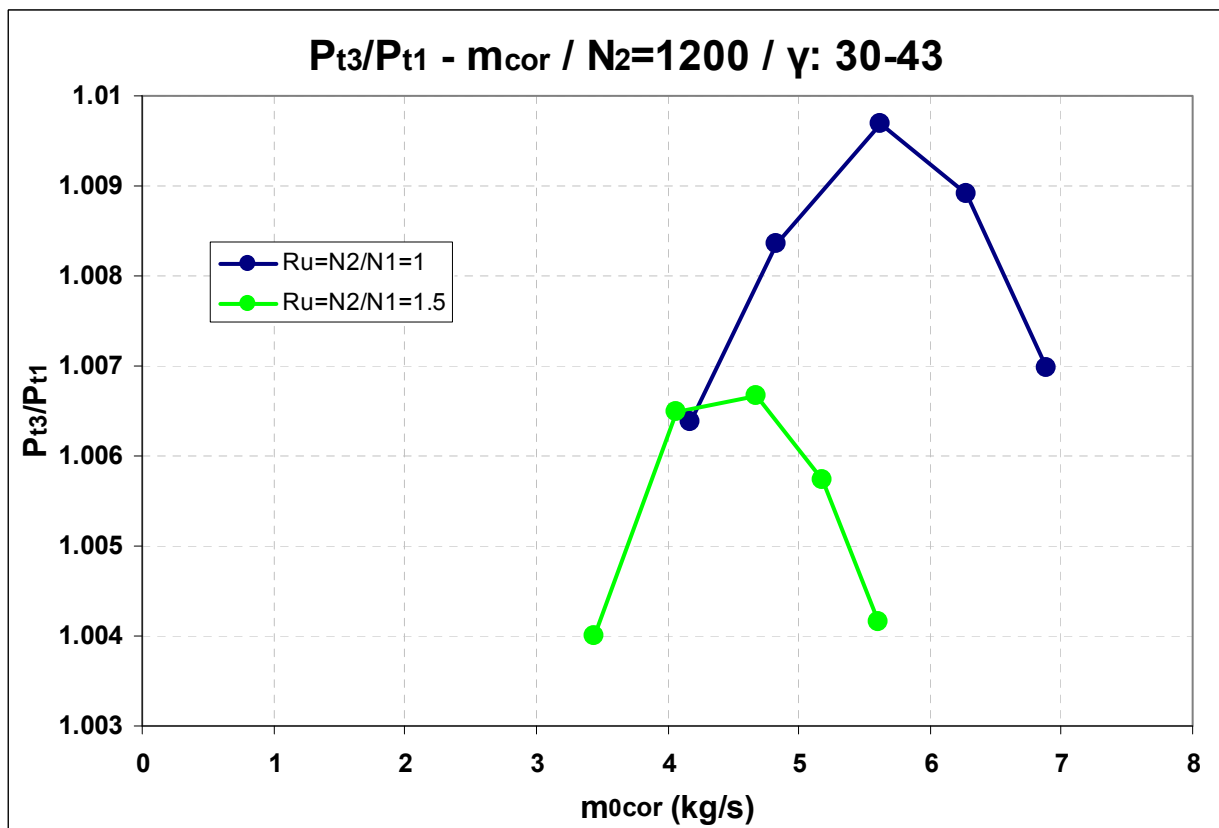
Σχήμα 4.88: : π_c - m_{0cor} για 1^ο και 2^ο Ρότορα για N₂ =1200. Λόγος στροφών : R_U=1.5.



Σχήμα 4.89: π_c - m_{0cor} για τον συμπιεστή για N₂= 1200, γ : 43-53. Παράμετρος: R_U.



Σχήμα 4.90: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $N_2=1200$, $\gamma: 43-43$. Παράμετρος: R_u .



Σχήμα 4.91: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $N_2=1200$, $\gamma: 30-43$. Παράμετρος: R_u .

4.5.6 Επίδραση στροφών για λόγο στροφών $R_U = N_2/N_1 = 1.5$.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 1^ο Ρότορα (Σχήμα 4.92).

Παρατηρούμε ότι οι χαρακτηριστικές σχεδόν ταυτίζονται παρά τη μεταβολή στις στροφές του 1^{ου} ρότορα. Βέβαια, φαίνεται πως η Φ - Ψ 1200-1800 είναι μετατοπισμένη λίγο δεξιότερα προς μεγαλύτερα Φ . Αυτό δεν είναι αναμενόμενο, καθώς η απόλυτη γωνία εισόδου στον 1^ο ρότορα δε μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου. Πιθανό να οφείλεται στο ότι στη μέτρηση 1200-1800 τα προφίλ των μεγεθών δε δείχνουν την έντονη αποκόλληση στο πόδι του 1^{ου} ρότορα που βλέπουμε στην περίπτωση 800-1200, με αποτέλεσμα στην περίπτωση 1200-1800 η παροχή που αναρροφάται να είναι αναλογικά μεγαλύτερη. Αντίστοιχα ισχύουν και για τους βαθμούς απόδοσης.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.93, Σχήμα 4.94, Σχήμα 4.95).

Εδώ παρατηρούμε ότι οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, με την χαρακτηριστική για 1200-1800 να είναι ελαφρώς μετατοπισμένη προς μεγαλύτερα Φ . Αυτό πιθανόν οφείλεται στη εξήγηση που δώσαμε παραπάνω για τον 1^ο ρότορα. Αναμέναμε οι χαρακτηριστικές να ταυτίζονται καθώς ο λόγος στροφών R_U παραμένει σταθερός, έτσι τα τρίγωνα ταχύτητας μεταξύ των περιπτώσεων στροφών 800-1200 και 1200-1800 είναι όμοια.

Η ίδια συμπεριφορά φαίνεται και στα υπόλοιπα διαγράμματα για γωνίες κλίσης 43-43 και 30-43 (Σχήμα 4.94 και Σχήμα 4.95).

Η ταύτιση αυτή των χαρακτηριστικών Φ - Ψ για ίδιο λόγο στροφών αλλά διαφορετικές στροφές, μπορεί να ερμηνευθεί όπως και στην προηγούμενη παράγραφο μέσω της σχέσης (4.138) η οποία είναι :

$$\Phi_{II} = \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{21} + \tan \beta_3} \underset{\substack{\text{Στο σημείο σχεδίασης} \\ \tan \beta_{21} = \tan \beta_{12}' \\ \tan \beta_3 = \tan \beta_{22}'}}{=}}{\frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{12}' + \tan \beta_{22}'}}}, \text{ (προσημασμένες οι } \beta \text{)}$$

Όπως παρατηρούμε, για σταθερό Ψ , το Φ εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία και το λόγο στροφών R_U . Άρα, για σταθερή γεωμετρία (γωνίες κλίσης) και σταθερό λόγο στροφών R_U , η χαρακτηριστική Φ - Ψ του 2^{ου} ρότορα παραμένει αναλλοίωτη.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για στροφές 800-1200 για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.83).

Το διάγραμμα αυτό έχει ήδη σχολιασθεί στο κεφάλαιο 4.5.5.

$\Psi_{is,t-t} - \eta_{t-t} - \Phi$ για στροφές 1200-1800 για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.69).

Το διάγραμμα αυτό έχει ήδη σχολιασθεί στο κεφάλαιο 4.5.4.

$\pi_c - m_{0cor}$ για τον 1^ο Ρότορα (Σχήμα 4.96).

Εδώ παρατηρούμε την αναμενόμενη μετατόπιση της χαρακτηριστικής προς μεγαλύτερους λόγους πίεσης και παροχής με την αύξηση των στροφών του 1^{ου} ρότορα από τις 800 στις 1200rpm.

$\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.97, Σχήμα 4.98, Σχήμα 4.99).

Εδώ παρατηρούμε την αναμενόμενη μετατόπιση της χαρακτηριστικής προς μεγαλύτερους λόγους πίεσης και παροχής με την αύξηση των στροφών του 2^{ου} ρότορα από τις 1200 στις 1800rpm, για όλα τα ζεύγη γωνιών κλίσης. Παράλληλα, παρατηρούμε και μια πλάτυνση της χαρακτηριστικής που σημαίνει ότι με την αύξηση των στροφών των πτερωτών έχουμε αύξηση του περιθωρίου λειτουργίας του 2^{ου} ρότορα.

$\pi_c - m_{0cor}$ για στροφές 800-1200 για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.88).

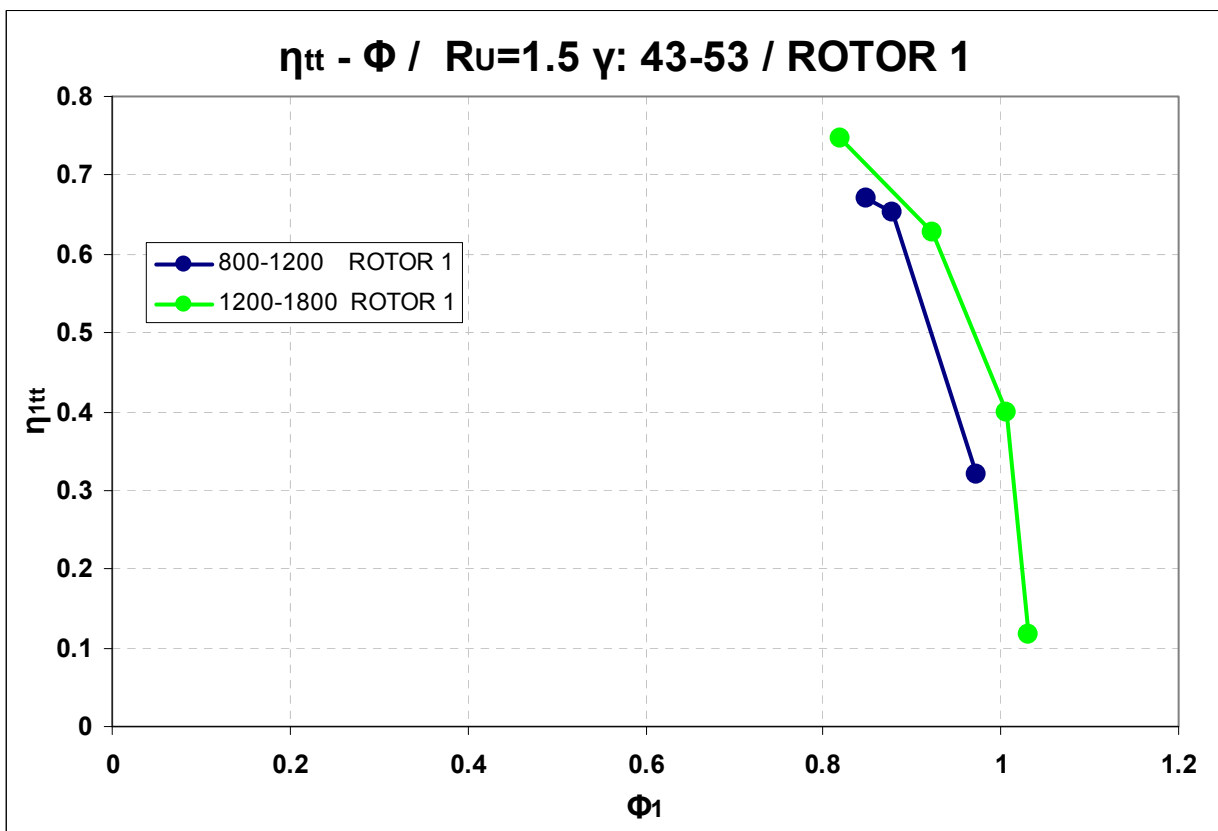
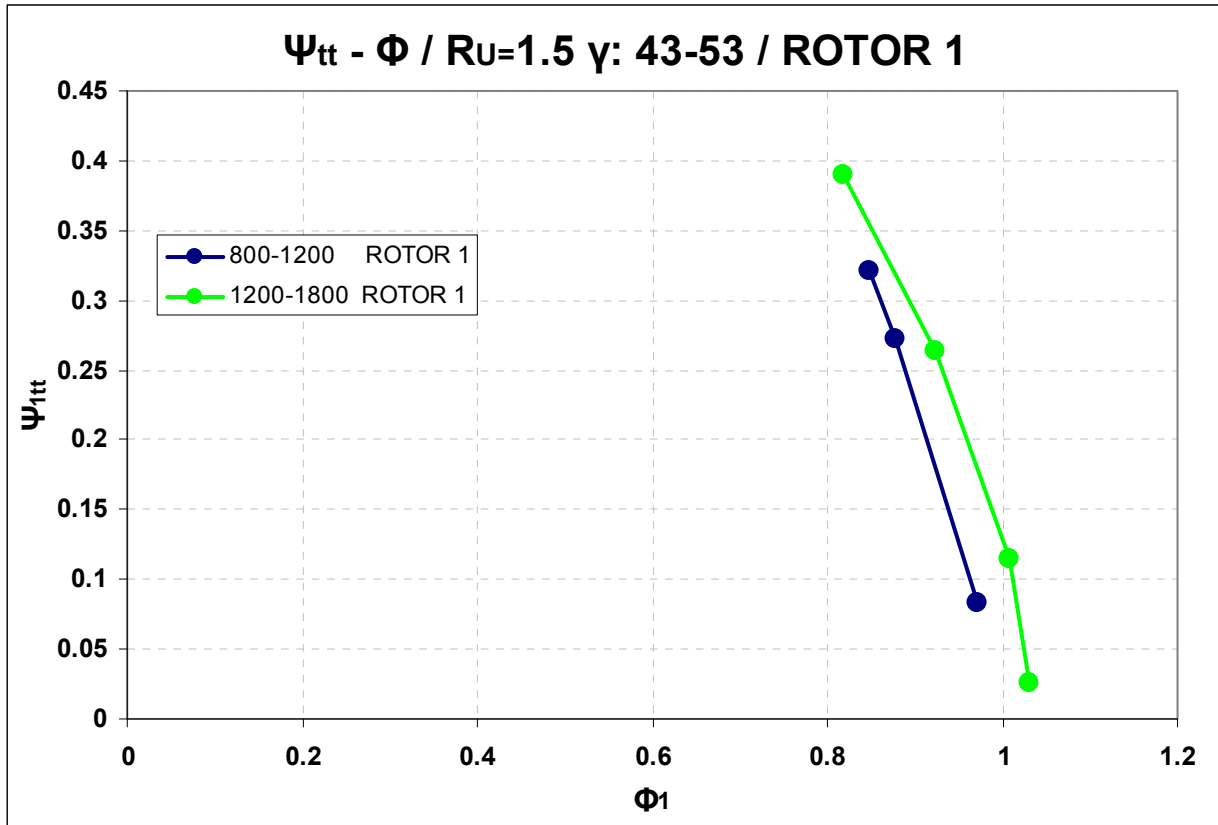
Το διάγραμμα αυτό έχει ήδη σχολιασθεί στο κεφάλαιο 4.5.5.

$\pi_c - m_{0cor}$ για στροφές 1200-1800 για τον 1^ο και 2^ο Ρότορα (Σχήμα 4.75).

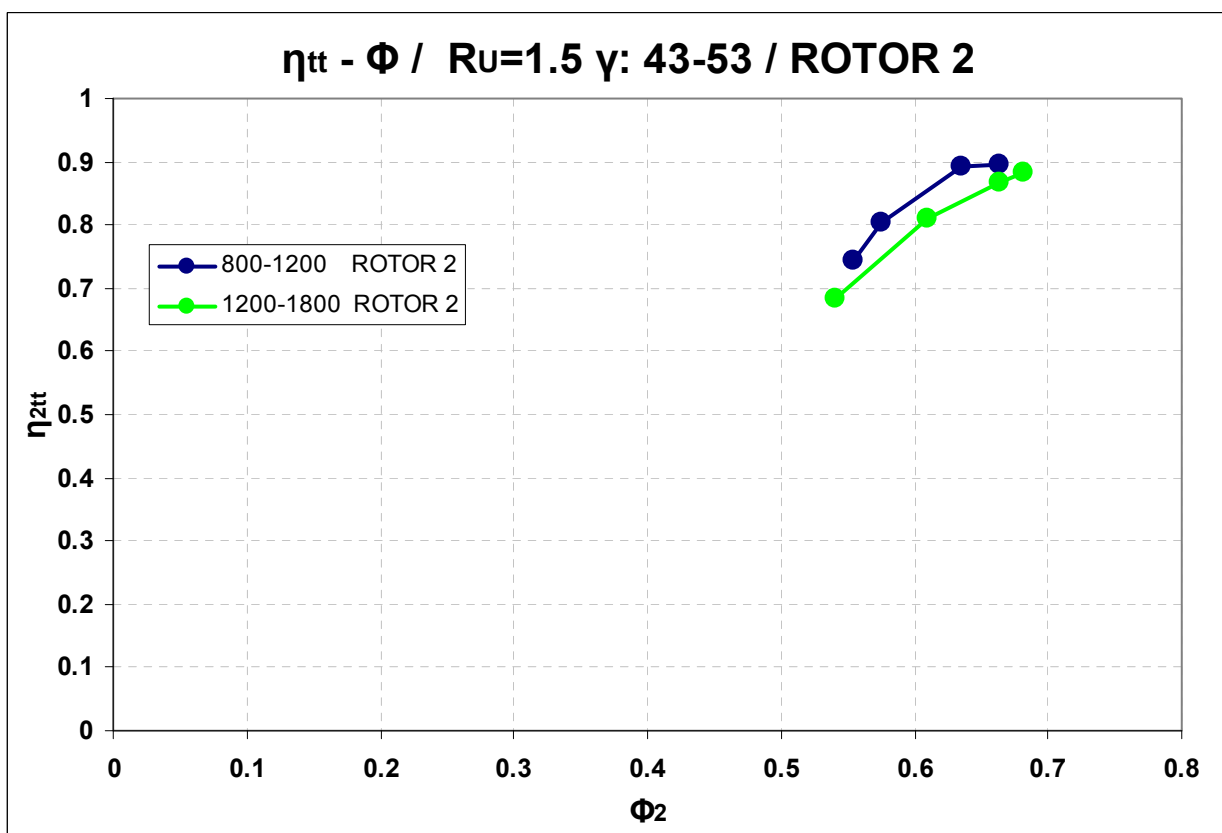
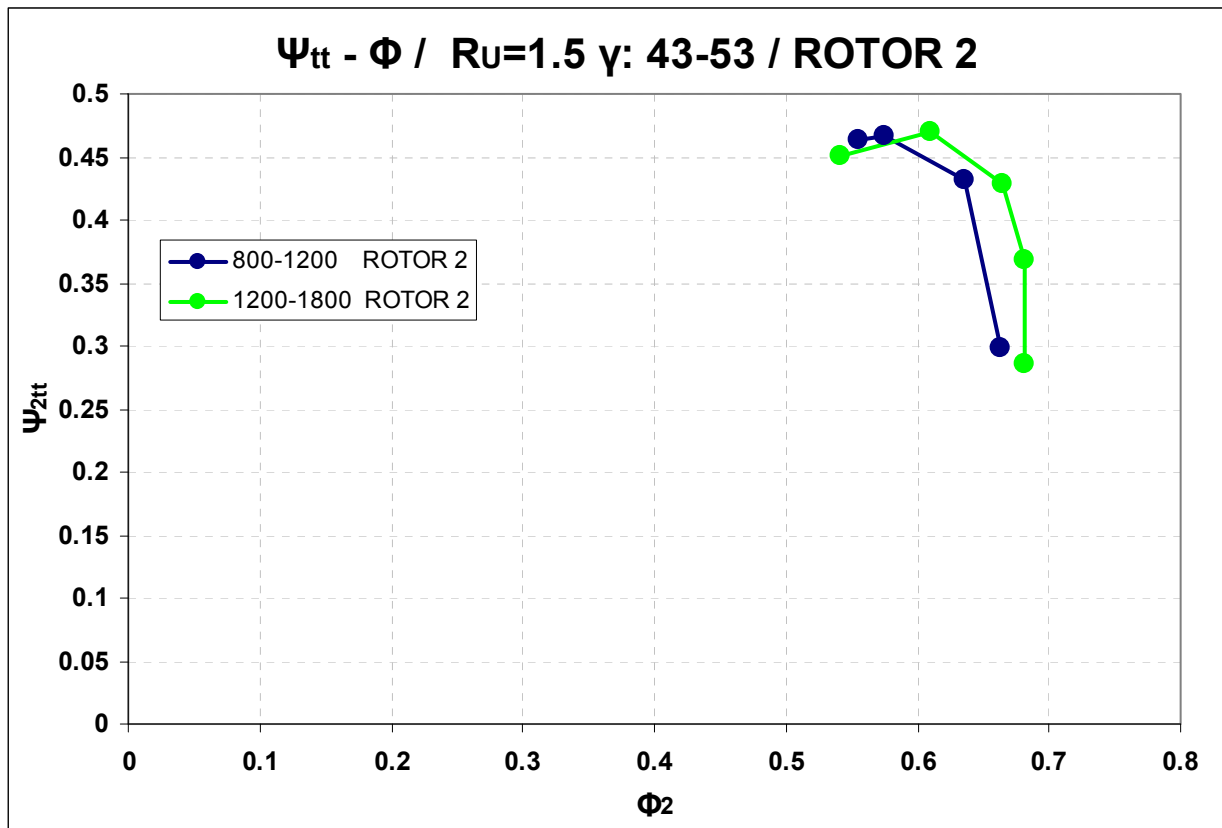
Το διάγραμμα αυτό έχει ήδη σχολιασθεί στο κεφάλαιο 4.5.4.

$\pi_c - m_{0cor}$ του συμπιεστή για στροφές 800-1200 και 1200-1800 και ζεύγη γωνιών stagger 43-53, 43-43, 30-43 (Σχήμα 4.100, Σχήμα 4.101, Σχήμα 4.102).

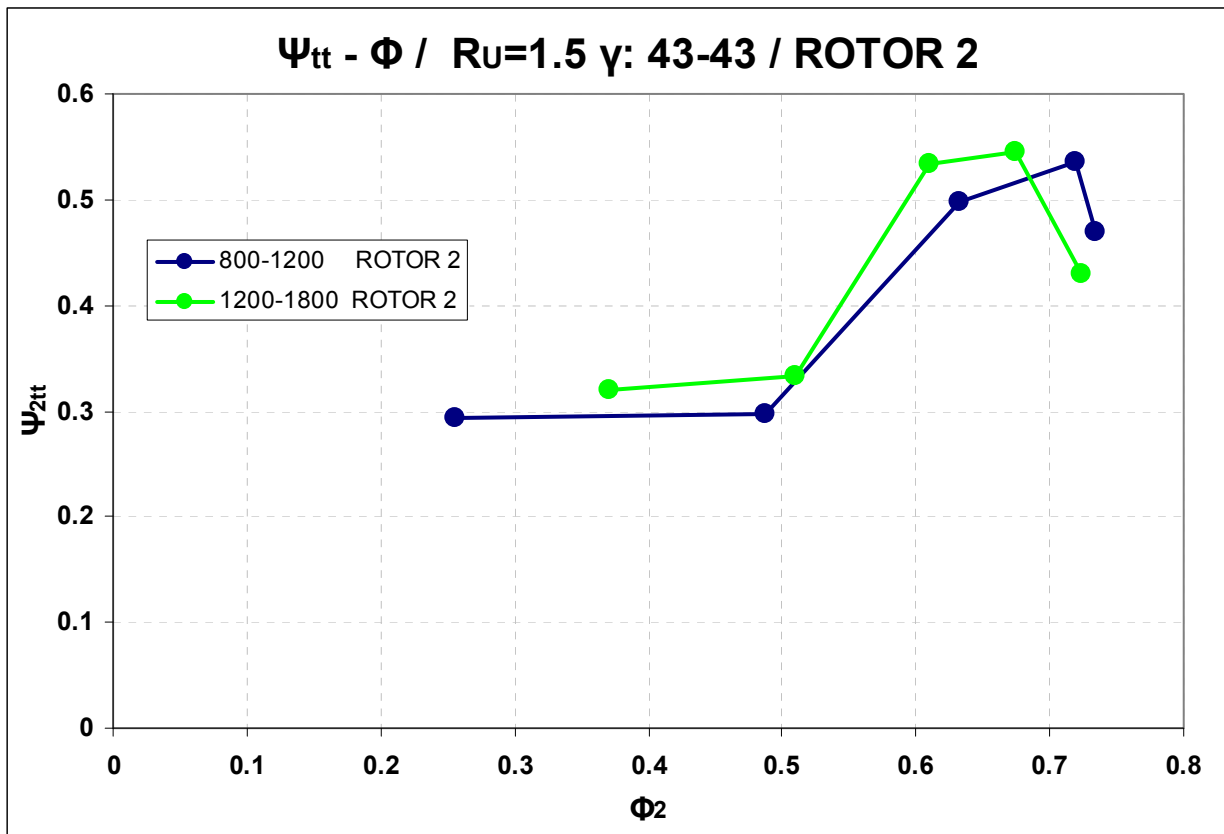
Εδώ παρατηρούμε την αναμενόμενη μετατόπιση της χαρακτηριστικής ολόκληρου του συμπιεστή προς μεγαλύτερους λόγους πίεσης και παροχή με την αύξηση των στροφών των πτερωτών, για όλα τα ζεύγη γωνιών stagger. Παράλληλα, παρατηρούμε την πλάτυνση των χαρακτηριστικών, γεγονός που δηλώνει ότι η αύξηση των στροφών των πτερωτών αυξάνει το περιθώριο λειτουργίας ολόκληρου του συμπιεστή.



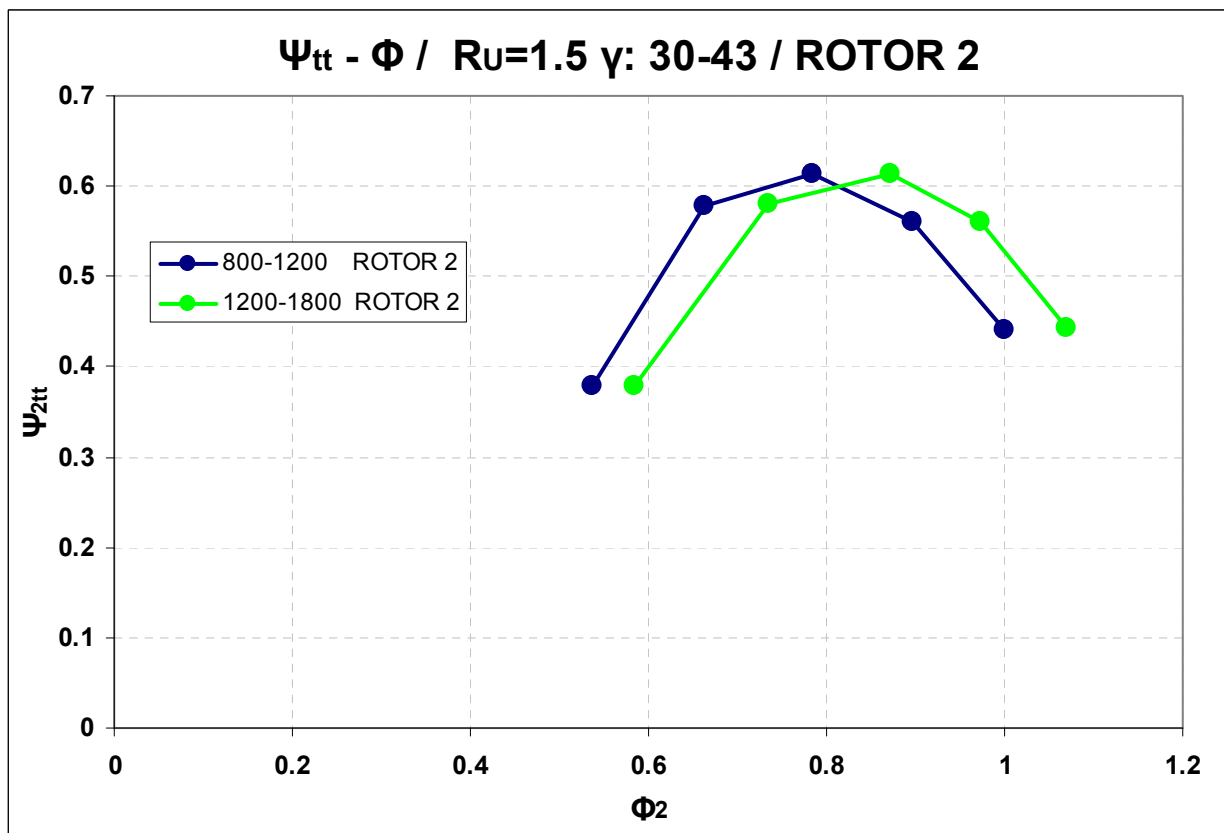
Σχήμα 4.92: Ψ_{is,t-t} - η_{t-t} - Φ για τον 1^ο Ρότορα για R_U= 1.5. Παράμετρος: σ.α.λ..



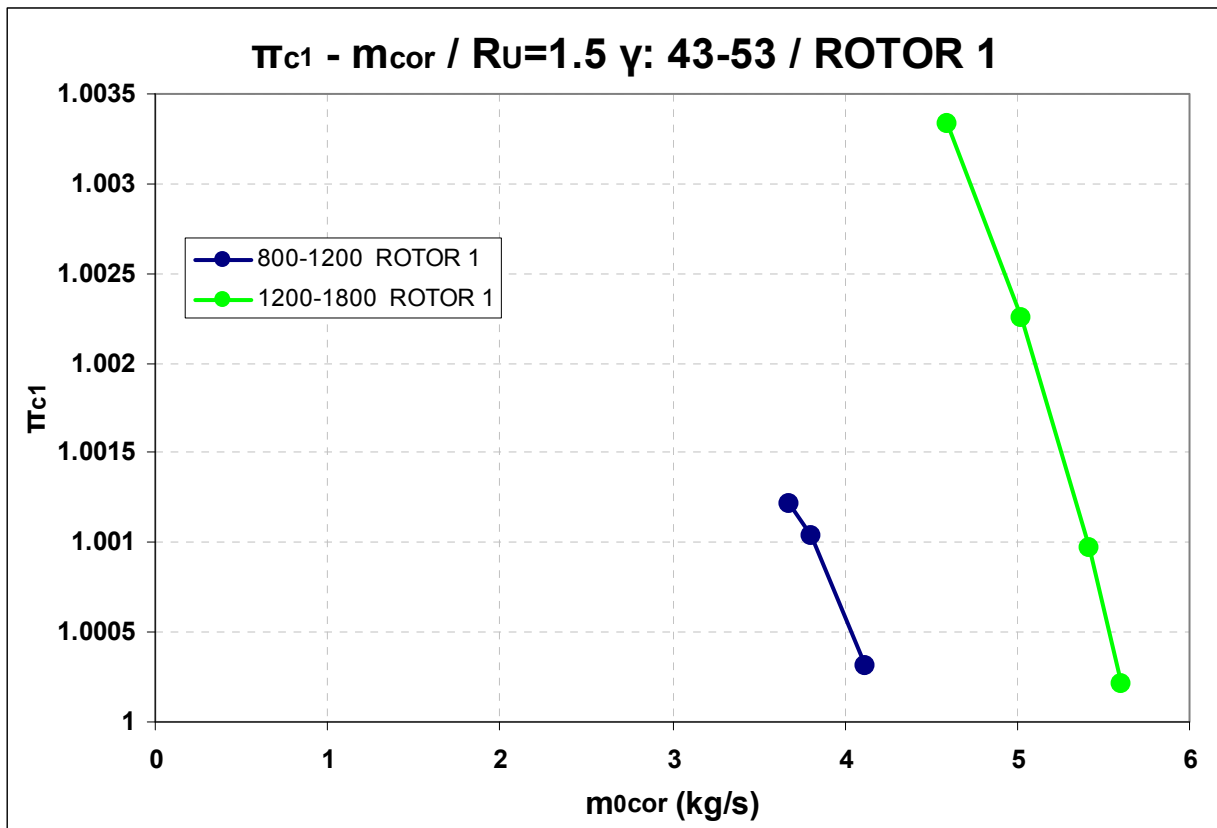
Σχήμα 4.93: $\Psi_{is,tt} - \eta_{t-t} - \Phi$ για τον 2^ο Ρότορα για $R_U=1.5$, $\gamma : 43-53$. Παράμετρος: σ.α.λ..



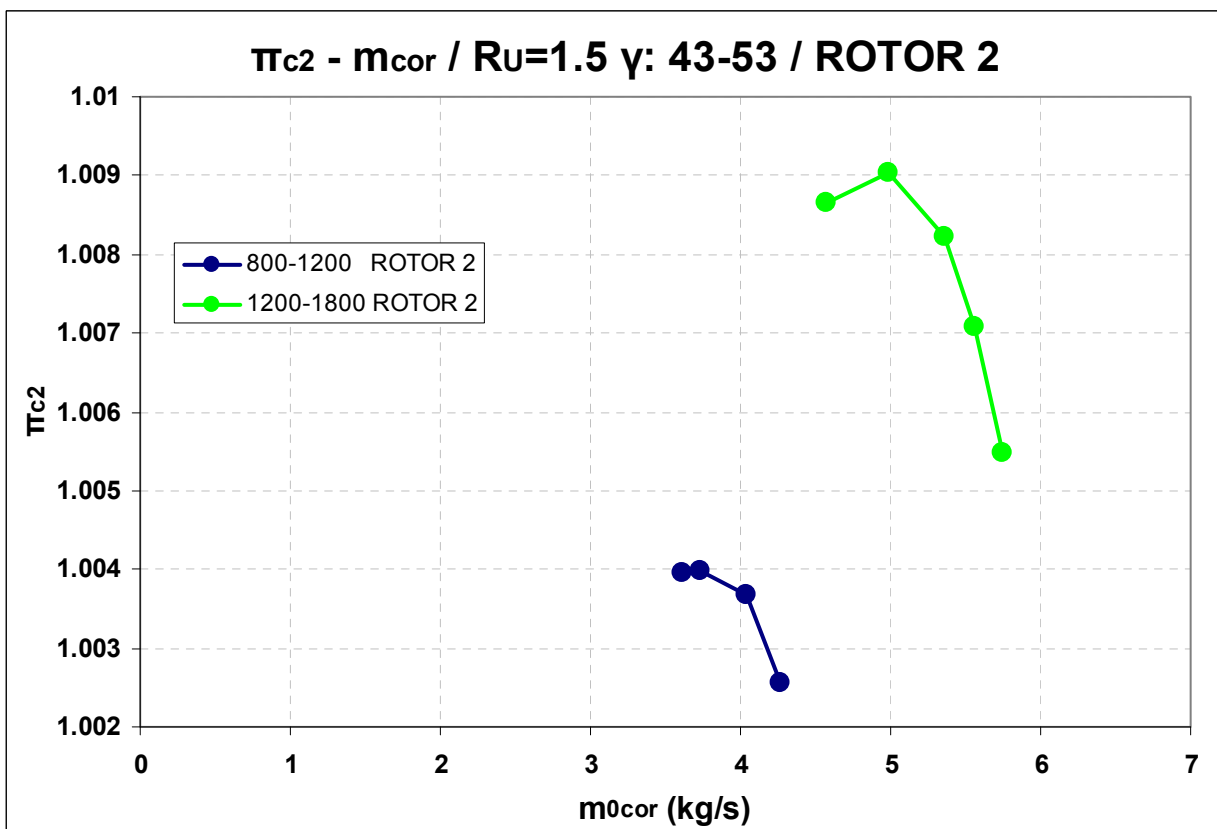
Σχήμα 4.94: Ψ_{is,t-t} - Φ για τον 2^ο Ρότορα για R_U= 1.5, γ : 43-43. Παράμετρος: σ.α.λ..



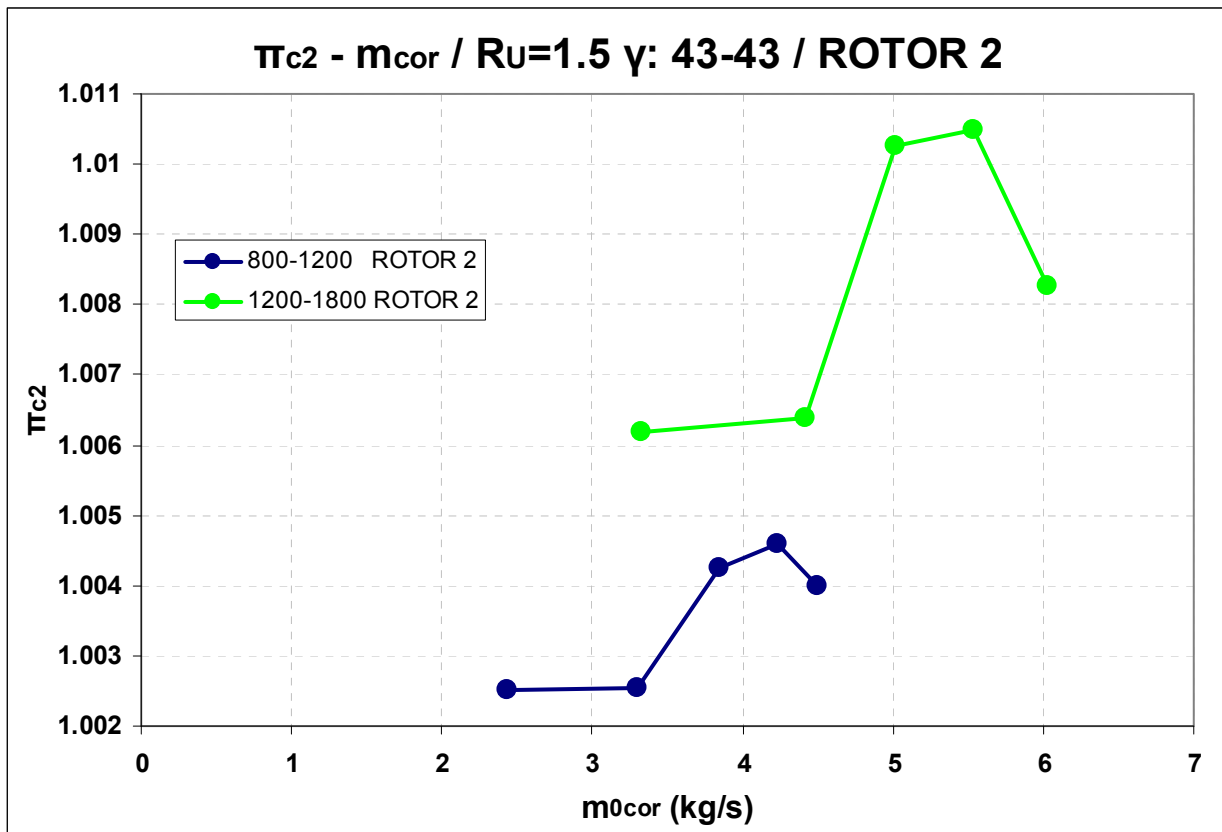
Σχήμα 4.95: Ψ_{is,t-t} - Φ για τον 2^ο Ρότορα για R_U= 1.5, γ : 30-43. Παράμετρος: σ.α.λ..



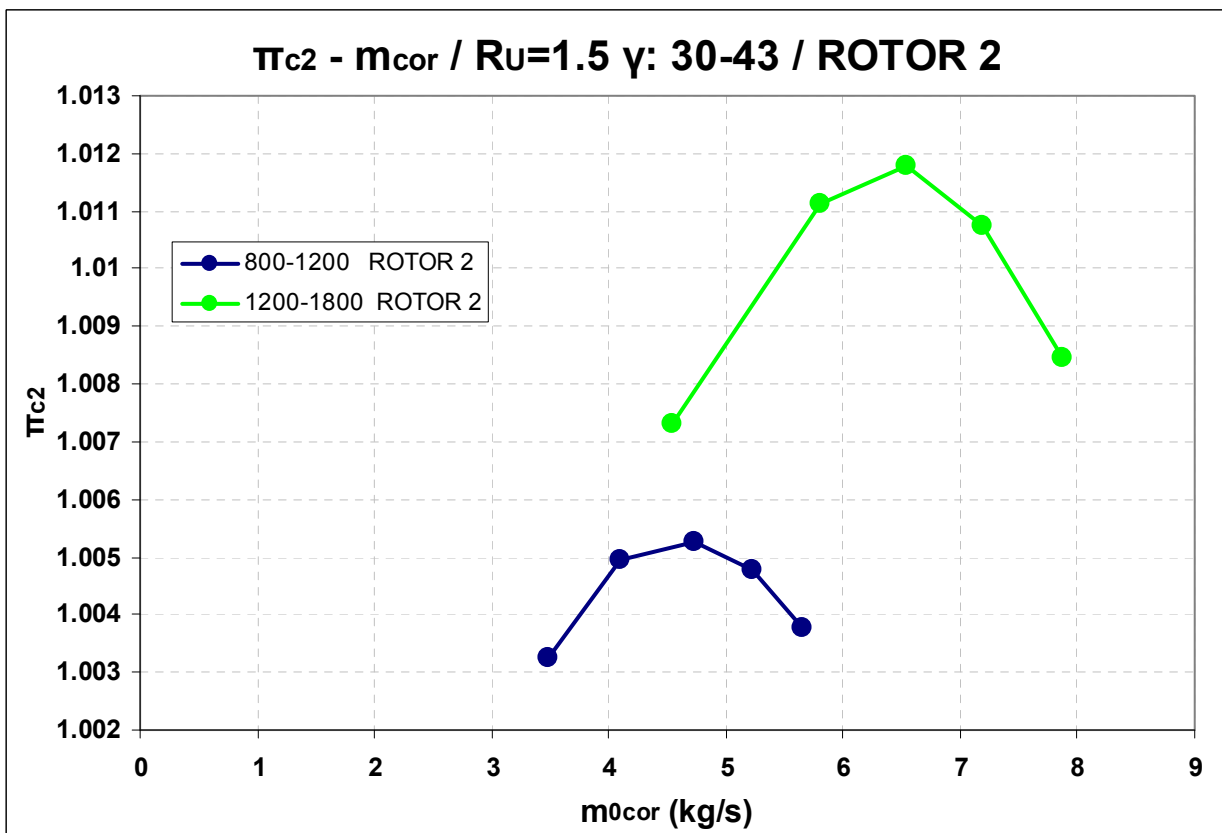
Σχήμα 4.96: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 1^ο Ρότορα για $R_U=1.5$. Παράμετρος: σ.α.λ..



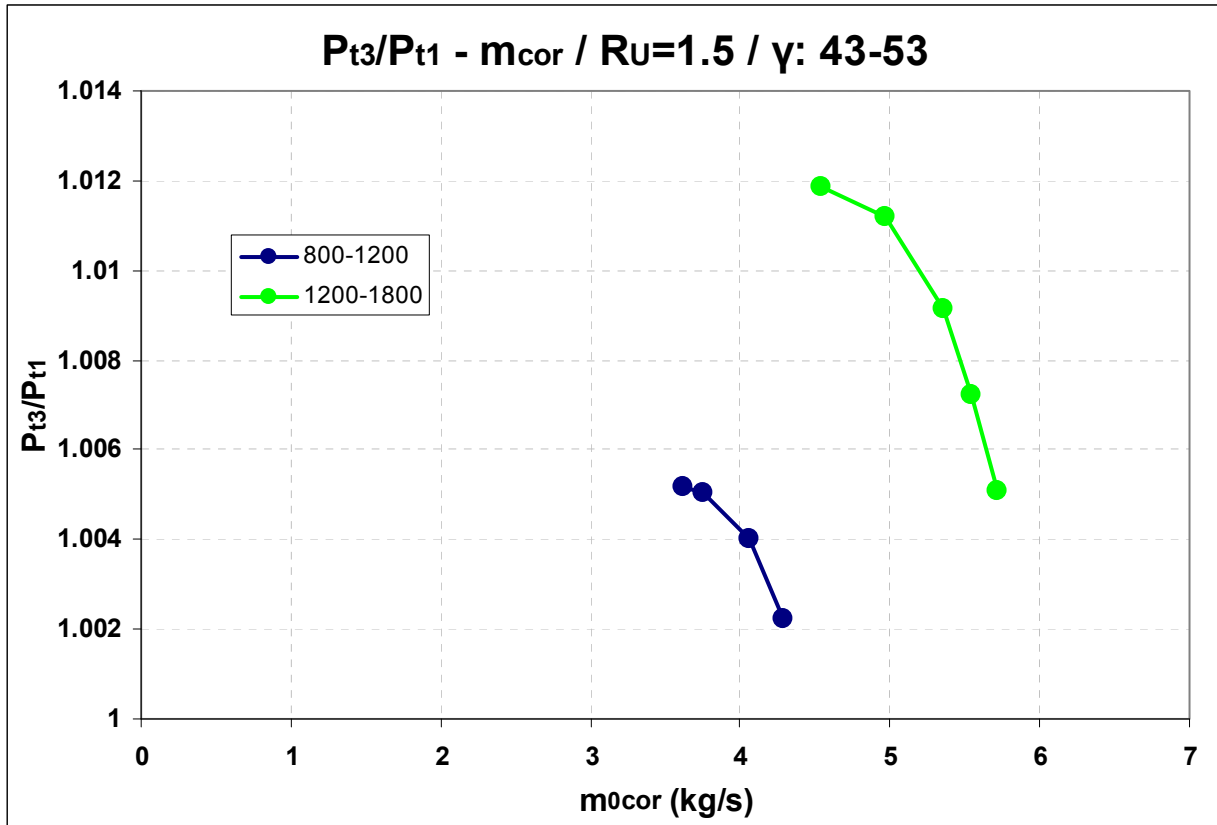
Σχήμα 4.97: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 2^ο Ρότορα για $R_U=1.5$, $\gamma : 43-53$. Παράμετρος: σ.α.λ..



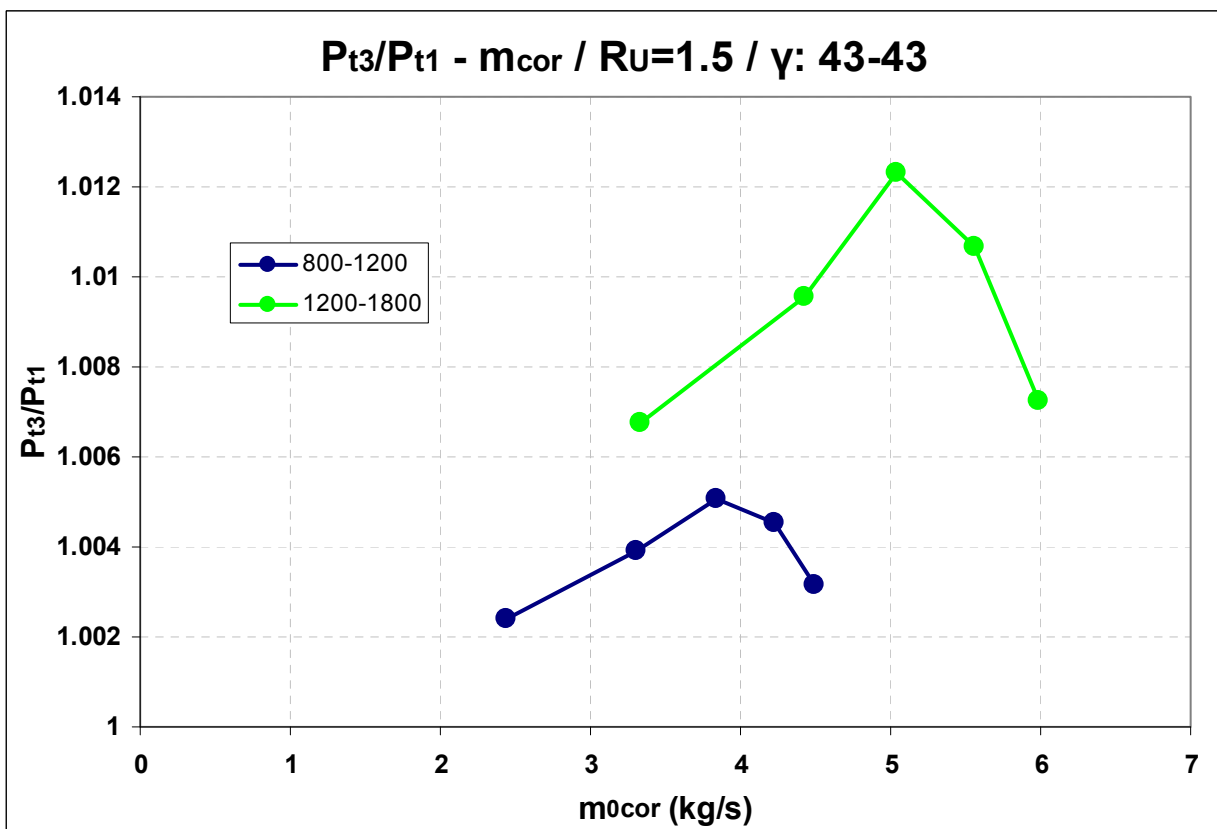
Σχήμα 4.98: π_c - m_{0cor} για τον 2^ο Ρότορα για R_U= 1.5, γ : 43-43. Παράμετρος: σ.α.λ..



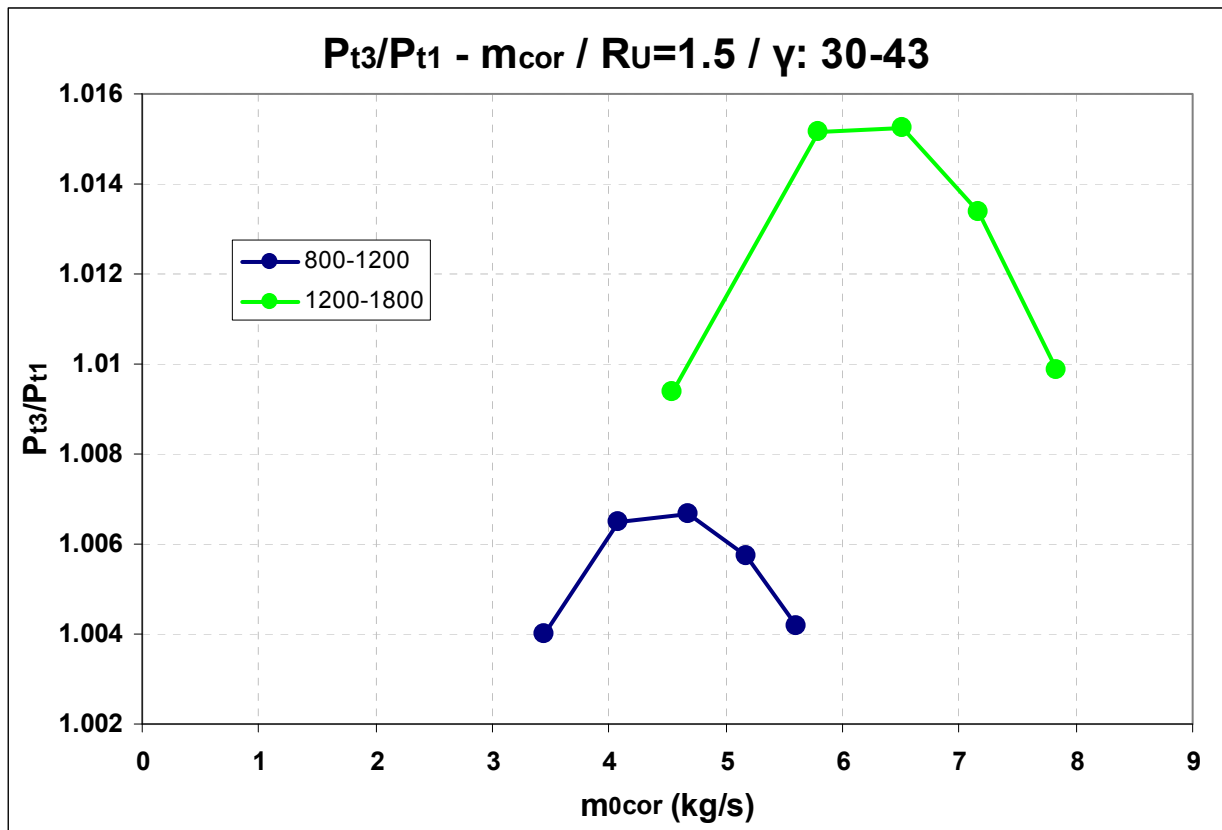
Σχήμα 4.99: π_c - m_{0cor} για τον 2^ο Ρότορα για R_U= 1.5, γ : 30-43. Παράμετρος: σ.α.λ..



Σχήμα 4.100: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $R_U=1.5$, $\gamma: 43-53$. Παράμετρος: σ.α.λ..



Σχήμα 4.101: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $R_U=1.5$, $\gamma: 43-43$. Παράμετρος: σ.α.λ..



Σχήμα 4.102: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον συμπιεστή για $R_u=1.5$, $\gamma : 30-43$. Παράμετρος: σ.α.λ..

4.5.7 Σύγκριση ολικών μεγεθών με μεγέθη στη μέση ακτίνα R_m .

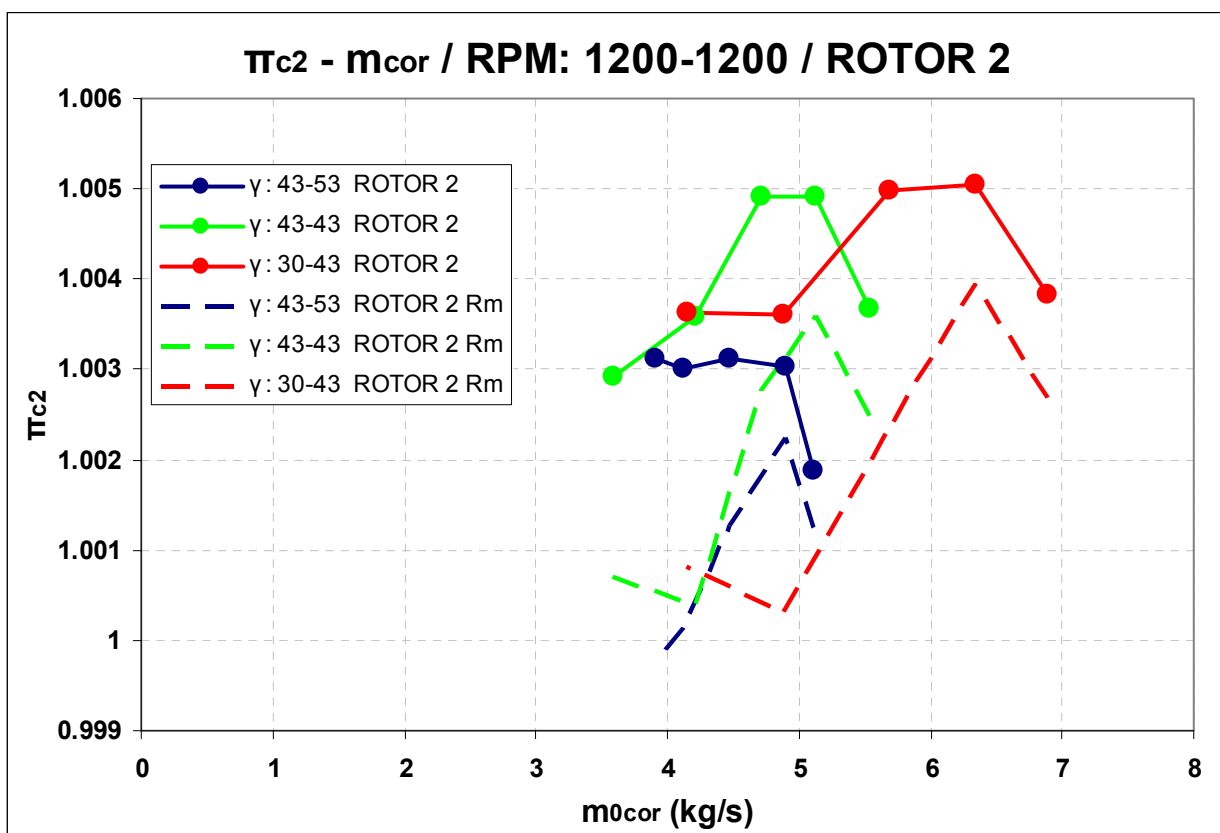
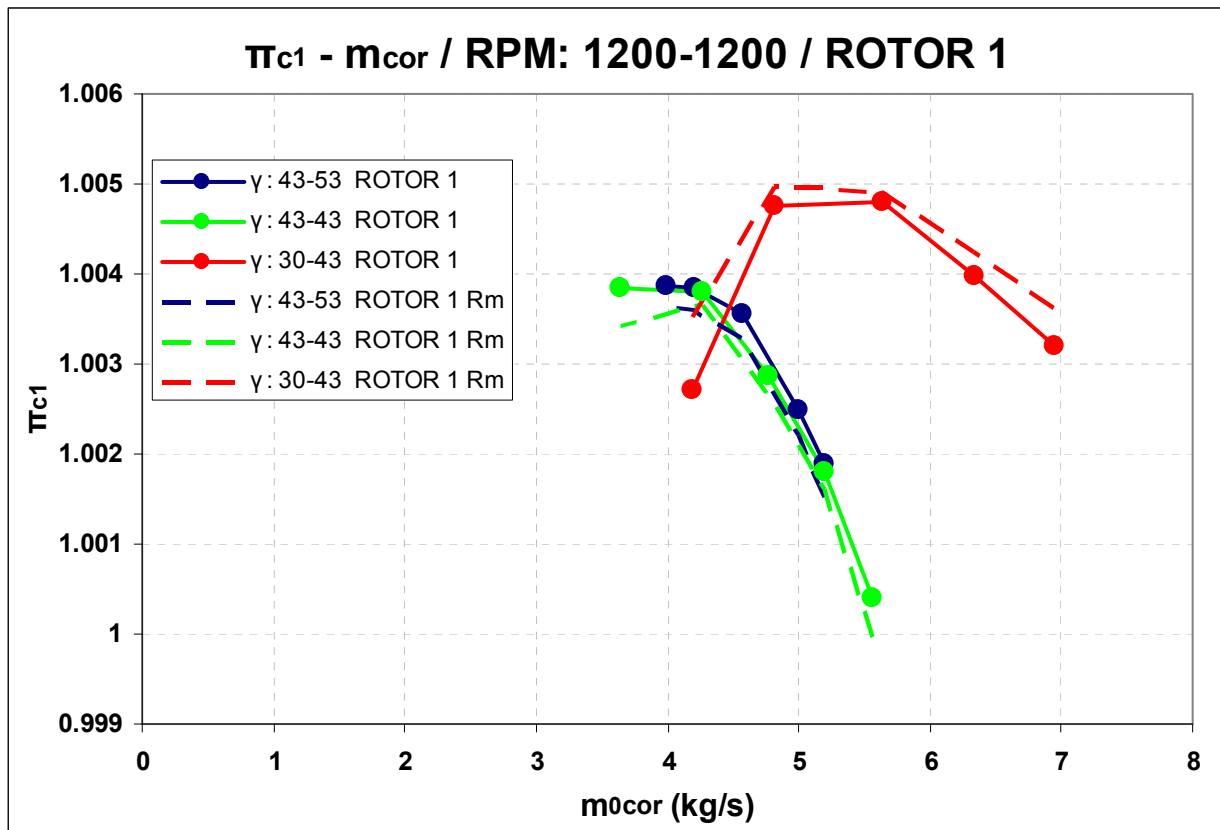
Τα διαγράμματα χαρακτηριστικών λόγου πίεσης – παροχής που έχουμε δει μέχρι τώρα, έχουν υπολογιστεί βάση ακτινικής ολοκλήρωσης. Μας ενδιαφέρει όμως να δούμε και πόσο αντιπροσωπευτική είναι η μέτρηση ενός μεγέθους στη μέση ακτίνα, ως προς τις μετρήσεις που αφορούν σε όλο το κανάλι ροής. Το όφελος από αυτή τη σύγκριση είναι ότι στην περίπτωση που οι χαρακτηριστικές από μετρήσεις στη μέση ακτίνα "πέφτουν" επάνω στις χαρακτηριστικές από ολοκληρώσεις, τότε θα μπορούμε με ασφάλεια να εκτελούμε μετρήσεις μόνο στη μέση ακτίνα για κατασκευάσουμε την χαρακτηριστική, κερδίζοντας έτσι τον χρόνο που χρειάζεται οι ακτινικές σαρώσεις.

Στο Σχήμα 4.103 παρουσιάζονται και για τους δύο ρότορες οι χαρακτηριστικές λόγου πίεσης – παροχής για στροφές 1200-1200 με παράμετρο τις γωνίες κλίσης των πτερυγίων των πτερωτών. Στο Σχήμα 4.104 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές για γωνίες κλίσης 43-53 αλλά για στροφές 800-1200 και 1200-1800. Οι καμπύλες με τις διακεκομμένες γραμμές είναι οι χαρακτηριστικές από μετρήσεις στη μέση ακτίνα.

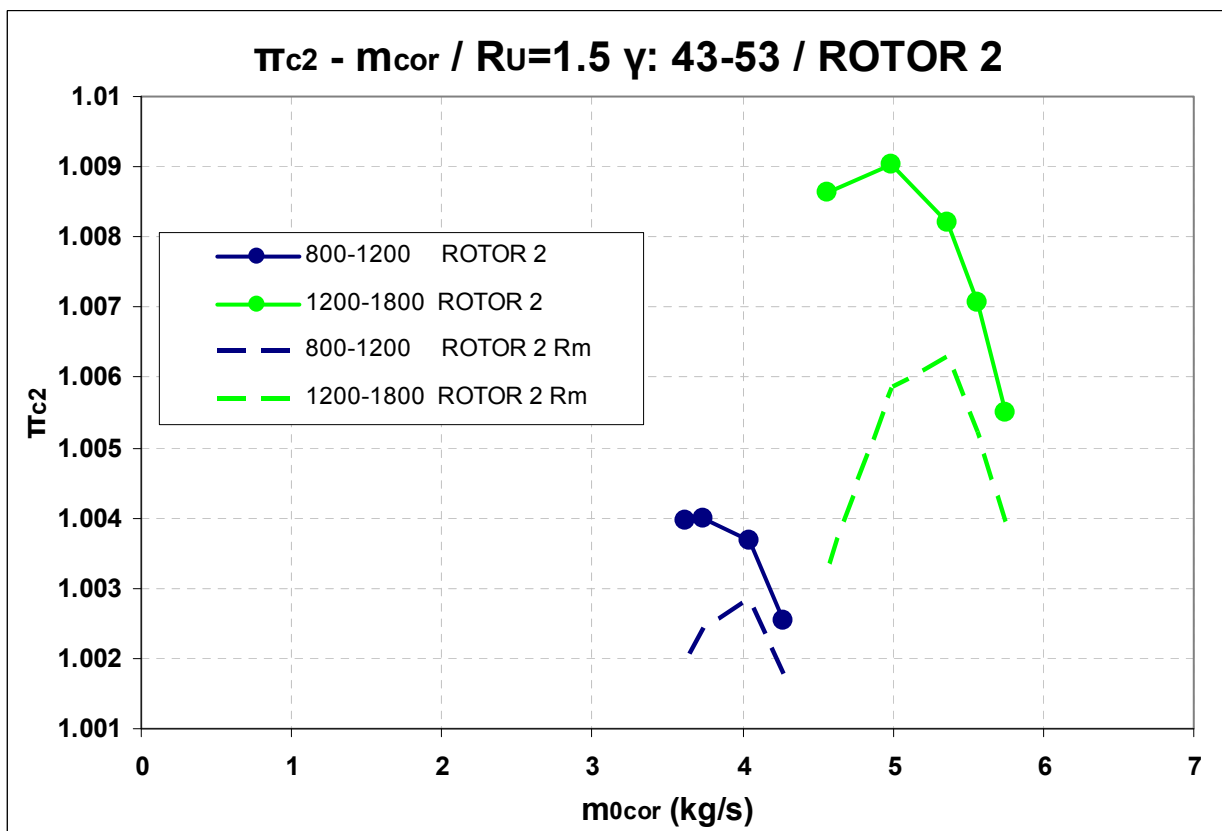
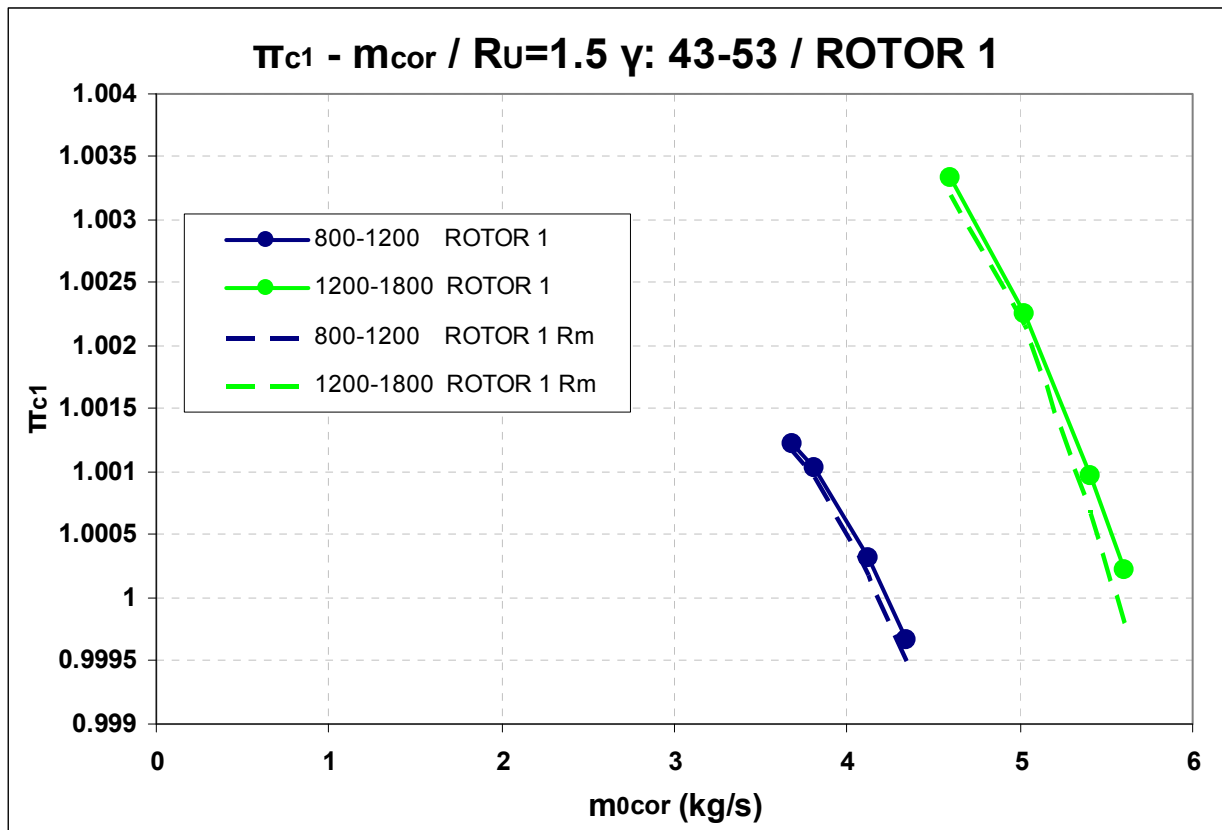
Όπως παρατηρούμε, για τον 1^ο ρότορα οι χαρακτηριστικές από ολοκληρώσεις και από μετρήσεις στη μέση ακτίνα σχεδόν ταυτίζονται, ανεξαρτήτως γωνιών κλίσης και στροφών των πτερωτών.

Αντιθέτως, για τον 2^ο ρότορα, οι χαρακτηριστικές από μετρήσεις στη μέση ακτίνα όχι μόνο βρίσκονται σε χαμηλότερους λόγους πίεσης από τις χαρακτηριστικές ολοκληρώσεων, αλλά σε πολλές περιπτώσεις έχουν και άλλη μορφή από αυτές. Το γεγονός αυτό, καθιστά αδύνατη τη εποπτεία της επίδοσης του 2^{ου} ρότορα μόνο από μετρήσεις στη μέση ακτίνα. Ο λόγος που υπάρχει αυτή η απόκλιση είναι πιθανόν ο ίδιος με αυτόν που έχουμε ήδη αναφέρει, ότι δηλαδή λόγω του ισχυρά τρισδιάστατου πεδίου ροής στην έξοδο του 1^{ου} ρότορα, έχουμε καμπύλωση των γραμμών ροής από τη θέση 2 στη θέση 3 με αποτέλεσμα η γραμμή ροής που διέρχεται από τη μέση ακτίνα της θέσης 2 να μη διέρχεται από τη μέση ακτίνα της θέσης 3.

Αυτό που μπορεί να γίνει είναι να δούμε την εξάρτηση της απόκλισης αυτής από τις στροφές των πτερωτών, έτσι ώστε ανάλογα τις στροφές να κάνουμε μια ανάλογη διόρθωση του λόγου πίεσης του 2^{ου} ρότορα που μετράμε στη μέση ακτίνα.



Σχήμα 4.103: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 1^ο και 2^ο ρότορα από σαρώσεις και από μετρήσεις στη μέση ακτίνα R_m , για $R_U = 1$. Παράμετρος: γωνία κλίσης (stagger).



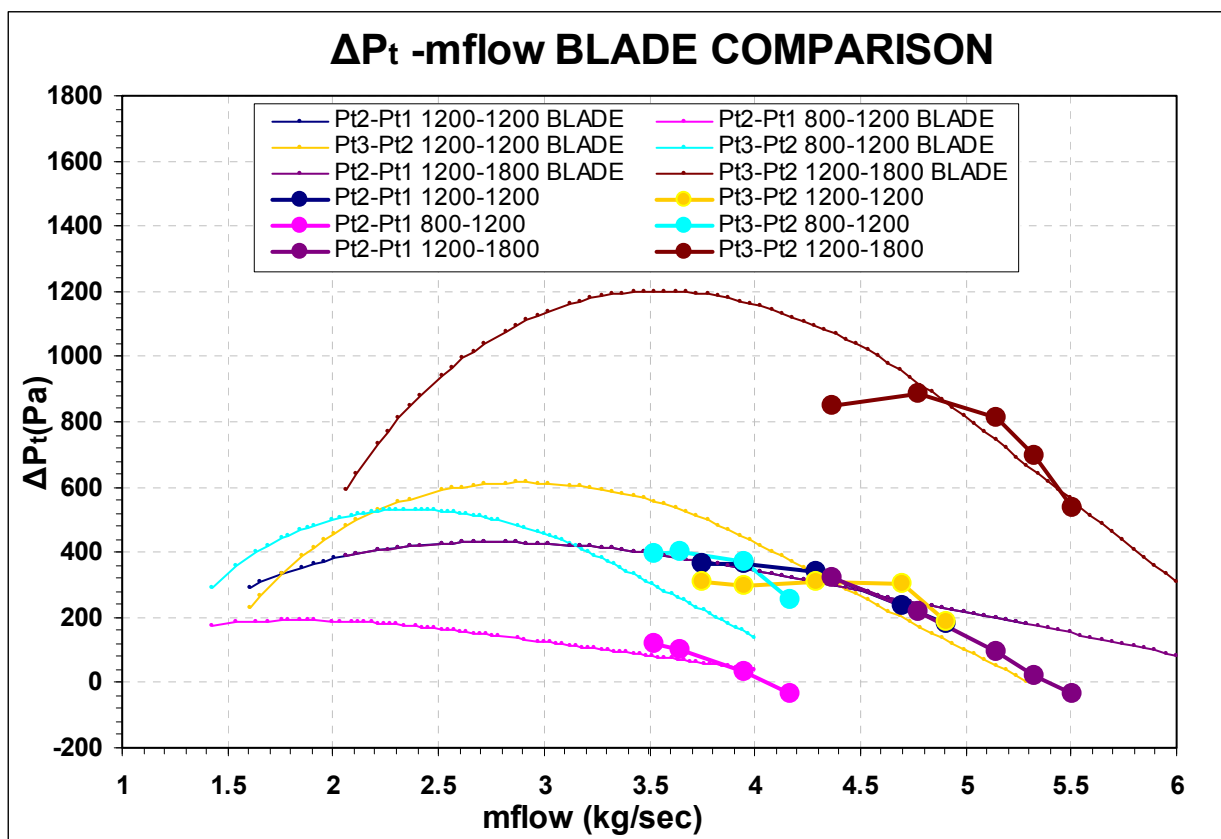
Σχήμα 4.104: $\pi_c - m_{0cor}$ για τον 1^ο και 2^ο ρότορα από σαρώσεις και από μετρήσεις στη μέση ακτίνα R_m , για $R_U=1$. Παράμετρος: γωνία κλίσης (stagger).

4.5.8 Συγκρίσεις με αποτελέσματα κώδικα BLADE.

Στο Σχήμα 4.105 παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής ολικής πίεσης – παροχής στους δύο ρότορες, στο οποίο έχουμε καμπύλες που έχουν προκύψει από τις μετρήσεις (από ολοκληρώσεις ακτινικών σαρώσεων) και τις αντίστοιχες καμπύλες που έχουν προκύψει από τρεξίματα του κώδικα BLADE.

Παρατηρούμε ότι ο κώδικας υπερεκτιμά τη μεταβολή της πίεσης και το εύρος λειτουργίας. Όμως, η σχετική θέση μεταξύ των χαρακτηριστικών που προκύπτουν από τον κώδικα είναι ίδια με τη σχετική θέση μεταξύ των χαρακτηριστικών που προκύπτουν από τις μετρήσεις.

Αυτή η συμπεριφορά είναι λογική καθώς ο κώδικας δεν λαμβάνει υπ’ όψη του τις απώλειες τοιχωμάτων και δευτερευουσών ροών, γι’ αυτό υπερεκτιμά τη μεταβολή της πίεσης και το εύρος λειτουργίας. Παρ’ όλα αυτά, ο κώδικας αποτελεί όπως φαίνεται ένα χρήσιμο εργαλείο για μια αρχική εκτίμηση της συμπεριφοράς του συμπιεστή όταν πρόκειται να εκτελέσουμε μια νέα μέτρηση της οποίας δεν μπορούμε να "υποψιαστούμε" τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.105: ΔP_t – m₀ για τον 1^ο και 2^ο ρότορα από μετρήσεις μέσω ολοκλήρωσης ακτινικών σαρώσεων, και από τρεξίματα του κώδικα BLADE, για στροφές 800-1200, 1200-1200 και 1200-1800. Γωνίες stagger : 43-53.

4.5.9 Συνολικά συμπεράσματα επάνω στην παραμετρική μελέτη.

Για τον 1^ο Ρότορα

- Η χαρακτηριστική Φ-Ψ του 1^{ου} ρότορα παραμένει αναλλοίωτη για σταθερή γωνία κλίσης των πτερυγίων του, ανεξάρτητα των στροφών της και των στροφών του 2^{ου} ρότορα.
- Ο βαθμός απόδοσης του 1^{ου} 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.

Για τον 2^ο Ρότορα

- Βάση της σχέσης (4.138) (βλέπε παρακάτω), αλλά και μέσω φυσικής ερμηνείας διαπιστώνουμε ότι η χαρακτηριστική Φ-Ψ του 2^{ου} ρότορα εξαρτάται μόνο από το λόγο στροφών $R_U = N_2/N_1$ και τις γωνίες κλίσης των πτερυγίων των πτερωτών. Αύξηση του λόγου στροφών οδηγεί στη μετατόπιση της Φ-Ψ του 2^{ου} ρότορα προς μικρότερα Φ (προς τα αριστερά) 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 2^{ου} ρότορα παραμένει αναλλοίωτη. Βέβαια, το τελευταίο χρειάζεται εκ νέου μετρήσεις για την επιβεβαίωσή του, καθώς στις έως τώρα μετρήσεις υπάρχει μια μετατόπιση των Φ-Ψ προς μεγαλύτερα Φ και για τους δύο ρότορες για σταθερό R_U αλλά μεγαλύτερο αριθμό στροφών.

$$\Phi_{II} = \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{21} + \tan \beta_3} \stackrel{\text{Στο σημείο σχεδίασης}}{=} \frac{\Psi_{II} - 1 - \frac{1}{R_U}}{\tan \beta_{12}' + \tan \beta_{22}'}, \text{ (προσημασμένες οι } \beta \text{)}$$

$\frac{\tan \beta_{21} = \tan \beta_{12}'}{\tan \beta_3 = \tan \beta_{22}'}$

- Οι χαρακτηριστικές βαθμού απόδοσης του 2^{ου} ρότορα ξεκινούν συνήθως από τη μέγιστη τιμή β.α. για τη μεγαλύτερη παροχή και ο β.α. μειώνεται ελαττώνοντας την παροχή.
- Για σταθερό λόγο στροφών R_U , η μείωση της γωνίας κλίσης του 1^{ου} ρότορα οδηγεί σε μετατόπιση της Φ-Ψ του 2^{ου} ρότορα προς μεγαλύτερα Φ (προς τα δεξιά), και σε πλάτυνση της χαρακτηριστικής αυξάνοντας έτσι και το περιθώριο λειτουργίας του 2^{ου} ρότορα.

Για τον Συμπιεστή

- Όσο αυξάνονται αθροιστικά οι στροφές των πτερωτών, αυξάνεται η παροχή και ο λόγος πίεσης του συμπιεστή και παράλληλα έχουμε πλάτυνση της χαρακτηριστικής του, γεγονός που δηλώνει την αύξηση του περιθωρίου λειτουργίας του. Τα ίδια συμβαίνουν και με τη μείωση των γωνιών κλίσης των πτερυγίων των πτερωτών, μόνο που τότε έχουμε και μια πρόσθετη οριζοντίωση των χαρακτηριστικών γεγονός που δηλώνει την αύξηση του περιθωρίου λειτουργίας σε υψηλούς λόγους πίεσης.

Σύγκριση με μετρήσεις στη μέση ακτίνα R_m

- Οι μετρήσεις στη μέση ακτίνα είναι αντιπροσωπευτικές μόνο για τον 1^ο ρότορα, καθώς οι χαρακτηριστικές σχεδόν ταυτίζονται με αυτές που προκύπτουν από ολοκλήρωση των ακτινικών κατανομών των μεγεθών. Για τον 2^ο ρότορα οι μετρήσεις στη μέση ακτίνα δεν είναι αντιπροσωπευτικές της συνολικής εικόνας του, καθώς παρουσιάζουν μειωμένο το λόγο πίεσης και πολλές φορές άλλη μορφή.

Σύγκριση με τρεξίματα του κώδικα BLADE

- Ο κώδικας BLADE υπερεκτιμά το λόγο πίεσης και το εύρος λειτουργίας και για τους δύο ρότορες. Παρ' όλα αυτά αποτελεί χρήσιμο εργαλείο καθώς δίνει σωστή εκτίμηση της σχετικής θέσης μεταξύ των χαρακτηριστικών διάφορων μετρήσεων.

5

Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα- Προτάσεις

5.1 Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα.

Με το πέρας της εργασίας αυτής, ενισχύεται η ανάπτυξη τεχνογνωσίας πάνω στη λειτουργία αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών (Contra Rotating ή C-R) από το Ε.Θ.Σ. του Ε.Μ.Π.. Η υπάρχουσα διάταξη C-R που είχε σχεδιασθεί και κατασκευαστεί στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας^[20] στο Ε.Θ.Σ., συμπληρώνεται με επιπλέον συνιστώσες και τροποποιήσεις, με μετρητικό εξοπλισμό, τίθεται σε λειτουργία και μέσω των πρώτων μετρήσεων που εκπονούνται, πιστοποιείται η δυνατότητα επιτυχούς εκτέλεσης πειραμάτων και διαπιστώνονται οι ιδιαιτερότητες της διάταξης. Μια αρχική παραμετρική μελέτη δίνει την πρώτη εικόνα του πεδίου ροής και των επιδόσεων μιας C-R βαθμίδας συμπίεστη. Πρόκειται για μια διάταξη δοκιμών χαμηλών ταχυτήτων με τις μέγιστες στροφές να ανέρχονται στις 3000rpm, τη διάμετρο ακροπερυγίου στα 550mm και το ύψος του καναλιού ροής στα 125mm.

Συγκεκριμένα, για τη βελτίωση της ροής στην είσοδο και έξοδο του συμπίεστη, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από πολυεστέρα-ίνες γυαλιού ο συγκλίνων αγωγός εισόδου (bellmouth) και το χείλος εξόδου του διαχύτη. Η κατασκευή του καλουπιού του χείλους εξόδου επιτεύχθη με το σχεδιασμό και κατασκευή ενός βραχίονα 2-βαθμών ελευθερίας για τη διαμόρφωση σωμάτων εκ περιστροφής από φελιζόλ. Ο βραχίονας αυτός αποτελεί πλέον ένα χρήσιμο εργαλείο στο Ε.Θ.Σ. για την κατασκευή τέτοιων αντικειμένων.

Ο έλεγχος στροφών των ηλεκτροκινητήρων της διάταξης επιτεύχθηκε με το σχεδιασμό και κατασκευή τηλεχειριστηρίων για τη δυνατότητα ελέγχου των Η/Κ από το δωμάτιο ελέγχου.

Η τροποποίηση των περυγίων για ρύθμιση του ακτινικού διακένου στο 1mm, ο έλεγχος αζυγοσταθμίας των πτερωτών, ο έλεγχος ακτινικής ταλάντωσης των περυγίων, η τάνυση των ιμάντων κίνησης, η ευθυγράμμιση των ατράκτων και των τροχαλιών, και ο υπολογισμός της προέντασης των κοχλιοσυνδέσεων στις περιστρεφόμενες συνιστώσες της διάταξης, αποτέλεσαν τις διαδικασίες που εξασφαλίζουν την ομαλή και ασφαλή λειτουργία, αλλά και που πρέπει να επιβλέπονται προσεκτικά κατά την εποπτεία και συντήρηση της διάταξης.

Η ανάγκη για δυνατότητα εύρεσης των γωνιών μετάλλου καθ' ύψος των περυγίων, αλλά και ο μελλοντικό υπολογισμός της ροής του C-R με λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), οδήγησε στη ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των περυγίων, η οποία έγινε μέσω ψηφιοποίησης των αεροτομών σε διάφορες θέσεις καθ'

ύψος των πτερυγίων. Διαπιστώθηκε ότι η μέση γραμμή κυρτότητας (camber line) των αεροτομών είναι κυκλικό τόξο. Προσεγγίζοντας την ακτινική διανομή της κυρτότητας της μέσης γραμμής με πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού και λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συστροφή (twist) του πτερύγιου, υπολογίστηκαν τις γωνίες μετάλλου καθ' ύψος των πτερυγίων. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι διανομή πάχους των αεροτομών είναι όμοια με τη Naca65 αλλά παχύτερη στη περιοχή 70-100% της χορδής, με το μέγιστο πάχος να εμφανίζεται στο 40% της χορδής. Έπειτα, αναπτύχθηκε κώδικας σε Fortran ο οποίος με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ψηφιοποιημένων αεροτομών στο hub και tip υπολογίζει τις συντεταγμένες των επιμέρους αεροτομών του πτερυγίου, αλλά και επιπλέον σημεία για κάθε αεροτομή μέσω καμπύλων CSpline. Η γραμμική παρεμβολή διαπιστώθηκε ότι δεν είναι ακριβής και γι' αυτό προτείνεται η μελλοντική ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των πτερυγίων με τον σαρωτή 3D του Ε.Θ.Σ..

Με ολοκληρωμένη πλέον τη διάταξη, επόμενο βήμα ήταν η εγκατάσταση του μετρητικού εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, μέσω οπών στο κέλυφος μετράται η στατική πίεση ανάντι και κατάντι και των δύο πτερωτών, αλλά σε δύο θέσεις του bellmouth για τον απευθείας υπολογισμό της παροχής. Η μέτρηση ακτινικής διανομής της πίεσης και της ταχύτητας του αέρα γίνεται με σωλήνα πίεσης τριών οπών (3-hole probe) ανάντι του 1^{ου} ρότορα λόγω του ομοιόμορφου πεδίου ροής στην είσοδο, με 5-hole probe κατάντι του 1^{ου} ρότορα και με 5-hole probe κατάντι του 2^{ου} ρότορα λόγω του πλήρως 3D πεδίου ροής στις θέσεις αυτές. Οι σωλήνες πίεσης είναι προσαρμοσμένοι σε φορεία (probe carriages) και ο έλεγχος της ακτινικής θέσης και γωνίας τους γίνεται ηλεκτρονικά μέσω τηλεχειριστηρίων από το δωμάτιο ελέγχου. Η μέτρηση στροφών των πτερωτών γίνεται με αισθητήρες προσέγγισης (proximity switches) στο κέλυφος για τη μέτρηση της συχνότητας περάσματος πτερυγίων ώστε να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια στη μέτρηση. Οι κραδασμοί στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση μετρώνται με επιταχυνσιόμετρα. Για όλα τα παραπάνω όργανα, διεξήχθη η βαθμονόμησή τους και ο υπολογισμός των σφαλμάτων τους. Η σύνδεση των οργάνων σε κάρτα ψηφιοαναλογικής μετατροπής (ADC) και η ταυτόχρονη λήψη και επίβλεψη των μετρήσεων με χρήση λογισμικού πρόσκτησης δεδομένων του Ε.Θ.Σ., δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της πειραματικής διαδικασίας από το δωμάτιο ελέγχου της εγκατάστασης.

Με δεδομένα πλέον τα μεγέθη μέτρησης από τους αισθητήρες, αναπτύχθηκε κώδικας σε Fortran με όνομα CRCALC για τον υπολογισμό των μεγεθών της ροής. Επίσης, αναπτύχθηκε κώδικας σε VBA με όνομα CRCHART για την άμεση παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων υπό μορφή διαγραμμάτων ακτινικής διανομής των μεγεθών της ροής και των συνολικών επιδόσεων του κάθε ρότορα αλλά και όλου του συμπιεστή.

Με έτοιμη τη μετρητική πλέον εγκατάσταση, έγινε η διεξαγωγή των εξής μετρήσεων : 1^{ου}) Δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί χρήσης ή μη αγωγού εισόδου (bellmouth), εξομαλυντή ροής (honeycomb) και φίλτρου. Επελέγη η χρήση honeycomb στη μεγάλη διάμετρο του bellmouth, καθώς έδωσε τα πιο ομοιόμορφα προφίλ ταχύτητας, γωνίας και πίεσης. 2^{ου}) Διεξήχθη μια πρώτη παραμετρική μελέτη του C-R με

παραμέτρους το λόγο στροφών των πτερωτών και τις γωνίες κλίσης (stagger) των πτερυγίων τους. Συγκεκριμένα, για κάθε ζεύγος γωνιών κλίσης από τα 43-53, 43-43 και 30-43 έγινε η λήψη πλήρων χαρακτηριστικών για ζεύγη στροφών των δύο πτερωτών 800-1200, 1200-1200, 1200-1800. Τα ζεύγη αυτά στροφών επιλέχθηκαν ώστε να μελετήσουμε τους λόγους στροφών $R_U = N_{II}/N_I$ 1 και 1.5 για χαμηλές αρχικά στροφές. Οι γωνίες κλίσης επιλέχθηκαν έπειτα από τρεξίματα του κώδικα BLADE, ώστε να διαπιστωθεί το ζεύγος εκείνο stagger που δίνει αρκετό περιθώριο λειτουργίας και σχεδόν ταυτόχρονη αποκόλληση και για τους δύο ρότορες.

Όσον αφορά στο **πεδίο ροής**, τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν κάποιες ιδιαιτερότητες της συγκεκριμένης διάταξης. Παρατηρείται πρόωρη αποκόλληση στο πόδι και μεγάλες ταχύτητες κοντά στο tip και για τους δύο ρότορες, γεγονός που πιθανόν οφείλεται στις κοιλότητες των δίσκων στο hub με αποτέλεσμα την αποκόλληση της ροής εκεί και τη δημιουργία στένωσης. Παράλληλα, η ιδιαιτερότητα της γεωμετρίας των πτερυγίων της διάταξης με τον 1^ο ρότορα να έχει παχύτερη αεροτομή στο tip και τον 2^ο ρότορα να έχει ανάποδη συστροφή στα πτερύγια, ίσως συντελεί σε αυτήν την εικόνα. Τα παραπάνω ενδέχεται να προκαλούν τέτοια καμπύλωση στις γραμμές ροής κατά την αποκόλληση στο πόδι, ώστε να μην υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ ίδιων ακτινικών θέσεων από τη θέση 2 προς τη θέση 3, και γι' αυτό να έχουμε σε ορισμένες περιπτώσεις έχουμε εμφάνιση αρνητικών τιμών του βαθμού απόδοσης κοντά στη μέση ακτίνα. Επίσης, για τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε, ο Re_c φθάνει τις 100000 με αποτέλεσμα να είναι και αυτό μια αιτία του σχετικά υψηλού συντελεστή απωλειών που παρατηρούμε ακτινικά. Ωστόσο, η ακτινική διανομή όλων των μεγεθών της ροής παρουσιάζει λογική και αναμενόμενη συμπεριφορά κατά την αλλαγή σημείου λειτουργίας.

Όσον αφορά στη **παραμετρική μελέτη** και τις ολικές επιδόσεις του C-R, τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν τα εξής :

1^{ov}) Η χαρακτηριστική Φ - Ψ του 1^{ov} ρότορα παραμένει αναλλοίωτη για σταθερή γωνία κλίσης των πτερυγίων του, ανεξάρτητα των στροφών του ή των στροφών του 2^{ov} ρότορα.

2^{ov}) Η χαρακτηριστική Φ - Ψ του 2^{ov} ρότορα μετατοπίζεται προς μικρότερα Φ με αύξηση του λόγου στροφών $R_U = N_{II}/N_I$ για σταθερή γωνία κλίσης. Για σταθερό λόγο στροφών και μείωση της γωνίας κλίσης του 1^{ov} ρότορα, η Φ - Ψ του 2^{ov} μετατοπίζεται προς μεγαλύτερα Φ . Γενικά, η Φ - Ψ του 2^{ov} εξαρτάται μόνο από το λόγο στροφών και τις γωνίες κλίσης ανεξάρτητα τις στροφές των πτερωτών.

3^{ov}) Για όλο το συμπιεστή, όσο αυξάνονται αθροιστικά οι στροφές των πτερωτών, αυξάνεται η παροχή και ο λόγος πίεσης του συμπιεστή και παράλληλα έχουμε πλάτυνση της χαρακτηριστικής του, γεγονός που δηλώνει την αύξηση του περιθωρίου λειτουργίας του. Τα ίδια συμβαίνουν και με τη μείωση των γωνιών κλίσης των πτερυγίων των πτερωτών, μόνο που τότε έχουμε και μια πρόσθετη οριζοντίωση των χαρακτηριστικών γεγονός που δηλώνει την αύξηση του περιθωρίου λειτουργίας σε υψηλούς λόγους πίεσης.

4^{ov}) Οι μετρήσεις στη μέση ακτίνα είναι αντιπροσωπευτικές μόνο για τον 1^o ρότορα, καθώς οι χαρακτηριστικές σχεδόν ταυτίζονται με αυτές που προκύπτουν από ολοκλήρωση των ακτινικών κατανομών των μεγεθών. Για τον 2^o ρότορα οι μετρήσεις στη μέση ακτίνα δεν είναι αντιπροσωπευτικές της συνολικής εικόνας του, καθώς παρουσιάζουν μειωμένο το λόγο πίεσης και πολλές φορές άλλη μορφή.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις στην παρούσα εγκατάσταση.

Κάποιες ιδέες που δεν πραγματοποιήθηκαν στην εργασία αυτή, αλλά προτείνονται για μελλοντική διερεύνηση, είναι οι εξής :

1. Έλεγχος περιφερειακής ανομοιομορφίας. Μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση επιπλέον 5-hole probe αντιδιαμετρικά σε σχέση με τη θέση που ήδη υπάρχει, ώστε να γίνουν ταυτόχρονες μετρήσεις σε δύο διαφορετικές περιφερειακές θέσεις.
2. Οι μετρήσεις στη συνέχεια να γίνονται με λήψη περισσότερων σημείων λειτουργίας (σ.λ.) και με περισσότερες από δύο μετρήσεις για κάθε σ.λ.. Έτσι, θα προκύπτουν ακριβέστερες χαρακτηριστικές καμπύλες. Επίσης, θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις για περισσότερα ζεύγη στροφών και γωνιών κλίσης. Αναμένουμε πως με την αύξηση των στροφών και προφανώς την αύξηση του Re_c πέρα του $2.5 \cdot 10^5$ θα μειωθεί ο συντελεστής απωλειών στις πτερυγώσεις και θα αυξηθεί ο β.α..
3. Διερεύνηση της μεταβολής που ακολουθά η διαφορά των μεγεθών στη μέση ακτίνα (θέση 2-θέση 3) από τη διαφορά των μεγεθών από ακτινική ολοκλήρωση, σε σχέση με τη μεταβολή των στροφών. Έτσι, μετρώντας μόνο στη μέση ακτίνα, θα μπορούμε με μια συνάρτηση διόρθωσης να έχουμε αντιστοιχία για όλο το κανάλι ροής για το 2^o ρότορα.
4. Μέτρηση ηχητικών εκπομπών. Το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων έχει ήδη τη δυνατότητα υποδοχής δύο μικροφώνων για μέτρηση ήχου.
5. Διερεύνηση για αλλαγή του αξονικού διακένου των πτερωτών. Αναμένεται ότι με τη μείωση του αξονικού διακένου θα αυξηθεί το περιθώριο λειτουργίας του 1^{ov} ρότορα, καθώς το οριακό στρώμα του δε θα προλαβαίνει να αναπτυχθεί αφού θα αναρροφάται αμέσως από τον 2^o ρότορα, κι έτσι θα καθυστερεί η αποκόλληση του.
6. 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.
7. Διερεύνηση για λόγο στροφών $R_U = N_{II}/N_I < 1$, δηλαδή τον 1^o ρότορα να στρέφεται γρηγορότερα από τον 2^o ώστε ο 2^{os} 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

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

[1] Budugur Lakshminarayana. “Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery”, John Wiley & Sons, 1996, ISBN: 0471855464.

[2] Ira H.Abbott, Albert E. von Doenhoff, 1945. “Summary of Airfoil Data”, NACA Report No. 824.

[3] Charles L. Ladson, Cuyler W. Brooks, Jr., Acquilla S. Hill, Darrell W. Sproles, 1996. “Computer Program To Obtain Ordinates for NACA Airfoils”, NASA Technical Memorandum 4741.

[4] Gorlin S.M., Slezinger I.I., 1966. “Wind Tunnels and Their Instrumentation”, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, pp 27-30.

[5] John Piotrowski. “Shaft Alignment Handbook”, Third Edition, 2007, CRC Press, ISBN: 1574447211.

[6] Eric Oberg, Franklin D.Jones, Holbrook L.Horton, Henry H.Ryffel. “Machinery’s Handbook”, 28th Edition, 2008, INDUSTRIAL PRESS NEW YORK, ISBN: 9780831128388.

[7] John H.Bickford. “Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints-Non Gasketed Joints”, Fourth Edition, 2008, CRC Press, ISBN: 9780849381768.

[8] Kyo-Soo Song, Seon-Gab Kim, Young-Ha Hwang, 2007. “Failure of the J79 Engine Compressor Blade Due to Stall”, Journal of Failure Analysis and Prevention, Springer Boston, Volume 7, Number 3/June 2007.

[9] Richard T.Barrett, 1990. “Fastener Design Manual”, NASA Reference Publication 1228.

[10] Joseph E.Shigley, Charles R.Mischke. “Standard Handbook of Machine Design”, 2nd Edition, 1996, McGraw – Hill, ISBN : 0070569584.

[11] Robert O.Parmley. “Illustrated Sourcebook of Mechanical Components”, McGraw – Hill, 2000, ISBN : 0070486174 .

[12] OWER E, PANKHURST R.O., 1977. “The Measurement of Airflow”, 5th edition (in S.I. Units), Pergamon Press, pp 190-194, 280-285.

[13] Crane Company, 1988. “Flow of Fluids through valves fittings and pipe”, Metric Edition, Crane Co. New York, Technical Paper No. 410M.

[14] P.T. Tsilingiris, 2007. “Thermophysical and Transport Properties of Humid Air at Temperature Range between 0 and 100°C”, Elsevier, Energy Conversion and Management 49 (2208) 1098 – 1110.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [15] Κ.Α. Παπαηλιού, Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου. “Εισαγωγή Στις Θερμικές Στροβιλομηχανές”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2000.
- [16] Κ.Α. Παπαηλιού. “Περιληπτικές σημειώσεις του μαθήματος Θερμικών Στροβιλομηχανών ΙΙ”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [17] Κ.Μ. Μαθιουδάκης. “Εισαγωγή Στους Αεροπορικούς Κινητήρες - Στροβιλοαντιδραστήρες”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003.
- [18] Κ.Χ. Γιαννάκογλου. “Συνεκτικές Ροές στις Στροβιλομηχανές”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
- [19] Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Ι. Αναγνωστόπουλος, Γ. Μπεργελές. “Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2003, 3^η Έκδοση.
- [20] Γ. Κατσίκης, 2008. “Σχεδιασμός και Κατασκευή Διάταξης Δοκιμών Αντίρροπα Στρεφόμενων Πτερωτών”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π..
- [21] Ν. Αρετάκης, 1994. “Τροποποιήσεις σε Σήραγγα Δοκιμών Συμπιεστών Χαμηλών Ταχυτήτων και Μετρήσεις σε Μονοβάθμιο Συμπιεστή”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π..
- [22] Δ. Χρονόπουλος, 2010. “Ανάπτυξη λογισμικού εκτίμησης απαραίτητης πληροφορίας για δημιουργία μοντέλων αεριοστροβίλων”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π..
- [23] Στοιχεία Μηχανών Τόμος ΙΙΙ, Κεφάλαιο Ρ’ «Ιμαντοκινήσεις». Ρ. Γραικούση, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη 1983.
- [24] Στοιχεία Μηχανών Τόμος Ι, Κεφάλαιο Δ’ «Κοχλίες». Ρ. Γραικούση, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη 1983.
- [25] Σ.Ε. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΥ, “Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1989.
- [26] Δ.Σ. Μαθιουλάκης. “Τεχνικές Μετρήσεις Ρευστομηχανικών Μεγεθών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
- [27] Μπεργελές Γ., Παπαντώνης Δ., Τσαγγάρης Σ. “Τεχνικές Μετρήσεις Ρευστομηχανικών Μεγεθών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1990.

Σελίδες Εταιριών στο Διαδίκτυο

- [28] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας Βαλιάδης Α.Ε. , <http://www.valiadis.gr>
- [29] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας LG, <http://www.lge.com>
- [30] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας Skf, <http://www.skf.com>
- [31] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας Fenner, <http://www.fptgroup.com>

- [32] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας Challenge, <http://www.challengept.com>
- [33] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας Sati, <http://www.satispa.com>
- [34] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας MatWeb, <http://www.matweb.com>
- [35] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας Americanfastener, <http://www.americanfastener.com>
- [36] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας Costas Chronis SA, <http://www.costaschronis.com>
- [37] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας NEOTEX, <http://www.neotex.gr>
- [38] Διαδικτυακός τόπος εταιρείας Brüel & Kjaer, <http://www.bksv.com>

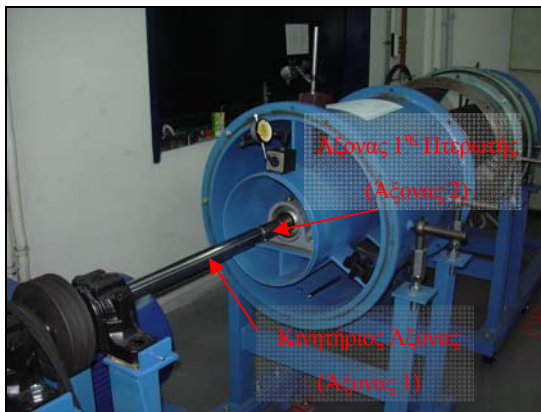
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π1

Συναρμολόγηση – Επιοπτεία – Συντήρηση κινούμενων εξαρτημάτων της διάταξης.

Π1.1 Ευθυγράμμιση αξόνων κίνησης πρώτης πτερωτής.

Για την κίνηση της 1^{ης} πτερωτής (Σχήμα Π1.1) έχουμε μετάδοση κίνησης μέσω ονυχωτού ελαστικού συνδέσμου (Spider or Jaw Coupling) (βλ. Σχήμα Π1.2). Είναι προφανές ότι ο άξονας της 1^{ης} πτερωτής και ο κινητήριος άξονας που φέρει την τροχαλία, πρέπει να ευθυγραμμιστούν μεταξύ τους πριν τοποθετηθεί ο ελαστικός σύνδεσμος, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία.

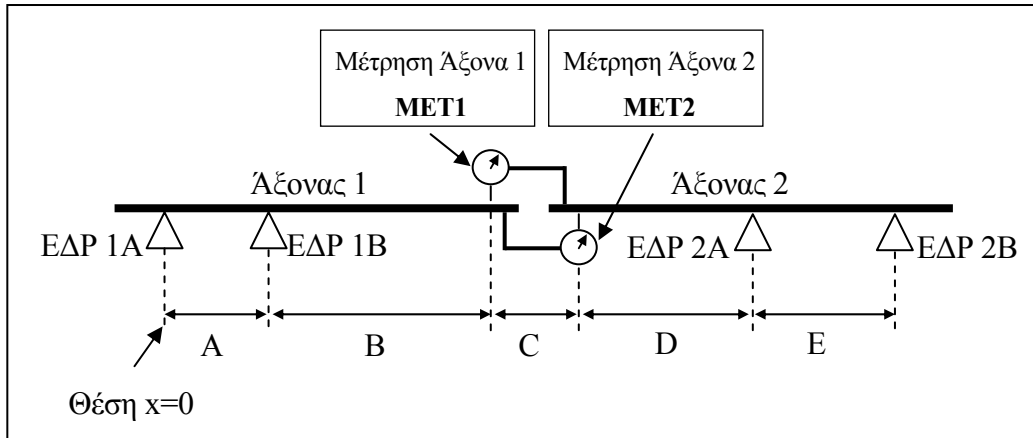


Σχήμα Π1.1: Άξονες της εγκατάστασης που έγινε η ευθυγράμμιση.



Σχήμα Π1.2: Τοποθέτηση του ελαστικού συνδέσμου μετά την ευθυγράμμιση των αξόνων.

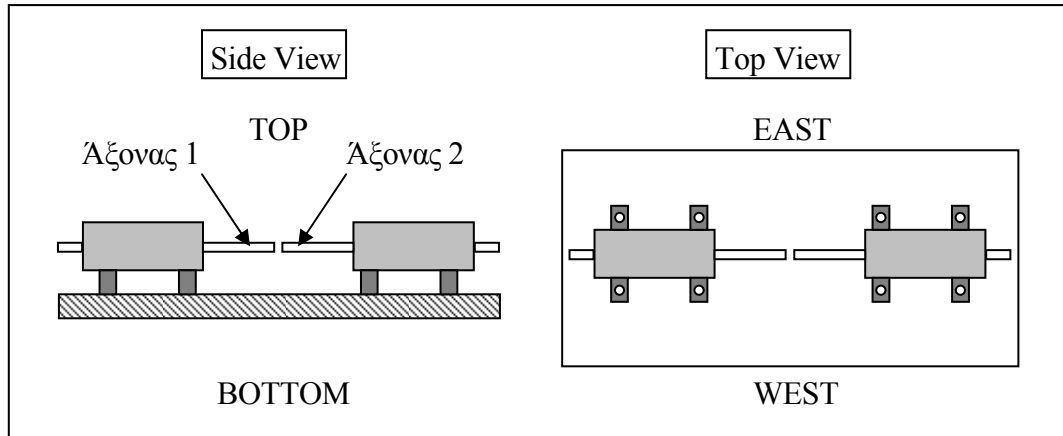
Για την ευθυγράμμιση των δύο αξόνων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος “αντίστροφης ένδειξης με την τεχνική Γραμμή σε Σημείο” (Reverse Indicator Method using Line to Point Technique)^[5]. Για τη εφαρμογή της μεθόδου αυτής χρειαζόμαστε ένα ή δύο μετρητικά ρολόγια. Η διαδικασία αποτελείται από τα παρακάτω βήματα (βλ. και Σχήμα Π1.3) :



Σχήμα Π1.3: Τυπική διάταξη ευθυγράμμισης αξόνων για χρήση της μεθόδου Reverse Indicator Method using Line to Point Technique^[5].

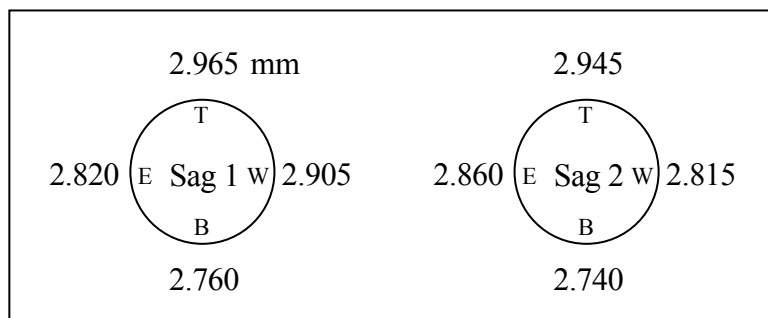
1. Επιλέγουμε τον 1^ο άξονα να είναι ο “Κινητός (Ρυθμιζόμενος)” δηλαδή αυτός που θα ρυθμίσουμε τις θέσεις των εδράσεων του ώστε να ευθυγραμμιστεί με τον 2^ο άξονα – “Ακίνητος” στον οποίο δεν παρεμβαίνουμε στις εδράσεις του. Βέβαια, όπως θα διαπιστωθεί παρακάτω, με τη χρήση της μεθόδου έχουμε δυνατότητα ρύθμισης όλων των εδράσεων. Η σύμβαση αυτή περισσότερο έχει να κάνει με τη μορφή της γραφικής μεθόδου, που όπως θα φανεί παρακάτω ο “Ακίνητος” βρίσκεται πάνω στον άξονα $x x'$.
2. Επιλέγουμε τις θέσεις πάνω στους άξονες που θα μετρήσουμε με το μετρητικό ρολόι (θέσεις MET1, MET2) ώστε να βρίσκονται στη θέση που θα τοποθετηθεί ο ελαστικός σύνδεσμος μετά την ευθυγράμμιση.
3. Επιλέγουμε τις εδράσεις κάθε άξονα έχοντας κατά νου ότι 1^ο) δεν είναι απαραίτητο οι εδράσεις που μετράμε να είναι οι εδράσεις των ρουλεμάν, αλλά μπορεί να είναι εδράσεις των οποίων μπορούμε να ρυθμίσουμε την θέση, και 2^ο) δεν είναι απαραίτητο να έχουν δυνατότητα ρύθμισης της θέσης τους και οι δύο άξονες, έτσι εάν ο ένας θα μείνει ακίνητος, τότε αρκεί ο άλλος να έχει 2 βαθμούς ελευθερίας για κάθε έδραση.
4. Μετρούμε τις αποστάσεις A, B, C, D, E σε mm όπως φαίνεται στο Σχήμα Π1.3, όπου, A είναι η απόσταση μεταξύ των εδράσεων του 1^{ου} άξονα και E η απόσταση μεταξύ των εδράσεων του 2^{ου} άξονα. B είναι η απόσταση του σημείου μέτρησης του 1^{ου} άξονα (MET1) από την εσωτερική έδραση του 1^{ου} άξονα (ΕΔΡ 1B). D είναι η απόσταση του σημείου μέτρησης του 2^{ου} άξονα (MET2) από την εσωτερική έδραση του 2^{ου} άξονα (ΕΔΡ 2Α). C είναι η απόσταση των σημείων μέτρησης MET1 και MET2.
5. Τοποθετούμε το 1^ο μετρητικό ρολόι στον 2^ο άξονα και ρυθμίζουμε τον βραχίονά του έτσι ώστε η ακίδα μέτρησης να ακουμπάει τον 1^ο άξονα στο σημείο μέτρησης MET1. Τοποθετούμε το 2^ο μετρητικό ρολόι στον 1^ο άξονα και ρυθμίζουμε τον βραχίονά του έτσι ώστε η ακίδα μέτρησης να ακουμπάει τον 2^ο άξονα στο σημείο μέτρησης MET2.

6. Επιλέγουμε και τηρούμε για την διάταξή μας έναν προσανατολισμό ώστε στο επίπεδο της κάτοψης (TOP View) να έχουμε ανατολή και δύση (EAST-WEST) και στο επίπεδο της πλάγιας όψης (SIDE View) να έχουμε κορυφή και πυθμένα (TOP-BOTTOM), βλ. και Σχήμα Π1.4. Σημειώνουμε τη σύμβαση αυτή σε ένα χαρτί.



Σχήμα Π1.4: Παράδειγμα σύμβασης προσανατολισμού μετρήσεων για μια διάταξη, στην διαδικασία ευθυγράμμισης αξόνων.

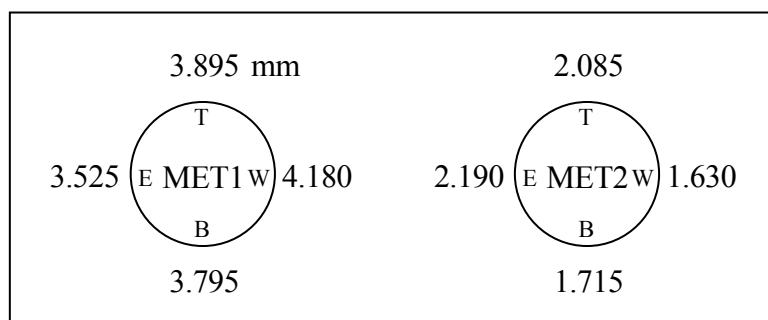
7. Μέτρηση Sag. Το sag είναι η επίδραση της βαρύτητας στις ενδείξεις του μετρητικού ρολογιού ανάλογα με τη θέση του ως προς το διάνυσμα της βαρύτητας. Η επίδραση αυτή οφείλεται στο ότι τα στελέχη και οι αρθρώσεις, ακόμα και ο ίδιος ο μηχανισμός του μετρητικού ρολογιού, έχουν ελαστικότητα η οποία στο επίπεδο μη είναι αισθητή με την επίδραση της βαρύτητας. Έτσι, αν για παράδειγμα τοποθετήσουμε (σφίξουμε) το μετρητικό ρολόι επάνω σε έναν άξονα στη θέση TOP και έπειτα περιστρέψουμε τον άξονα μαζί με το ρολόι στη θέση BOTTOM θα δούμε ότι έχουμε διαφορετικές ενδείξεις για τις δύο θέσεις. Αυτό που κάνουμε λοιπόν στο σημείο αυτό είναι να μετρήσουμε το sag για τα δύο μετρητικά ρολόγια. Τοποθετούμε το 1^ο μετρητικό ρολόι (με το οποίο θα μετρήσουμε τον άξονα 1 στη θέση MET1) στον άξονα 2 χωρίς να αλλάξουμε τις ρυθμίσεις των στελεχών του, ώστε η ακίδα να ακουμπά στον άξονα 2. Περιστρέφουμε τον άξονα 2 μαζί με το ρολόι ώστε η ακίδα να είναι στη θέση TOP και σημειώνουμε την ένδειξη πάνω στο κυκλάκι. κάνουμε το ίδιο και για τις υπόλοιπες θέσεις WEST, BOTTOM, EAST (βλ. Σχήμα Π1.5). Με αντίστοιχο τρόπο επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για το 2^ο μετρητικό ρολόι.



Σχήμα Π1.5: Παράδειγμα μέτρησης του sag των δύο μετρητικών ρολογιών.

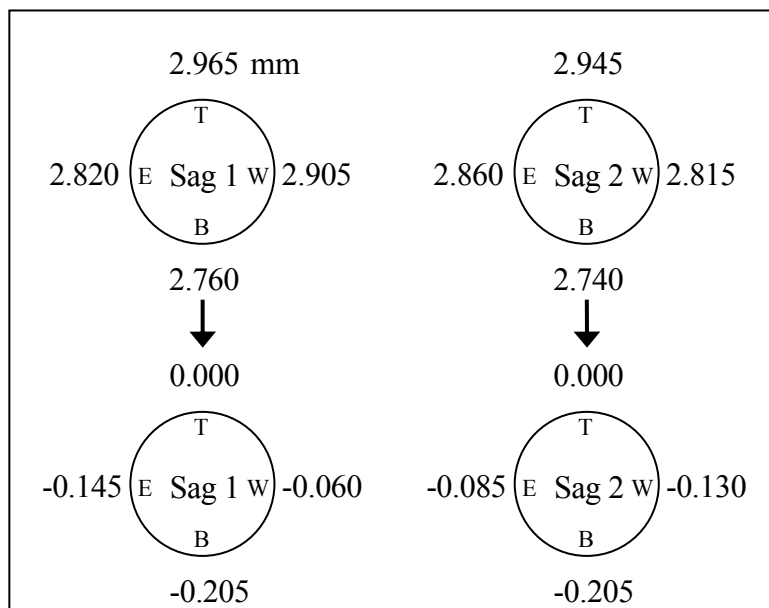
8. Τοποθετούμε (σφίγγουμε) το 1^ο μετρητικό ρολόι στον άξονα 2 χωρίς να αλλάξουμε τις ρυθμίσεις των στελεχών του, ώστε η ακίδα να ακουμπά στον άξονα 1 στη θέση MET1 και περιστρέφουμε τον άξονα 2 μαζί με το μετρητικό ρολόι ώστε να πάρουμε μετρήσεις για τις κατευθύνσεις TOP, WEST, BOTTOM, EAST σημειώνοντάς τες στον κύκλο όπως φαίνεται στο Σχήμα Π1.6. Στην συνέχεια επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία με το δεύτερο μετρητικό ρολόι, αντίστοιχα, για τη μέτρηση της απόκλισης του 2^{ου} άξονα. Επίσης, το Σχήμα Π1.16 και Σχήμα Π1.17 δείχνουν στην διάταξη δοκιμών πως τοποθετούνται τα μετρητικά ρολόγια.

Να σημειώσουμε ότι για να μην έχουμε επίδραση των μετρήσεων από το runout των αξόνων (μη κυλινδρικότητά τους), πρέπει, καθώς περιστρέφουμε τον άξονα με το ρολόι επάνω του, να περιστρέφουμε ταυτόχρονα και τον άλλο άξονα (αυτόν που ακουμπάει η ακίδα), ώστε να μην αλλάζει το σημείο επαφής της ακίδας του μετρικού ρολογιού με τον άξονα που μετράμε.



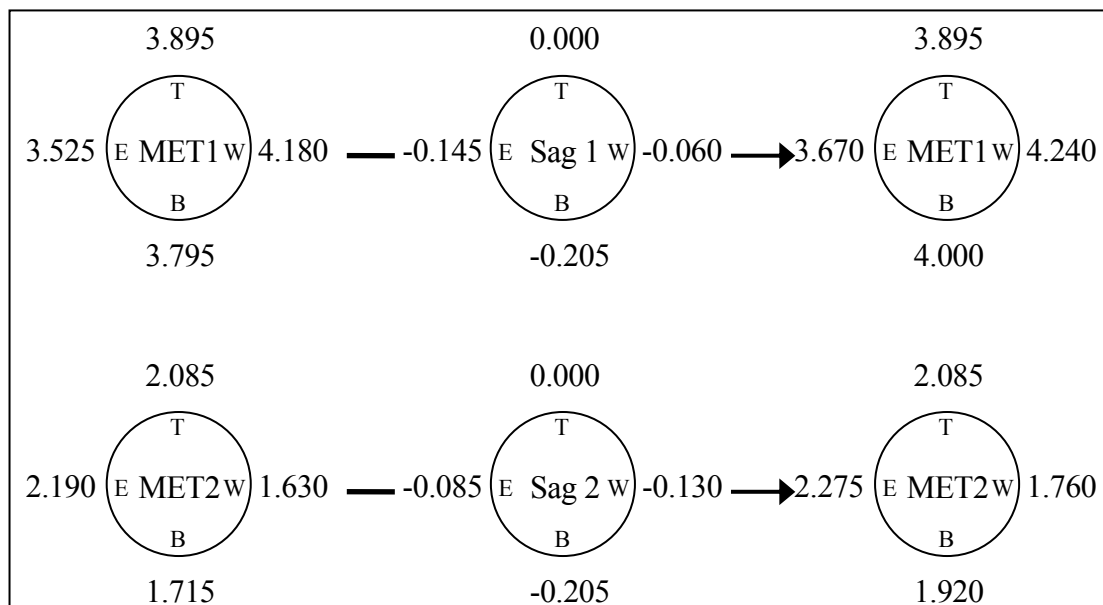
Σχήμα Π1.6: Παράδειγμα μέτρησης των αποκλίσεων των δύο αξόνων.

9. Μηδενίζουμε το sag για τα δύο ρολόγια αφαιρώντας από όλες τις τιμές των κατευθύνσεων TOP, BOTTOM, EAST, WEST, την τιμή της τιμής του TOP για κάθε ρολόι (βλ. και Σχήμα Π1.7) ώστε να μείνει το αληθινό μέγεθος της επίδρασης της βαρύτητας σε κάθε κατεύθυνση.



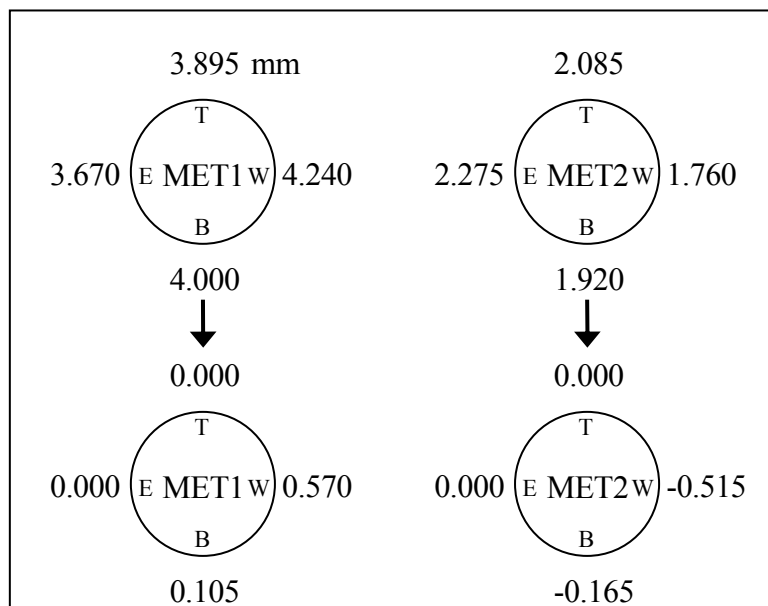
Σχήμα Π1.7: Παράδειγμα “μηδενισμού” του sag.

10. Αφαιρούμε από τις μετρήσεις των αποκλίσεων τις μετρήσεις του sag για κάθε κατεύθυνση, και για τους δύο άξονες όπως φαίνεται στο σχήμα Σχήμα Π1.8.



Σχήμα Π1.8: Παράδειγμα αφαίρεσης του sag από τις μετρήσεις των αποκλίσεων.

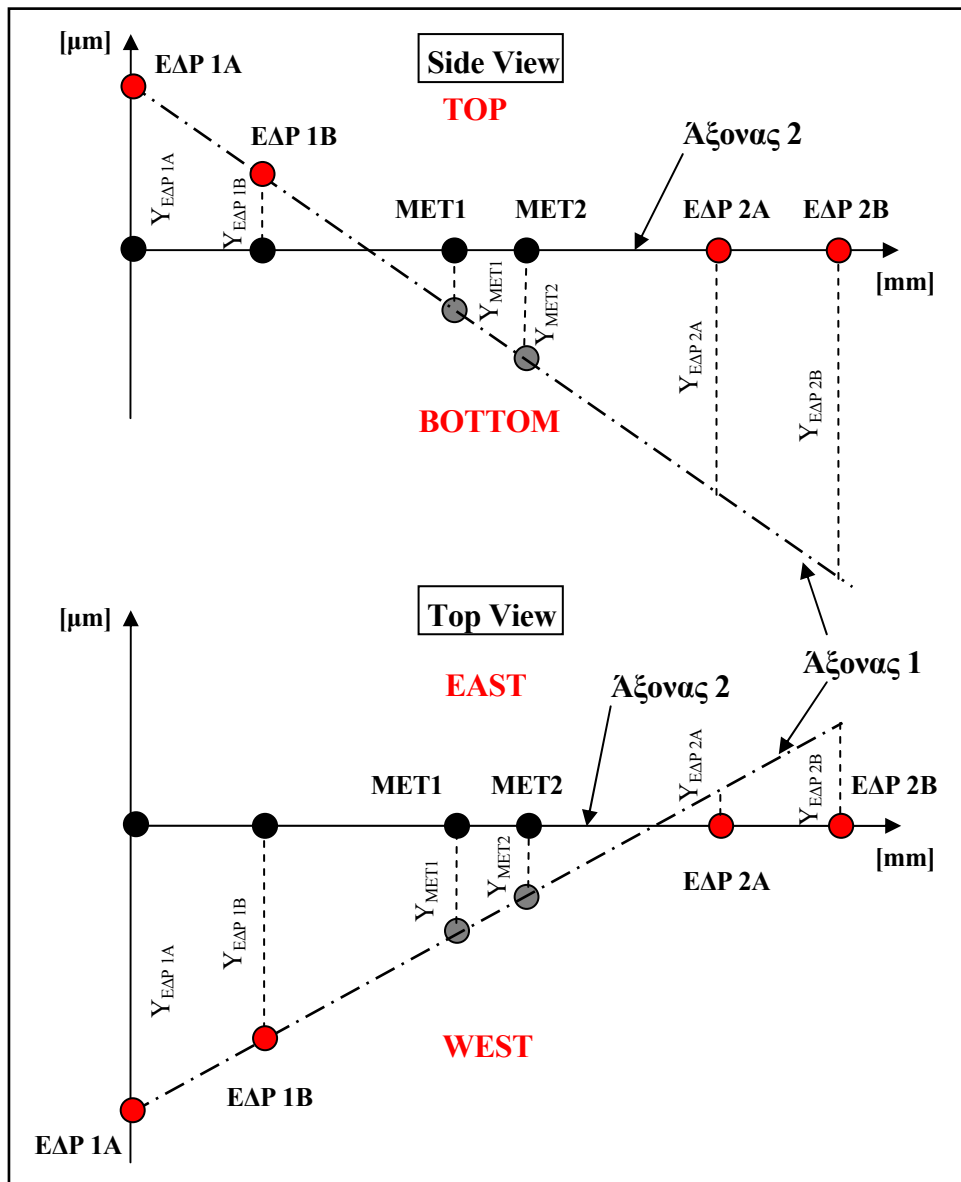
11. Για κάθε “καθαρή” πλέον μέτρηση αποκλίσεων (MET1, MET2), αφαιρούμε από τις μετρήσεις του TOP και BOTTOM τη μέτρηση του TOP και από τις μετρήσεις του EAST και WEST τη μέτρηση του EAST (βλ. και Σχήμα Π1.9).



Σχήμα Π1.9: Παράδειγμα “μηδενισμού” του TOP και EAST από τις μετρήσεις των αποκλίσεων.

12. Κατασκευάζουμε δύο διαγράμματα σε μιλιμετρέ χαρτί ή σε κάποιο πρόγραμμα υπολογιστή. Το ένα για την πλάγια όψη και το άλλο για την κάτοψη ώστε να δούμε τις αποκλίσεις των δύο αξόνων στα δύο αυτά επίπεδα (βλ. Σχήμα Π1.10). Στον άξονα xx' τοποθετούμε τις εδράσεις στην ακριβή τους θέση και τις θέσεις MET1, MET2 με την έδραση ΕΔΡ1Α να βρίσκεται στο $x=0$. Έπειτα, υπολογίζουμε τις τεταγμένες των σημείων MET1, MET2 και για τα δύο διαγράμματα ως εξής : Πλάγια όψη : $Y_{MET1} = -\text{BOTTOM}_{MET1}/2$, $Y_{MET2} = \text{BOTTOM}_{MET2}/2$: Κάτοψη : $Y_{MET1} = -\text{WEST}_{MET1}/2$, $Y_{MET2} = \text{WEST}_{MET2}/2$.

Σε κάθε διάγραμμα ο $2^{\text{ος}}$ άξονας βρίσκεται πάνω στον xx' ενώ ο $1^{\text{ος}}$ άξονας επάνω στην ευθεία που ενώνει τα σημεία MET1, MET2 που δημιουργήσαμε και στην πραγματικότητα οι εδράσεις ΕΔΡ1Α και ΕΔΡ1Β βρίσκονται επάνω στην ευθεία αυτή έχοντας τις ίδιες τεταγμένες με αυτές που σχεδιάσαμε. Ο άξονας xx' έχει μονάδες mm και ο yy' μονάδες μm .

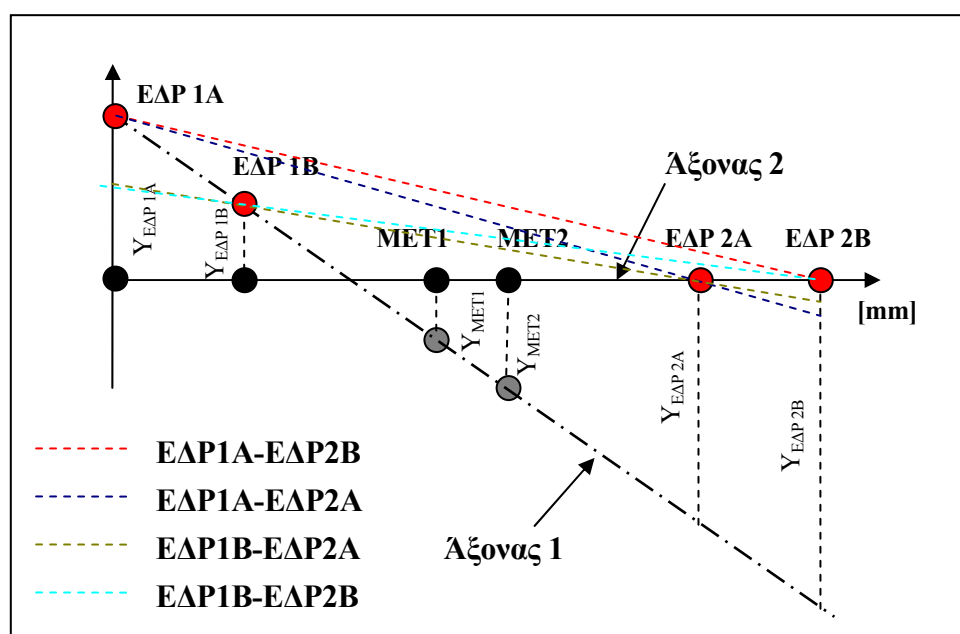


Σχήμα Π1.10: Παράδειγμα διαγραμμάτων αποκλίσεων αξόνων στα επίπεδα κάτοψης και πλάγιας όψης.

13. Επιλέγουμε τις διορθωτικές κινήσεις που θα εφαρμόσουμε για την ευθυγράμμιση των δύο αξόνων μεταξύ τους και στα δύο επίπεδα (κάτοψη και πλάγια όψη). Όπως φαίνεται από το Σχήμα Π1.10 με μια πρώτη ματιά, μπορούμε να ευθυγραμμίσουμε τον άξονα 1 με τον άξονα 2 κρατώντας τον άξονα 2 ακίνητο. Αυτό, για παράδειγμα στην περίπτωση της πλάγιας όψης, σημαίνει ότι πρέπει η έδραση EAP 1A να μετακινηθεί κατά $Y_{EAP\ 1A}$ προς BOTTOM και η έδραση EAP 1B κατά $Y_{EAP\ 1B}$ προς BOTTOM. Ενώ, εάν θέλουμε να ευθυγραμμίσουμε τον άξονα 2 με τον άξονα 1, κρατώντας τον άξονα 1 ακίνητο, τότε πρέπει να μετακινηθεί η έδραση EAP 2A κατά $Y_{EAP\ 2A}$ προς BOTTOM και η έδραση EAP 2B κατά $Y_{EAP\ 2B}$ προς BOTTOM. Αντίστοιχες περιπτώσεις υπάρχουν και στην

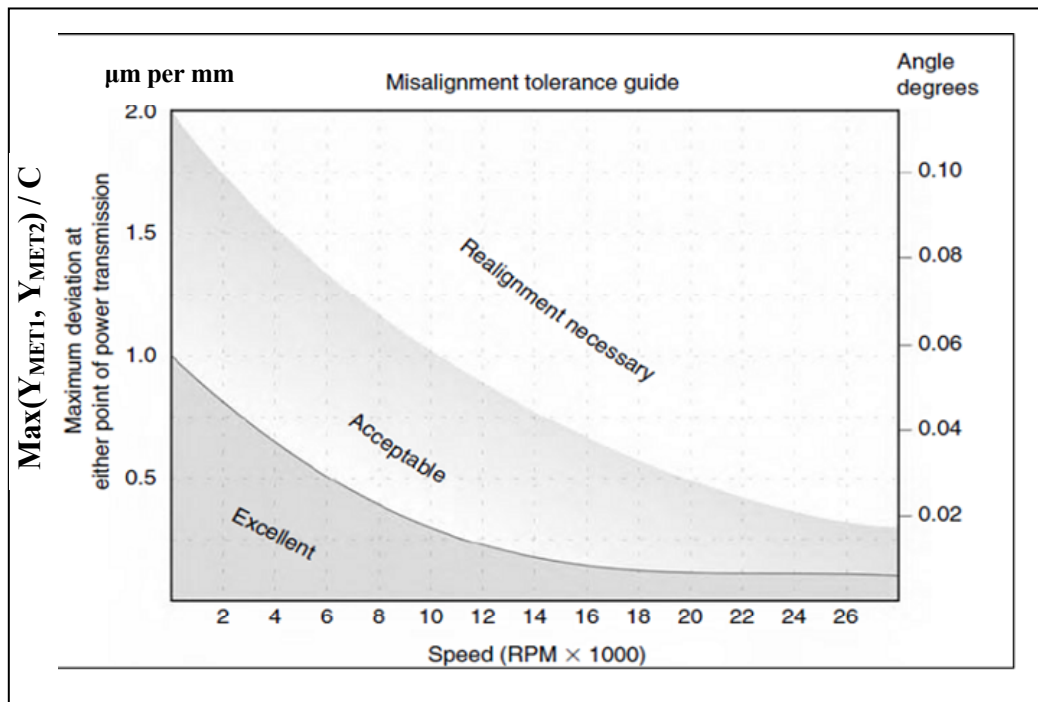
κάτοψη.

Βέβαια, δεν είναι υποχρεωτικό να έχουμε ευθυγράμμιση ως προς τον άξονα 1 ή ως προς τον άξονα 2, αλλά και ως προς έναν από τους 4 άξονες οι οποίοι ενώνουν τα 4 δυνατά ζεύγη εδράσεων των αξόνων 1 και 2. Αυτά είναι : ΕΔΡ1Α-ΕΔΡ2Β, ΕΔΡ1Α-ΕΔΡ2Α, ΕΔΡ1Β-ΕΔΡ2Β, ΕΔΡ1Β-ΕΔΡ2Α, όπως φαίνεται στο σχήμα Σχήμα Π1.11. Εάν επιλέξουμε κάποιο από αυτά τα ζεύγη για κάποιο επίπεδο, τότε οι εδράσεις των ζευγών αυτών μένουν ακίνητες και ρυθμίζουμε κατάλληλα τις άλλες δύο ώστε να ευθυγραμμιστούν οι άξονες 1 και 2 με τον νέο άξονα. Έτσι, έχουμε συνολικά 6 περιπτώσεις διόρθωσης για κάθε επίπεδο, και επιλέγουμε την πιο προσιτή ανάλογα την διάταξη και τους βαθμούς ελευθερίας των εδράσεων της.



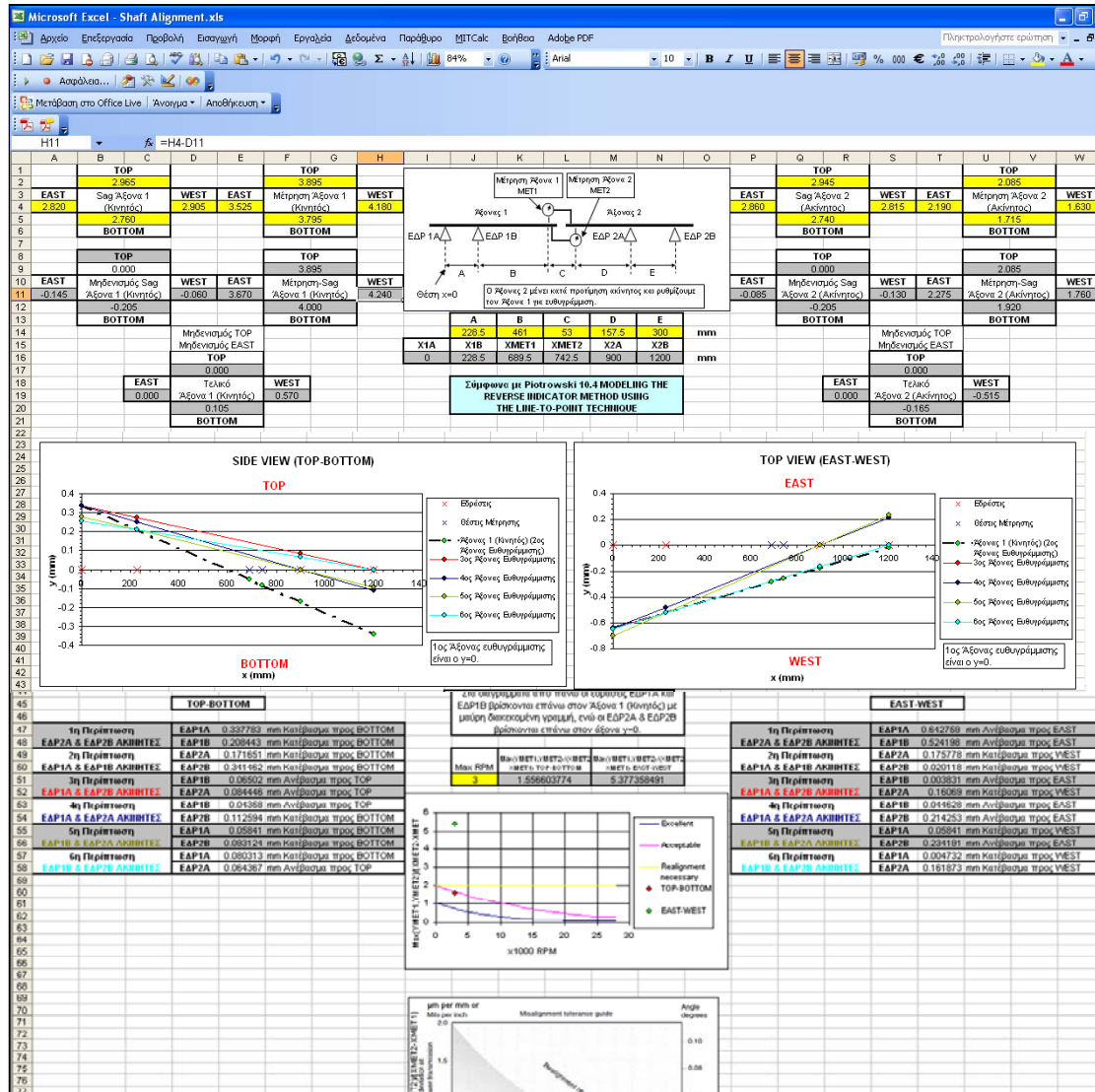
Σχήμα Π1.11: Παράδειγμα των 4 περιπτώσεων αξόνων ευθυγράμμισης.

14. Ελέγχουμε εάν είμαστε μέσα στην περιοχή καλής ή ανεκτής ευθυγράμμισης, ώστε να σταματήσει η διαδικασία, ή στην περιοχή κακής ευθυγράμμισης που θα χρειαστεί να επανευθυγραμμίσουμε, κάνοντας τις διορθωτικές κινήσεις που επιλέξαμε σύμφωνα με τα παραπάνω βήματα. ο έλεγχος γίνεται ως εξής : Όταν έχουμε συμπληρώσει το 12^ο βήμα, διαλέγουμε το μεγαλύτερο κατά απόλυτη τιμή Y_{MET1} ή Y_{MET2} και από τα δύο διαγράμματα, και το διαιρούμε με την απόσταση C (απόσταση των θέσεων ΜΕΤ1 και ΜΕΤ2). Το μέγεθος που προκύπτει πρέπει έχει μονάδες $\mu\text{m}/\text{mm}$. Έτσι, σύμφωνα με τον μέγιστο αριθμό στροφών ανά λεπτό των 2 αξόνων συμβουλευόμαστε το Σχήμα Π1.12 για την ποιότητα της ευθυγράμμισης.



Σχήμα Π1.12: Διάγραμμα ποιότητας ευθυγράμμισης^[5].

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δημιουργήσαμε ένα φύλλο στο EXCEL το οποίο υπολογίζει όλα τα παραπάνω βήματα παρουσιάζοντας στο τέλος τις 12 δυνατές διορθώσεις που μπορούν να γίνουν (6 για κάθε επίπεδο), καθώς και την ποιότητα της ευθυγράμμισης. Σαν είσοδο παίρνει τις μετρήσεις του sag των δύο μετρητικών ρολογιών, τις μετρήσεις των αποκλίσεων των δύο αξόνων, τις αποστάσεις A, B, C, D, E και των μέγιστο αριθμό σ.α.λ. των αξόνων. Εδώ, δεν παραθέτουμε τις σχέσεις των υπολογισμών, καθώς είναι απλές αλγεβρικές σχέσεις που περιέχουν ευθείες γραμμές ($y=a.x+b$) και κατακόρυφες αποστάσεις σημείων από ευθείες. Στο Σχήμα Π1.13 φαίνεται μια άποψη του περιβάλλοντος του προγράμματος.



Σχήμα Π1.13: Άποψη του περιβάλλοντος του προγράμματος σε φύλλο EXCEL για την ευθυγράμμιση αξόνων με τη μέθοδο Reverse Indicator Method using Line to Point Technique^[5].

Στην παρούσα διάταξη δοκιμών για την ευθυγράμμιση των αξόνων, επιλέξαμε για τον κινητήριο άξονα (Αξονας 1) τις εδράσεις των ρουλεμάν για τις εδράσεις ΕΔΡ1Α και ΕΔΡ1Β και για τον άξονα της 1^{ης} περωτής (Αξονας 2) της εδράσεις του CAP για τις εδράσεις ΕΔΡ2Α και ΕΔΡ2Β. Βέβαια, τις εδράσεις του CAP δε μπορούσαμε να τις ρυθμίσουμε για να μην χαλάσει η ευθυγράμμιση του άξονα της 1^{ης} περωτής με το κέλυφος της 1^{ης} περωτής. Έτσι, στον υπολογισμό της ευθυγράμμισης θεωρήσαμε τον άξονα 2 ακίνητο. Ο κινητήριος άξονας (Αξονας 1) είναι ο κινητός και η ευθυγράμμιση του με τον 2^ο άξονα έγινε με ρύθμιση της θέσης των δύο εδράσεων των ρουλεμάν. Στο επίπεδο της κάτωφης η ρύθμιση γίνεται με τους πλαϊνούς κοχλίες ρύθμισης θέσης έδρασης (βλ. Σχήμα Π1.14) και στο επίπεδο της πλάγιας όψης με τοποθέτηση μεταλλικών φύλλων επιθυμητού πάχους κάτω από τις εδράσεις των ρουλεμάν (βλ. Σχήμα Π1.15). Να αναφέρουμε ότι η ρύθμιση των μετατοπίσεων των εδράσεων γίνεται

με χρήση του μετρητικού ρολογιού, αφού οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες από 1mm. Για την διάταξή μας ο μέγιστος αριθμός σ.α.λ. είναι 3000 RPM και οι αποστάσεις των εδράσεων και σημείων μέτρησης είναι : A=228.5mm , B=461mm , C=53mm, D=157.5mm, E=300mm .



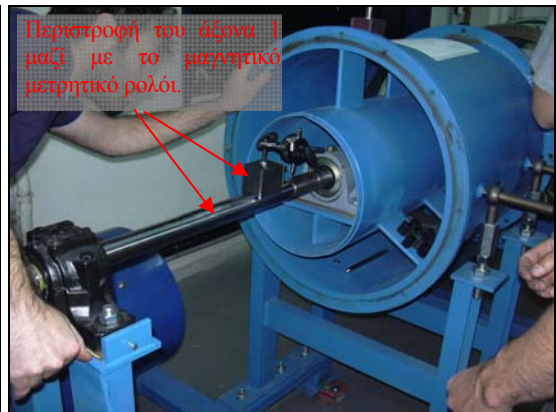
Σχήμα Π1.14: Ρύθμιση της εδράσεως ΕΔΡ1Α στο επίπεδο της κίτοψης, κατά την διαδικασία ευθυγράμμισης.



Σχήμα Π1.15: Ρύθμιση των εδράσεων ΕΔΡ1Α και ΕΔΡ1Β στο επίπεδο της πλάγιας όψης, κατά την διαδικασία ευθυγράμμισης.



Σχήμα Π1.16: Μέτρηση της απόκλισης του 1^{ου} άξονα με το 1^ο μετρητικό ρολόι στην θέση MET1.



Σχήμα Π1.17: Μέτρηση της απόκλισης του 2^{ου} άξονα με το 2^ο μετρητικό ρολόι στη θέση MET2.

Τέλος, λόγω της μικρής διάρκειας λειτουργίας της διάταξης, καθώς είναι προορισμένη για πειραματικές μετρήσεις και όχι για μόνιμη λειτουργία, είναι αναγκαίο περισσότερο για λόγους εποπτείας, να γίνεται έλεγχος της ευθυγράμμισης μία φορά τον χρόνο.

Να αναφέρουμε ότι η ευθυγράμμιση του άξονα της 1^{ης} πτερωτής με το κέλυφος της πρώτης πτερωτής έγινε με τη μέθοδο “Double Radial Method”^[5] και για την περίπτωση μας τα μετρητικά ρολόγια είναι πάνω στον άξονα της πτερωτής και μετράνε την εσωτερική επιφάνεια του κελύφους σε θέση τέτοια που βρίσκονται πάνω ακριβώς

από τις εδράσεις του CAP. Η διαδικασία της μεθόδου είναι ίδια με την Reverse Indicator, με τη διαφορά ότι στην κατασκευή των διαγραμμάτων 1^{ov}) ο άξονας xx' είναι το κέλυφος (Bore) και ο κεκλιμένος άξονας ο άξονας της περωτής, 2^{ov}) σχεδιάζουμε τα σημεία (που όταν ενωθούν μας δίνουν τον άξονα της περωτής) με τέτοιο τρόπο ώστε το Y_{MET1} και Y_{MET2} να είναι το μισό από τις τελικές διορθωμένες ενδείξεις των ρολογιών και με αντίθετο πρόσημο, και για τις δύο θέσεις μέτρησης, και για τα δύο επίπεδα.

Π1.2 Ευθυγράμμιση τροχαλιών – Τάνυση ιμάντων κίνησης.

Η μετάδοση κίνησης από τους ηλεκτροκινητήρες στους άξονες των περωτών στην διάταξή μας, γίνεται με ιμάντες. Κατά συνέπεια, είναι αναγκαία 1^{ov}) Η ευθυγράμμιση των ζευγαριών τροχαλιών κίνησης της 1^{ης} και της 2^{ης} περωτής, 2^{ov}) Η σωστή τάνυση των ιμάντων κίνησης.

Πλήρη στοιχεία για τη μελέτη και τον τύπο της μιαντοκίνησης αναφέρονται στο [20]. Εδώ, αρκεί να πούμε ότι οι τροχαλίες έχουν διάμετρο $D=180\text{mm}$ και φέρουν 3 ιμάντες SPA 2240 power plus wedge ανά ζεύγος τροχαλιών. Αυτό σημαίνει ότι η κάθε τριάδα μιαντοκίνησης μεταφέρει έως 45kW ισχύ και ότι το μήκος του κάθε ιμάντα είναι $L=2240\text{mm}$. Εφ' όσον η σχέση μετάδοσης είναι 1:1 τότε η απόσταση των αξόνων των τροχαλιών προκύπτει από τη σχέση^{[5],[32]} (Π1.1) και είναι $C=837\text{mm}$.

$$C = A + \sqrt{A^2 - B}, \text{ όπου}$$

$$A = \frac{L}{4} - 0.3935(D + d),$$

$$B = \frac{(D - d)^2}{8}$$
(Π1.1)

Ευθυγράμμιση Τροχαλιών

Για την ευθυγράμμιση των τροχαλιών χρειάζεται να γνωρίζουμε από πριν κάποια όρια μεγεθών που αναφέρονται σε στοιχεία μιαντοκίνησης και τα οποία έχουν αντληθεί από το [5]. Τα όρια αυτά είναι :

- Μέγιστο Runout αξόνων

0-1800 RPM	127 μm
1800-3600 RPM	76 μm
3600+... RPM	50 μm

- Μέγιστο Face & Rim Runout τροχαλιών : 1/6 μm ανά mm διαμέτρου τροχαλίας.
(Face : στην επιφάνεια της τροχαλίας που είναι κάθετη στον άξονα)

(Rim : στην περιφέρεια της τροχαλίας)

Σημειώνεται ότι, εάν δεν μπορούμε να “φέρουμε” την τροχαλία μέσα στα όρια αυτά, τότε πρέπει να αντικατασταθεί.

- Μέγιστη απόκλιση παραλληλίας τροχαλιών : **11μm ανά mm απόστασης αξόνων των τροχαλιών.**

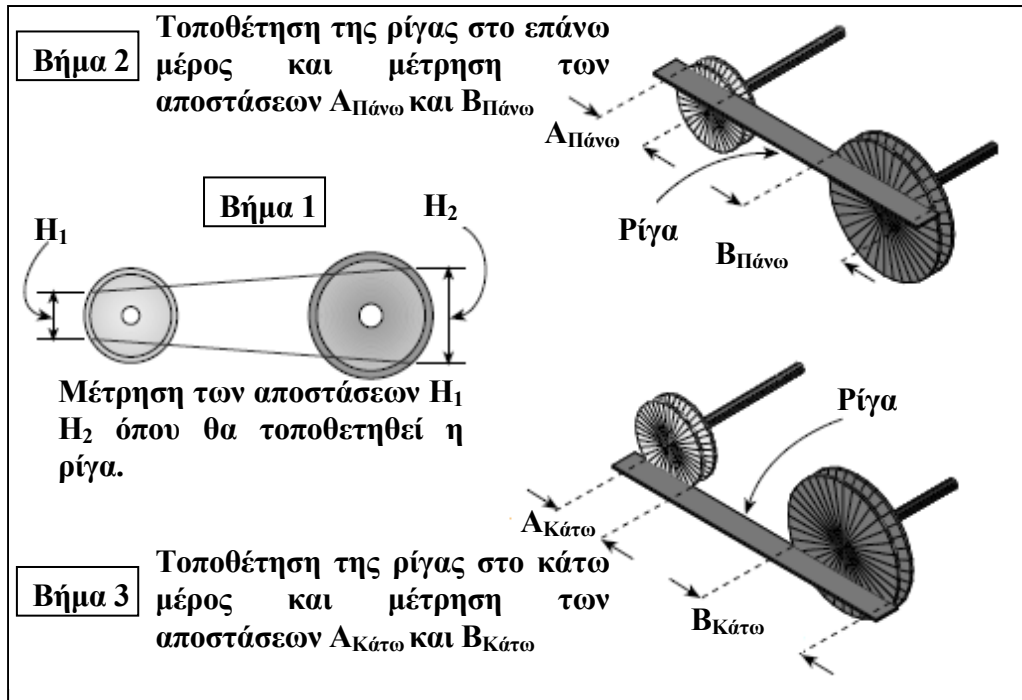
Στην διάταξή μας, το Rim και Face runout των τροχαλιών ήταν αρχικά εκτός ορίων, αλλά με επανατοποθέτηση και προσεκτικότερο σφίξιμο του taper bush, “ήρθαν” στα επιθυμητά όρια.

Το runout των αξόνων είναι 20μm , το οποίο είναι μικρότερου του ορίου των 76μm για τις στροφές ανά λεπτό των αξόνων (έως 3000 RPM).

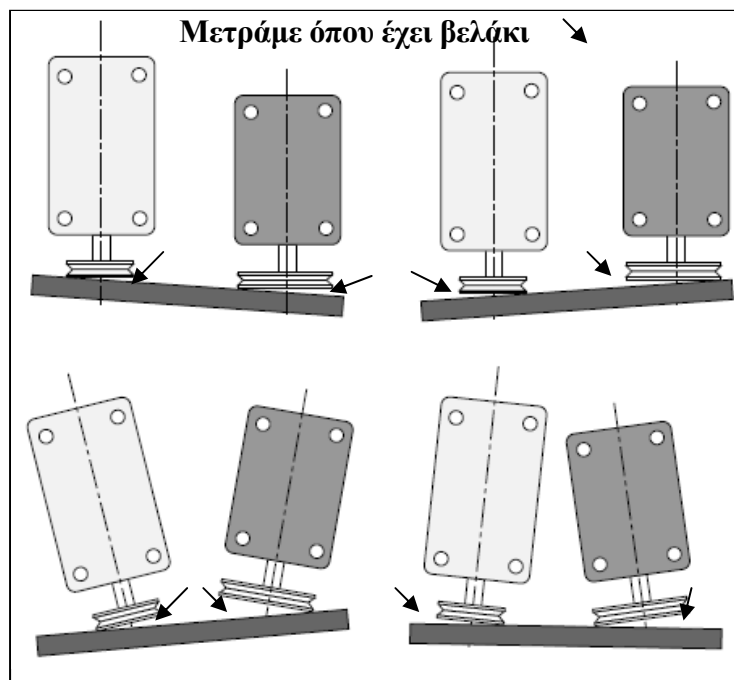
Η μέγιστη απόκλιση παραλληλίας τροχαλιών για τη διάταξή μας με απόσταση αξόνων $C=837\text{mm}$ είναι $837 \times 11 = 9.2\text{mm}$ που είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να μπορεί να είναι και ορατό με το μάτι.

Για τη διαδικασία της ευθυγράμμισης η καλύτερη λύση είναι η χρήση συσκευής λέιζερ ειδικής για ευθυγράμμιση τροχαλιών. Λόγω της απουσίας όμως του οργάνου αυτού από τον εξοπλισμό μας, χρησιμοποιήσαμε κάποια βήματα μιας μεθόδου^[5] που βασίζεται στη χρήση μιας ρίγας, φίλερ και μικρομέτρων. Η μέθοδος αυτή είναι γραφική όπως και η “Invert Indicator Method” που αναλύθηκε παραπάνω. Χρειάζεται τις αποστάσεις των εδράσεων των αξόνων (για τον άξονα του H/K χρειαζόμαστε τις θέσεις των κοχλιών στερέωσής του), την απόσταση του κοχλία στερέωσης από την επιφάνεια της τροχαλίας που τοποθετούμε τη ρίγα, τη διάμετρο των τροχαλιών και την απόσταση των αξόνων τους .

Με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα Π1.18, ακουμπάμε τη μεταλλική ρίγα στις δύο τροχαλίες, μια φορά επάνω και μια κάτω και παίρνουμε με φίλερ ή με μετρητικό ρολόι τις μετρήσεις των δύο διακένων που εμφανίζονται κάθε φορά (βλ. και Σχήμα Π1.19) ανάμεσα στη ρίγα και την επιφάνεια της τροχαλίας. Έτσι, θα πρέπει να έχουμε μετά το πέρας των μετρήσεων τέσσερα νούμερα για τα διάκενα, δύο ανά τροχαλία. Γνωρίζοντας λοιπόν και την πλήρη γεωμετρία της διάταξης που αναφέραμε παραπάνω, μπορούμε μέσω της γραφικής μεθόδου να προβούμε σε διορθωτικές κινήσεις των εδράσεων για την επίτευξη της ευθυγράμμισης.



Σχήμα Π1.18: Χρήση της μεταλλικής ρίγας για την ευθυγράμμιση των τροχαλιών^[5].

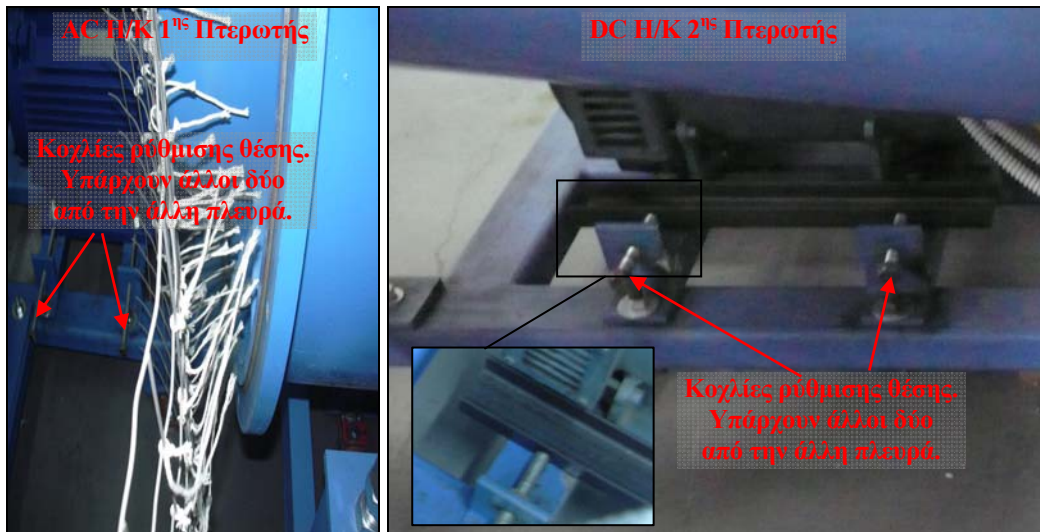


Σχήμα Π1.19: Τέσσερις πιθανές περιπτώσεις επαφής της ρίγας στις τροχαλίες^[5].

Επειδή όμως η μέτρηση των διακένων με μετρητικό ρολόι είναι αμφίβολης ακρίβειας για τα εργαλεία που είχαμε και επειδή τα φίλερ που διαθέταμε είναι ελάχιστου πάχους 50 μm , κάναμε το εξής : Χρησιμοποιήσαμε τη ρίγα με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω και μετρούσαμε όσο μπορούσαμε με το φίλερ τα διάκενα και παράλληλα τροποποιούσαμε τη θέση του Η/Κ μέσω των δύο ανά πλευρά, πλαϊνών κοχλιών

ρύθμισης του (βλ. και Σχήμα Π1.20), μέχρι να “έρθει” και να ακουμπήσει η ρίγα και στις 2 τροχαλίες και στις δύο θέσεις, πάνω και κάτω (βλ. και Σχήμα Π1.21). Επίσης, χρησιμοποιήσαμε και ένα αλφάδι λείζερ με τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα Π1.22, τοποθετώντας το σε διάφορες θέσεις πάνω στην τροχαλία του άξονα της περρωτής και προσπαθώντας να “πιάσουμε” το σημάδι της μεταλλικής γωνιάς, μετακινώντας τον Η/Κ.

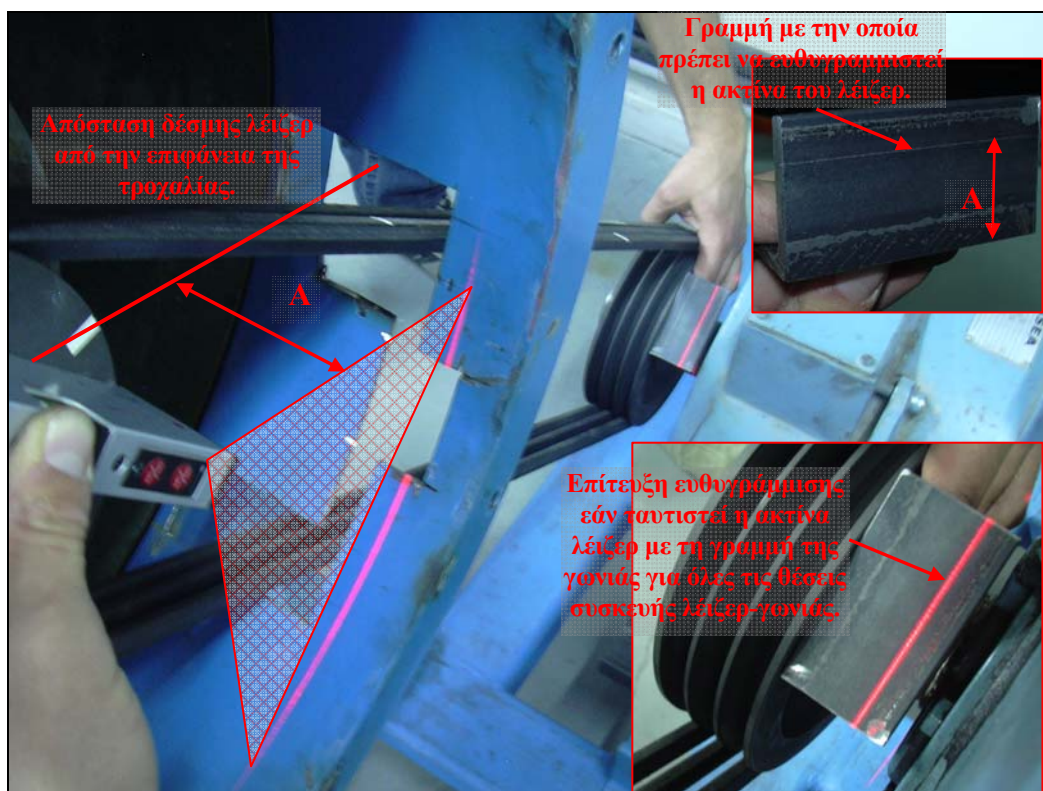
Σίγουρα αυτή η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε (trial & error) δεν είναι η ακριβέστερη, αλλά αν λάβουμε υπ’ όψιν μας ότι το περιθώριο μέγιστης απόκλισης παραλληλίας των τροχαλιών είναι 9mm για την διάταξή μας, τότε με τη μέθοδο αυτή είμαστε σίγουρα κάτω από το όριο αυτό.



Σχήμα Π1.20: Κολλίες ρύθμισης θέσης των Η/Κ για ευθυγράμμιση των τροχαλιών.



Σχήμα Π1.21: Ευθυγράμμιση των τροχαλιών με χρήση της μεταλλικής ρίγας.



Σχήμα Π1.22: Ευθυγράμμιση των τροχαλιών με χρήση του αλφαδιού λέιζερ.

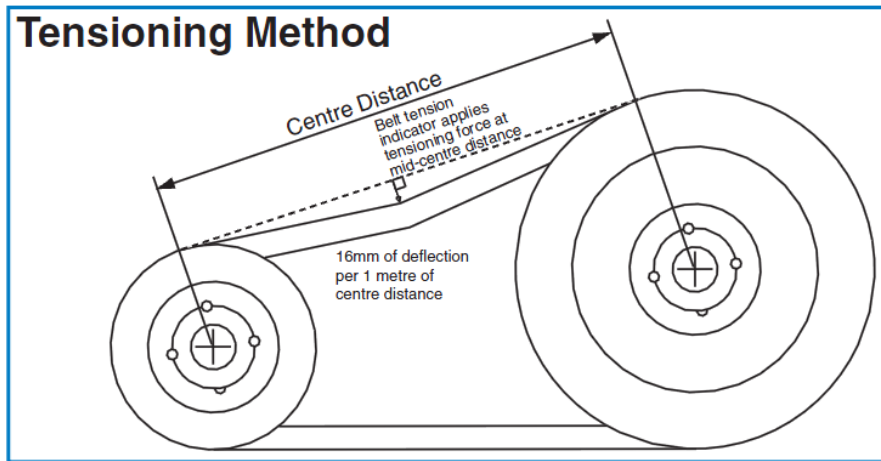
Τάνυση ιμάντων κίνησης

Η τάνυση των ιμάντων γενικά, γίνεται με διάφορους τρόπους όπως, με χρήση τροχαλίας προέντασης, ελεύθερης (με χρήση βαριδιού) ή σταθερής, είτε με απομάκρυνση των αξόνων των τροχαλιών σε απόσταση λίγο μεγαλύτερη από αυτήν που προκύπτει από τη σχέση (Π1.1). Για την απόσταση αυτή υπάρχουν ειδικοί πίνακες και σχέσεις υπολογισμού της (βλ. [22] Δ. Χρονόπουλος, 2010. “Ανάπτυξη λογισμικού εκτίμησης απαραίτητης πληροφορίας για δημιουργία μοντέλων αεριοστροβίλων”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π..

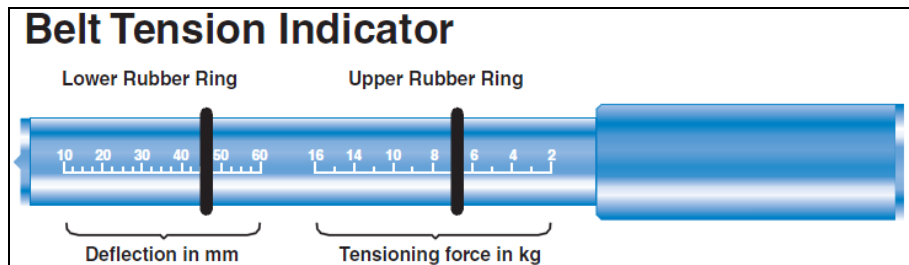
[23]).

Η πιο συνήθης μέθοδος (και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην διάταξή μας) είναι η απομάκρυνση των αξόνων των τροχαλιών σε απόσταση τέτοια, ώστε όταν ασκηθεί μια συγκεκριμένη δύναμη πάνω στον ιμάντα, στο μέσω της απόστασης των αξόνων των τροχαλιών (βλ. Σχήμα Π1.23), τότε θα πρέπει ο ιμάντας να έχει μετατοπιστεί (στον φορέα της δύναμης) κατά 1/64in ανά 1in απόστασης αξόνων των τροχαλιών, ή αλλιώς 16mm ανά 1m απόστασης αξόνων^{[5],[31],[32]}. Έτσι, κάθε εταιρεία κατασκευής ιμάντων δίδει πίνακες για το μέτρο της δύναμης αυτής ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ιμαντοκίνησης (διάμετρος μικρής τροχαλίας και κατηγορία ιμάντα).

Για την εφαρμογή της δύναμης αυτής υπάρχουν ειδικά όργανα που ονομάζονται «μετρητές τάνυσης ιμάντων» («Belt tension gauge/indicator»), τα οποία έχουν ταυτόχρονη ένδειξη της δύναμης και της μετατόπισης (βλ. Σχήμα Π1.24).



Σχήμα Π1.23: Challenge^[32]. Εφαρμογή δύναμης για τάνυση μιάτων.



Σχήμα Π1.24: Challenge^[32]. Μετρητής τάνυσης μιάτων.

Στην διάταξή μας, όπως έχει αναφερθεί, χρησιμοποιούμε μιάνα κατηγορίας SPA και η διάμετρος των τροχαλιών είναι 180mm. Τα στοιχεία αυτά είναι αρκετά, και όπως φαίνεται από τον πίνακα της εταιρείας Fenner (Σχήμα Π1.25), η δύναμη που πρέπει να ασκηθεί είναι 36N, ή αλλιώς 3.7kgf. Η μετατόπιση του μιάνα πρέπει να είναι $\text{deflection} = 16\text{mm} \cdot 837\text{mm} / 1000\text{mm} = 13.4\text{mm}$ όπου $C = 837\text{mm}$ είναι η απόσταση των αξόνων των τροχαλιών.

Για την εφαρμογή της δύναμης αυτής, δεν χρησιμοποιήσαμε μετρητή τάνυσης μιάτων, αλλά ένα απλό κανταράκι και έναν χάρακα (βλ. Σχήμα Π1.26). Σαφώς, δεν έχουμε με τον τρόπο αυτόν την ακρίβεια του μετρητή τάνυσης μιάτων, αλλά δεν είχαμε και άλλον τρόπο, αφού το όργανο αυτό δεν υπήρχε στον εξοπλισμό μας.

Για να ελέγξουμε το κανταράκι, κρεμάσαμε μια μάζα γνωστού βάρους και είδαμε ότι έχει drift 500gr, που σημαίνει ότι η ένδειξη που δείχνει, αντιστοιχεί σε 500gr περισσότερο.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι τους μιάνες του κινητήρα της 2^{ης} περωτής τους τανύσαμε όχι με 3.7kg που είναι το απαιτούμενο, αλλά με 1.5kg, δηλαδή με λιγότερη δύναμη, κι αυτό λόγω της θέσης της τροχαλίας του άξονα της περωτής, η οποία βρίσκεται επάνω σε πρόβολο. Επίσης λόγω της μη στιβαρής σύνδεσης των εδράσεων του άξονα της περωτής με το κέλυφος (σύνδεση με κοχλίες, βλ. [20] για πλήρη σχέδια), το αποτέλεσμα είναι να χαλάει η ευθυγράμμιση του άξονα της περωτής με το κέλυφός της, και παράλληλα να εμφανίζονται υψηλοί κραδασμοί.

Belt Section	Setting force to deflect belt 16 mm per metre of span				
	Small pulley diameter (mm)	Basic setting forces Newtons (N) kilograms (kgf)		1.25 x setting forces Newtons (N) kilograms (kgf)	
SPZ	56 to 71	16	1.6	20	2.0
	75 to 90	18	1.8	22	2.2
	95 to 125	20	2.0	25	2.5
XPZ & QXPZ	over 125	22	2.2	28	2.8
	80 to 100	22	2.2	28	2.8
SPA	106 to 140	30	3.0	38	3.9
	150 to 200	36	3.7	45	4.6
XPA & QXPA	over 200	40	4.0	50	5.1
	112 to 160	40	4.0	50	5.1
SPB	170 to 224	50	5.1	62	6.3
	236 to 355	62	6.3	77	7.9
XPB & QXPB	over 355	65	6.6	81	8.3
	224 to 250	70	7.1	87	8.9
SPC & QXPC	265 to 355	92	9.4	115	12.0
	over 375	115	12.0	144	15.0
8V	335 & above	150	15.0	190	19.0
Z	56 to 100	5 to 7.5	0.5 to 0.8		
A (& HA banded)	80 to 140	10 to 15	1.0 to 1.5		
B	125 to 200	20 to 30	2.0 to 3.1		
C	200 to 400	40 to 60	4.1 to 6.1		
D	355 to 600	70 to 105	7.1 to 10.7		

Σχήμα Π1.25: Fenner^[31]. Πίνακας τιμών για τη δύναμη τάνυσης μάντων κίνησης.



Σχήμα Π1.26: Τάνυση μάντων κίνησης στη διάταξη.

Τέλος, πρέπει να προσέχουμε τα εξής^[5]: 1^{ov}) Η τοποθέτηση των μάντων πρέπει να γίνεται χωρίς δυσκολία και αυτό σημαίνει ότι πριν τη τοποθέτηση πρέπει οι άξονες των τροχαλιών να έχουν απόσταση μικρότερη από αυτή που θα έχουν κατά τη λειτουργία, 2^{ov}) Η πρώτη ευθυγράμμιση των τροχαλιών πρέπει να γίνεται πριν την τοποθέτηση των μάντων (σε απόσταση αξόνων σύμφωνα με την προηγούμενη προτροπή) και επανευθυγραμμίζουμε αφού τανύσουμε τους μάντες, 3^{ov}) Πρέπει να ξαναγίνει τάνυση των καινούριων μάντων μετά το πρώτο 24ωρο λειτουργίας.

Π1.3 Ροπή προέντασης βασικών κοχλιοσυνδέσεων.

Οι βασικές κοχλιοσυνδέσεις τις οποίες θα αναλύσουμε, είναι αυτές που υπάρχουν επάνω σε περιστρεφόμενα μέρη της διάταξης και για το λόγο αυτό χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή για την εξασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας. Παράλληλα, οι παραπάνω, είναι αυτές στις οποίες επεμβαίνουμε περισσότερο για να τροποποιήσουμε τις επιδόσεις του συμπιεστή και της διάταξης συνολικά.

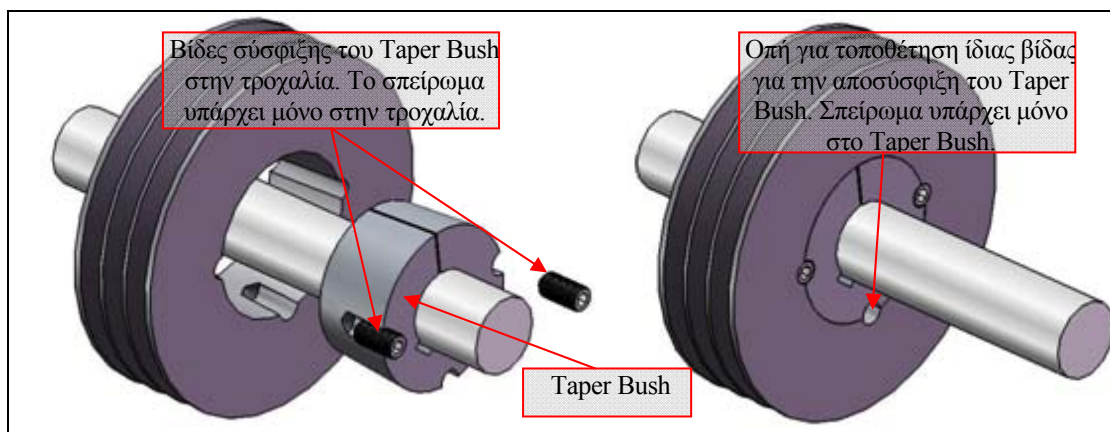
Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η σωστή ροπή προέντασής (σύσφιξης) τους, η οποία είναι καθοριστικός παράγοντας για την αποφυγή λυσίματος της κοχλιοσύνδεσης ή θραύσης του κοχλία ή του σπειρώματος.

Οι περιστρεφόμενες συνιστώσες της διάταξης που φέρουν κοχλιοσυνδέσεις, είναι τα δύο ζεύγη τροχαλιών των μάντων, ο ελαστικός σύνδεσμος (flex coupling) και οι δίσκοι των περωτών. Στις συνιστώσες αυτές οι κοχλιοσυνδέσεις υπάρχουν στα taper bush (κωνικοί δακτύλιοι στερέωσης) και στους διπλούς κωνικούς σφικτήρες, και εξασφαλίζουν την σύσφιξή τους με την άτρακτο για την μεταφορά της στρεπτικής ροπής. Η ροπή σύσφιξης των κοχλιοσυνδέσεων αυτών των τυποποιημένων εξαρτημάτων είναι γνωστές και δίνονται σε τεχνικούς καταλόγους από τον κατασκευαστή.

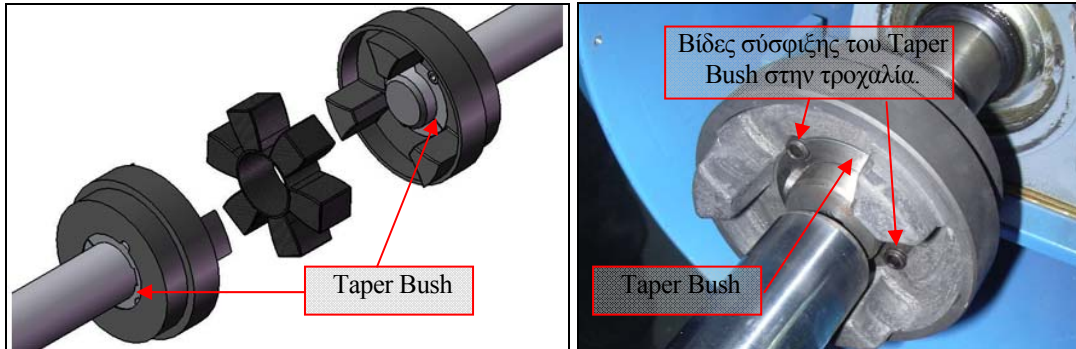
Επίσης, στους δίσκους των περωτών έχουμε κοχλιοσυνδέσεις για τη συγκράτηση των περυγίων. Επειδή όμως δεν πρόκειται για κάποιο τυποποιημένο εξάρτημα, η ροπή σύσφιξης τους υπολογίζεται στο παρόν παράρτημα.

Κοχλιοσυνδέσεις στα taper bush των Τροχαλιών και του Ελαστικού Σύνδεσμου

Στις τροχαλίες και στον ελαστικό σύνδεσμο χρησιμοποιούμε Taper Bush μεγέθους 2517 και 1610, αντίστοιχα. Τα Taper Bush είναι τυποποιημένα και τα μεγέθη αυτά αναφέρονται σε ίδια χαρακτηριστικά ανεξαρτήτως κατασκευαστή. Στο Σχήμα Π1.27 φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης του Taper Bush στις τροχαλίες και στο Σχήμα Π1.28 και Σχήμα Π1.29 φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης στον ελαστικό σύνδεσμο.



Σχήμα Π1.27: Taper Bush των τροχαλιών^[20].



Σχήμα Π1.28^[20]: Ελαστικός σύνδεσμος ατράκτων 1^{ης} πτερωτής. Διακρίνονται τα Taper Bush. Σχήμα Π1.29: Το Taper Bush του ελαστικού συνδέσμου. Βίδες σύσφιξης του Taper Bush στην τροχαλία.

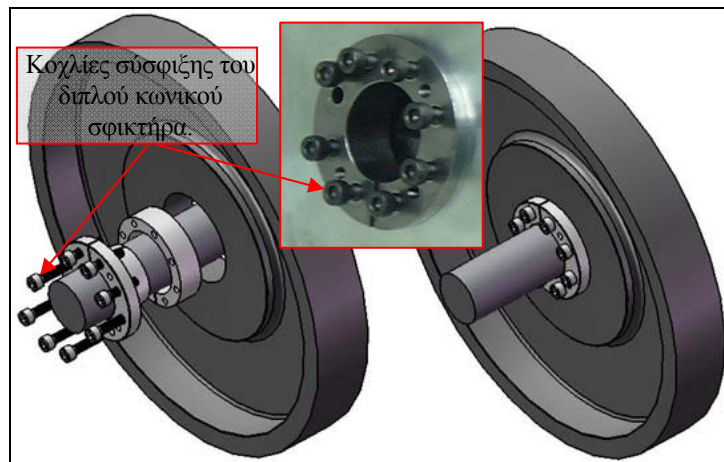
Από τον κατάλογο της εταιρείας Challenge^[32] (Σχήμα Π1.30) διακρίνουμε την απαιτούμενη ροπή σύσφιξης των βιδών των Taper Bush. Όπως φαίνεται λοιπόν, η ροπή σύσφιξης των Taper Bush των τροχαλιών ανέρχεται στα $T=50\text{Nm}$ και του ελαστικού συνδέσμου στα $T=20\text{Nm}$.

1008 to 3030			3525 to 5050		
Bush Size	Screws	Tightening Torque (Nm)	Bush Size	Screws	Tightening Torque (Nm)
1008	1/4" Set Screws	6	2012	7/16" Set Screws	30
1108	3/8" Set Screws	20	2517	1/2" Set Screws	50
1210	3/8" Set Screws	20	2525	1/2" Set Screws	50
1215	3/8" Set Screws	20	3020	5/8" Set Screws	90
1310	3/8" Set Screws	20	3030	5/8" Set Screws	90
1610	3/8" Set Screws	20	3525	1/2" Cap Screws	105
1615	3/8" Set Screws	20	3535	1/2" Cap Screws	105
			4030	5/8" Cap Screws	170
			4040	5/8" Cap Screws	170
			4535	3/4" Cap Screws	190
			4545	3/4" Cap Screws	190
			5040	7/8" Cap Screws	270
			5050	7/8" Cap Screws	270


Σχήμα Π1.30: Challenge^[32]. Ροπή σύσφιξης των βιδών των Taper Bush των τροχαλιών και του ελαστικού συνδέσμου.

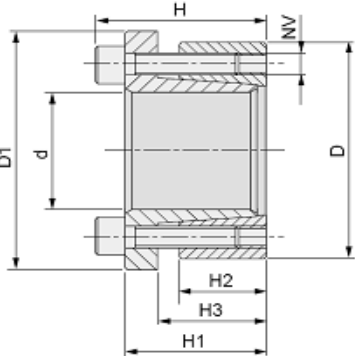

Κοχλιοσυνδέσεις στους διπλούς κωνικούς σφικτήρες των Δίσκων των Πτερωτών

Για την σύσφιξη των δίσκων επάνω στις ατράκτους, χρησιμοποιούμε διπλούς κωνικούς σφικτήρες (βλ. Σχήμα Π1.31) της εταιρείας Sati^[33]. Όπως φαίνεται από τον τεχνικό κατάλογο της εταιρείας (Σχήμα Π1.32), η ροπή σύσφιξης των κοχλιών ανέρχεται στα $T=17\text{Nm}$.



Σχήμα Π1.31: Ο διπλός κωνικός σφικτήρας (M-Locking) της εταιρίας Sati^[33] για την σύσφιξη των δίσκων στις ατράκτους (το σχέδιο CAD από το [20]).

Serie / Series / Serie / Série / Serie KLAB 

Nostro codice Our code Unser Kode Notre code Nuestro código	Dimensioni / Dimensions / Dimensions Abmessungen / Dimensiones							Serraggio / Blocking power Force de blocage / Befestigungskraft Fuerza de bloqueo			Sbloccaggio / Unblocking Deblocage / Freigabe Desbloqueo		Coppie trasmissibili / Torque Couple / Drehmoment / Par			
	d	D	D1	H	H1	H2	H3	NV	Tv (Nm)	N° Viti / Screws / Vis Schraubenanzahl/ Tornillos	NV	N° Viti / Screws / Vis Schraubenanzahl/ Tornillos	Mt (Nm)	Pa (N/mm ²)	Ta (kN)	Pm (N/mm ²)
KLAB019	19	47	56	34	28	17	22	M6	17	5	M6	3	274	215	28	93
KLAB020	20	47	56	34	28	17	22	M6	17	5	M6	3	284	215	32	93
KLAB022	22	47	56	34	28	17	22	M6	17	5	M6	3	314	196	32	93
KLAB024	24	50	59	34	28	17	22	M6	17	6	M6	3	401	215	32	107
KLAB025	25	50	59	34	28	17	22	M6	17	6	M6	3	441	210	34	107
KLAB028	28	55	64	34	28	17	22	M6	17	6	M6	3	490	196	34	98
KLAB030	30	55	64	34	28	17	22	M6	17	6	M6	3	529	186	34	98
KLAB032	32	60	69	34	28	17	22	M6	17	8	M6	4	755	210	48	112
KLAB035	35	60	69	34	28	17	22	M6	17	8	M6	4	824	186	46	107
KLAB038	38	65	74	34	28	17	22	M6	17	8	M6	4	892	191	46	112
KLAB040	40	65	74	34	28	17	22	M6	17	8	M6	4	941	186	46	102
KLAB045	45	75	84	41	33	20	25	M8	41	7	M8	3	1716	225	64	132
KLAB050	50	80	84	41	33	20	25	M8	41	7	M8	3	1893	205	85	127
KLAB055	55	85	94	41	33	20	25	M8	41	8	M8	4	2403	210	85	132
KLAB060	60	90	99	41	33	20	25	M8	41	8	M8	4	2648	186	85	122
KLAB065	65	95	104	41	33	20	25	M8	41	9	M8	3	3188	196	85	132

Σχήμα Π1.32: Sati^[33]. Ροπή σύσφιξης των κοχλιών του διπλού κωνικού σφικτήρα (M-Locking) των δίσκων.

Κοχλιοσυνδέσεις των Πτερυγίων

Για την σύσφιξη των πτερυγίων επάνω στους δίσκους τα στοιχεία που πρέπει να γνωρίζουμε ώστε να εφαρμόσουμε σωστή ροπή σύσφιξης είναι τα εξής : 1^{ov}) Τον τύπο, το υλικό και την κατηγορία των κοχλιών, 2^{ov}) Τον τύπο, το υλικό και την κατηγορία του περικοχλίου, 3^{ov}) Το υλικό των δίσκων, 4^{ov}) Το νούμερο και την κλάση του σπειρώματος των κοχλιών-περικοχλίων, 5^{ov}) Το φορτίο λειτουργίας των κοχλιών.

1. Υλικά εξαρτημάτων

Τα χαρακτηριστικά του υλικού που χρειάζονται για τον υπολογισμό της ροπής σύσφιξης είναι το όριο ελαστικότητας 0.2% ή αλλιώς τάση διαρροής (S_Y : Yield Strength), η μέγιστη τάση εφελκυσμού (S_U ή αλλιώς UTS: Ultimate Tensile Strength), το όριο πλήρους ελαστικότητας (S_P : Proof Strength) το οποίο είναι μικρότερο από το S_Y και δίνεται από τον κατασκευαστή ο οποίος το προσδιορίζει πειραματικά για συγκεκριμένο πάντα αντικείμενο, και μέγιστη τάση διάτμησης (S_S : Shear Strength). Σε περίπτωση που δεν έχουμε στοιχεία για το S_P μπορούμε προσεγγιστικά να το υπολογίσουμε από τη σχέση^[6] $S_P=0.85 \cdot S_Y$. Σε περίπτωση που δεν έχουμε στοιχεία για το S_S μπορούμε προσεγγιστικά να το υπολογίσουμε από τη σχέση^{[7],[10],[11],[24]} $S_S=0.55 \pm 0.6 \cdot S_U$ που ισχύει για χαλύβδινους κοχλίες.

Το υλικό των κοχλιών των πτερυγίων είναι ίδιο με το υλικό των πτερυγίων. Τα πτερύγια προέρχονται από τους στάτορες της 3^{ης} βαθμίδας του κινητήρα J79. Από τεχνικά εγχειρίδια του κινητήρα και από το [8], διαπιστώσαμε ότι το υλικό των πτερυγίων είναι ανοξείδωτο ατσάλι κατηγορίας 403 (**STS 403**). Οι μηχανικές ιδιότητες του εξαρτώνται από τη θερμική κατεργασία που έχει υποστεί το μέταλλο. Η διαδικτυακή εταιρεία MatWeb^[34] δίνει τις μηχανικές ιδιότητες για δύο περιπτώσεις θερμικής κατεργασίας για το μέταλλο αυτό, το οποίο έχει μεγαλύτερο όριο ελαστικότητας αν έχει γίνει κλιμακωτή βαφή και επαναφορά (Tempering), αντί για ανόπτηση (Annealing). Επειδή λοιπόν δεν γνωρίζαμε τη θερμική κατεργασία που έχει υποστεί το υλικό, επιλέξαμε για τους υπολογισμούς τις πιο αδύναμες μηχανικές ιδιότητες για λόγους ασφαλείας.

Για το υλικό των περικοχλίων συμβουλευτήκαμε τους καταλόγους τυποποιημένων κοχλιοσυνδέσεων της εταιρίας AmericanFastener^[35] και το εγχειρίδιο κοχλιοσυνδέσεων της NASA^[9] στους οποίους για περικόχλιο χωρίς σημάδι κατηγορίας (No Grade Mark), το υλικό είναι ατσάλι (carbon steel) και υπάρχει στις κατηγορίες Grade 0, A και B σύμφωνα με την τυποποίηση ASTM A563. Επιλέξαμε την κατηγορία **Grade 0** με τις πιο αδύναμες μηχανικές ιδιότητες για λόγους ασφαλείας.

Οι δίσκοι των πτερυγίων είναι από κράμα αλουμινίου Al 7075 υπό μορφή πλάκας **Alumold 1**.

Στον παρακάτω πίνακα Πίνακας Π1.1 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών των κοχλιών των πτερυγίων, των περικοχλίων και των δίσκων.

Αντικείμενο	Υλικό	S_P (MPa)	S_Y (MPa)	S_U (MPa)	S_S (MPa)	E (GPa)
Δίσκοι	Al 7075	450	530	580	336	71.7
Πτερύγια	STS 403	234	275	515	299	200
Περικόχλια	Carbon Steel	475	558	-	-	-

Πίνακας Π1.1: Υλικό δίσκων, πτερυγίων και περικοχλίων.

2. Σπειρώματα κοχλίων – περικοχλίων

Τα πτερύγια της 1^{ης} πτερωτής (μικρή βάση πτερυγίων) έχουν σπείρωμα στον κοχλία τους με ονομαστική διάμετρο $d=1/4"$ (inches) και κατηγορία UNF (UNified Fine thread) κατά το αμερικάνικο σύστημα ANSI. Αυτό σύμφωνα με πίνακες τυποποιημένων σπειρωμάτων που αντλήσαμε από το [6], σημαίνει ότι έχουν $n=28$ σπείρες/in, δηλαδή το βήμα είναι $P=1/28$ in. Αντίστοιχα, τα πτερύγια της 2^{ης} πτερωτής έχουν $d=5/16"$ (inches), UNF, $n=24$ σπείρες/in, $P=1/24$ in. Οι γωνία παρειάς των σπειρωμάτων είναι $\alpha=60^\circ$.

Η ποιότητα ή αλλιώς η κλάση των σπειρωμάτων των κοχλίων στο ANSI υπάρχει σε τρεις βαθμίδες : class 1A, 2A, 3A ανάλογα με τις κατασκευαστικές ανοχές. Για τα περικόχλια οι κλάσεις είναι αντίστοιχα 1B, 2B, 3B. Πρακτικά, ένα ζεύγος κοχλία περικοχλίου κλάσεων 1A και 1B αντίστοιχα, έχει πιο χαλαρή συναρμογή σε αντίθεση με ένα ζεύγος κλάσεων 3A και 3B που έχει πιο σφιχτή συναρμογή. Στην εφαρμογή μας, επειδή δεν γνωρίζουμε από τον κατασκευαστή τις κλάσεις για τις δικές μας κοχλιοσυνδέσεις, επιλέξαμε για τους υπολογισμούς την κλάση 2A για τους κοχλίες και 2B για τα περικόχλια, μια μεσαία κλάση δηλαδή.

Για την ανάλυση μας χρειαζόμαστε επίσης και κάποια επιπλέον γεωμετρικά μεγέθη των σπειρωμάτων που είναι τα εξής : $d_2=d_p$: μέση (pitch) διάμετρος, $d_3=d_m$: ελάχιστη διάμετρος (διάμετρος πυρήνα), $D_{m_{Nmax}}$: maximum ελάχιστη διάμετρος περικοχλίου (NUT), $D_{p_{Nmax}}$: maximum μέση (pitch) διάμετρος περικοχλίου (NUT), $D_{p_{Bmin}}$: minimum μέση (pitch) διάμετρος κοχλία (BOLT), D_{Bmin} : minimum ονομαστική διάμετρος κοχλία (BOLT). Τα μεγέθη αυτά τα αντλήσαμε από πίνακες στο [6]. Επίσης, για κλάσεις σπειρωμάτων 2A ισχύει : $d_p=d-0.6768 \cdot P$ και $d_m=d-1.2208 \cdot P$ σε ίντσες.

Τα περικόχλια που χρησιμοποιούμε είναι HEX NUTS κατά το ANSI και οι δύο χαρακτηριστικές διαστάσεις τους είναι το ύψος (H) και η απόσταση των πλευρών του εξαγώνου (F) η οποία είναι και η μέγιστη διάμετρος (b) της πατούρας του περικοχλίου. Οι διαστάσεις αυτές και όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά μεγέθη για τα σπειρώματα των κοχλίων και των περικοχλίων που χρησιμοποιούμε, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π1.2).

d(in)	n(σπ./in)	P(in)	H(in)	F(in)	d_m (in)	d_p (in)	$D_{m_{Nmax}}$ (in)	$D_{p_{Nmax}}$ (in)	$D_{p_{Bmin}}$ (in)	D_{Bmin} (in)	$\alpha(^\circ)$
1/4	28	1/28	7/32	7/16	0.2064	0.2258	0.2200	0.2311	0.2243	0.2435	60
5/16	24	1/24	17/64	1/2	0.2618	0.2843	0.2770	0.2902	0.2806	0.3042	60

Πίνακας Π1.2: Γεωμετρικά μεγέθη σπειρωμάτων κοχλίων και περικοχλίων.

3. Φορτίο λειτουργίας

Το φορτίο λειτουργίας των κοχλιοσυνδέσεων προκαλεί κατά κύριο λόγο η **φυγόκεντρος δύναμη** λόγω του βάρους των πτερυγίων. Λιγότερο σημαντική είναι και η **αεροδυναμική φόρτιση** των πτερυγίων η οποία προκαλεί καμπτική ροπή στο πόδι του πτερυγίου, και μια έκκεντρη εφελκυστική δύναμη στον κοχλία η οποία μας ενδιαφέρει στην ανάλυσή μας, και θα την προσεγγίσουμε, περισσότερο για λόγους πληρότητας και εποπτείας της τάξης μεγέθους της.

Τα δεδομένα για τον **υπολογισμό της φυγοκέντρου** (σχέση (Π1.2)) είναι : Η μάζα m των πτερυγίων, η ακτίνα R_m κέντρου μάζας τους και οι στροφές ανά λεπτό N των πτερωτών. Μας ενδιαφέρει για τον υπολογισμό η μέγιστη φυγόκεντρος που προκύπτει στις μέγιστες στροφές, οι οποίες και για τις δύο πτερωτές είναι 3000RPM. Η μάζα των πτερυγίων είναι κυμαινόμενη, άρα επιλέγουμε το βαρύτερο πτερύγιο. Σαν κέντρο μάζας θα επιλέξουμε προσεγγιστικά το μέσο του καναλιού ροής, χωρίς να αποκλίνουμε πολύ από την πραγματικότητα με αυτήν τη θεώρηση.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π1.3) παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη για τον υπολογισμό της φυγοκέντρου δύναμης, καθώς και το μέγεθος της δύναμης αυτής για κάθε πτερωτή.

$$F_c = m\omega^2 R, \text{ όπου } \omega = \frac{\pi N}{30}, N : RPM \quad (\text{Π1.2})$$

Πτερύγιο	Max μάζα m(g)	Ακτίνα Κ.Β. R_m (mm)	Max σ.α.λ. N(RPM)	Max Φυγόκεντρος δύναμη F_c (N)
1 ^{ης} Πτερωτής	97	212.5	3000	2035
1 ^{ης} Πτερωτής	120	212.5	3000	2517

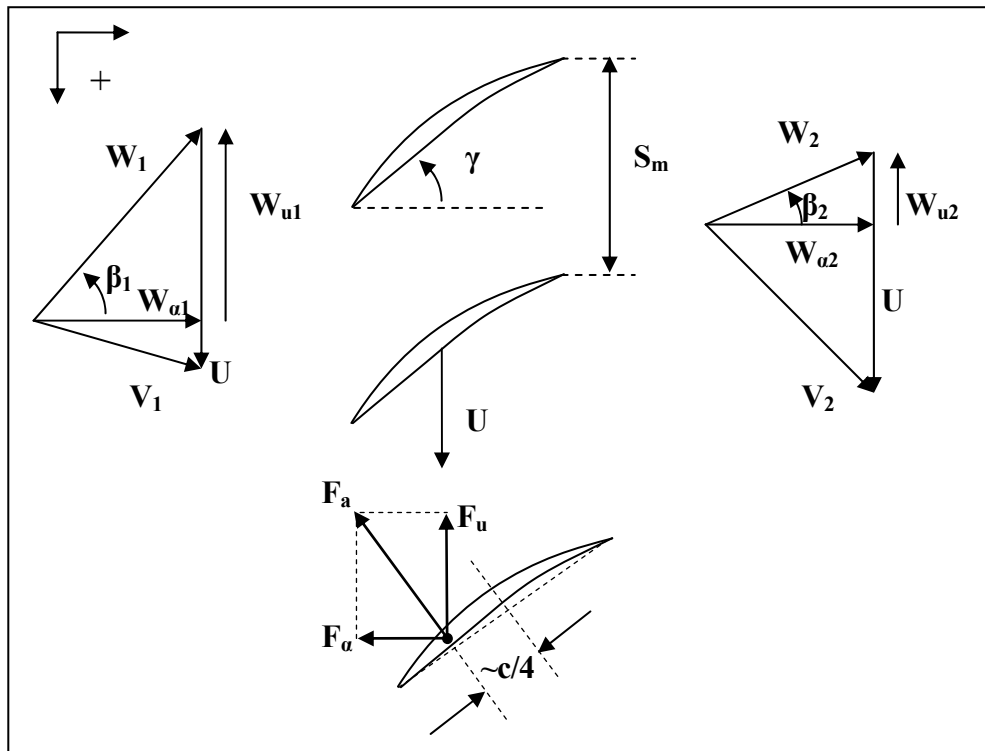
Πίνακας Π1.3: Δεδομένα διάταξης για τον υπολογισμό της φυγοκέντρου δύναμης.

Για τον υπολογισμό της **αεροδυναμικής φόρτισης** θα κάνουμε χρήση των σχέσεων^[15] (Π1.3) που δίδουν την αξονική (F_a) και περιφερειακή (F_u) συνιστώσα της δύναμης επί των πτερυγίων, στη μέση ακτίνα R_m . Η συνιστάμενη δύναμη (F_a) των δυνάμεων αυτών είναι αυτή που μας ενδιαφέρει, αφού αυτή προκαλεί την κάμψη των πτερυγίων και την εφελκυστική δύναμη στους κοχλίες τους.

Βέβαια, το σημείο εφαρμογής της δύναμης αυτής βρίσκεται επάνω στο κέντρο πίεσης της χορδής το οποίο απέχει περίπου $c/4$ από το κέντρο της χορδής (άρα και από τον άξονα συμμετρίας του πτερυγίου), με αποτέλεσμα να δημιουργεί η δύναμη αυτή και μια ροπή στρέψης στον άξονα του πτερυγίου, η οποία τείνει να περιστρέψει στον κοχλία και να στρεβλώσει το πτερύγιο. Όμως δεν θα ασχοληθούμε καθόλου με αυτό το φαινόμενο λόγω του πολύ μικρού μεγέθους της ροπής αυτής.

$$\begin{aligned}
 F_a &= \dot{m}_s (W_{\alpha 1} - W_{\alpha 2}) + S_m (\Delta n) (P_1 - P_2) \\
 F_u &= \dot{m}_s (W_{u1} - W_{u2}) \\
 F_a &= \sqrt{F_{\alpha}^2 + F_u^2}
 \end{aligned}
 \tag{Π1.3}$$

Στις σχέσεις (Π1.3) το \dot{m}_s (kg/s) είναι η παροχή μάζας που περνά ανάμεσα από δύο πτερύγια, άρα εάν η συνολική παροχή μάζας είναι \dot{m} και z ο αριθμός πτερυγίων, τότε $\dot{m}_s = \dot{m}/z$. Το S_m (m) $=2\pi R_m/z$ είναι το βήμα της πτερύγωσης στην μέση ακτίνα R_m , το (Δn) (m) είναι το ύψος του καναλιού ροής. Τα $W_{\alpha 1}$ και $W_{\alpha 2}$ είναι οι αξονικές συνιστώσες της σχετικής ταχύτητας στη μέση ακτίνα, ανάντι και κατάντι της πτερύγωσης αντίστοιχα. Τα W_{u1} και W_{u2} είναι οι περιφερειακές συνιστώσες της σχετικής ταχύτητας στη μέση ακτίνα, ανάντι και κατάντι της πτερύγωσης αντίστοιχα. Τα P_1 και P_2 είναι οι στατικές πιέσεις στη μέση ακτίνα, ανάντι και κατάντι της πτερύγωσης αντίστοιχα. Στις σχέσεις αυτές τα μεγέθη μπαίνουν προσημασμένα. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα Π1.33) φαίνονται τα παραπάνω μεγέθη και οι θετικές φορές των μεγεθών.



Σχήμα Π1.33: Τρίγωνα ταχυτήτων και δυνάμεις επί των πτερυγίων.

Στην πραγματικότητα το \dot{m}_s είναι η παροχή που περνά από ένα δακτύλιο ροής ύψους (Δn) , κατά το ύψος του οποίου η ταχύτητα είναι σταθερή. Κάνουμε όμως την παραδοχή ότι η ταχύτητα είναι σταθερή καθ' όλο το ύψος (Δn) του καναλιού.

Για να βρούμε τις τιμές των μεγεθών της σχέσης (Π1.3), τρέξαμε τον κώδικα BLADE με δεδομένα εισόδου τέτοια, που αντιστοιχούν σε λειτουργία των βαθμίδων με τη μέγιστη φόρτιση των πτερυγίων. Αυτό πρακτικά σημαίνει μέγιστες σ.α.λ. (3000) και

ελάχιστες γωνίες κλίσης (stagger) πτερυγίων που χρησιμοποιούμε στα πειράματα. Μάλιστα, για το ζεύγος στροφών αυτών επιλέξαμε το σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στον μέγιστο λόγο πίεσης, δηλαδή λίγο πριν αρχίσει η αποκόλληση της ροής. Στο σ.λ. αυτό, η φόρτιση των πτερυγίων (οι δυνάμεις που προκύπτουν) είναι μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο σ.λ. επειδή : 1^{ov}) Η F_a είναι μεγαλύτερη, αφού πάντα $W_{a1} \approx W_{a2}$ και το ΔP_{12} στο σ.λ. αυτό είναι μεγαλύτερο, 2^{ov}) Η ΔW_{u12} είναι ανάλογη της μεταβολής της ενθαλπίας, η οποία είναι μεγαλύτερη στο σ.λ. μέγιστου λόγου πίεσης. Βέβαια, η παροχή είναι μικρότερη αλλά η αύξηση της ολικής ενθαλπίας έχει ισχυρότερο ρόλο στη σχέση.

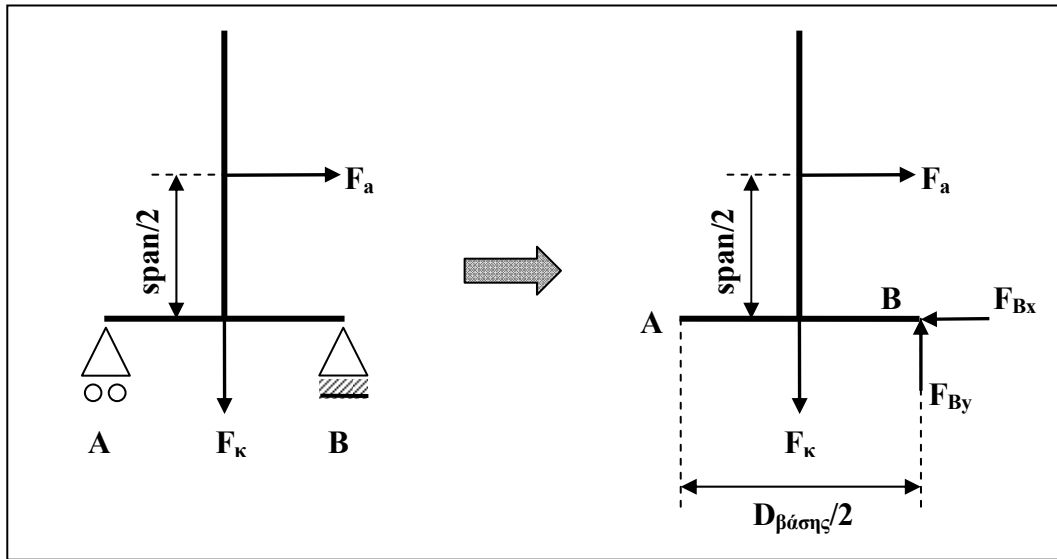
Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας Π1.4) παρουσιάζονται οι τιμές των μεγεθών που περιγράψαμε, και τέλος οι τιμές των δυνάμεων και για τις δύο πτερυγώσεις.

Γεωμετρία στην μέση ακτίνα R_m		Μεγέθη ροής στην R_m 1st Rotor		Μεγέθη ροής στην R_m 2nd Rotor	
Z: Αρ. Πτερυγίων	34.00	W_1 (m/s)	89.9	W_{22} (m/s)	122.6
		W_{21} (m/s)	64.7	W_3 (m/s)	75
Βήμα S_m (mm) $S_m=2\pi/ZR_m$ Z: Αρ. Πτερυγίων	39.27	β_1 (deg)	-48	β_2 (deg)	-61
		β_{21} (deg)	-23.8	β_3 (deg)	-40.4
Mean Radius R_m (mm)	212.5	W_{a1} (m/s)	60.15	W_{a22} (m/s)	59.43
1st Rotor RPM	3000	W_{a21} (m/s)	59.19	W_{a3} (m/s)	57.11
2nd Rotor RPM	3000	W_{u1} (m/s)	-66.80	W_{u22} (m/s)	-107.22
Mass flow m (kg/sec)	11.36	W_{u21} (m/s)	-26.10	W_{u3} (m/s)	-48.60
1st Rotor stagger γ (deg)	30	P_1 (Pa)	96587	P_2 (Pa)	98756
2nd Rotor stagger γ (deg)	43	P_2 (Pa)	98756	P_3 (Pa)	103990
Δυνάμεις		1^η Πτερωτή		2^η Πτερωτή	
F_a (N)		-10.3		-24	
F_u (N)		-13.6		-19.6	
F_a (N)		17.1		31.6	

Πίνακας Π1.4: Δεδομένα σημείου λειτουργίας διάταξης για τον υπολογισμό της δύναμης επί των πτερυγίων.

Για να υπολογίσουμε την εφελκυστική δύναμη που προκαλεί στον κοχλία η F_a , κάνουμε την εξής θεώρηση : Παριστάνουμε το πτερύγιο με τη βάση του, όπως στο Σχήμα Π1.34 στο οποίο έχουμε δύο εδράσεις A και B και αναζητούμε την κατακόρυφη δύναμη F_k που πρέπει να ασκηθεί στον άξονα του πτερυγίου, ώστε οριακά, να μην εκτραπεί το πτερύγιο. Η έδραση A είναι ελεύθερη και τη B τη θεωρούμε άρθρωση. Στην εκτροπή λοιπόν δεν έχουμε καμία δύναμη να ασκείται στην έδραση A. Έτσι, με τις εξισώσεις ισορροπίας μπορούμε να βρούμε τη δύναμη F_k . Η δύναμη αυτή είναι ουσιαστικά η δύναμη που ασκεί ο κοχλίας, άρα και σε αυτόν ασκείται μια αντίθετη, που τον εφελκύνει. Έτσι λοιπόν, από την ισορροπία ροπών ως προς την έδραση B, έχουμε :

$$\boxed{\Sigma M_B = 0} \Rightarrow F_{\kappa} \frac{D_{\beta\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}}{2} = F_a \frac{span}{2} \Rightarrow \boxed{F_{\kappa} = F_a \frac{span}{D_{\beta\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}}}$$



Σχήμα Π1.34: Απλοποιημένη θεώρηση δυνάμεων επάνω στα πτερύγια για τον υπολογισμό της εφελκυστικής δύναμης F_{κ} που προκαλεί η αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων στον κοχλία τους.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π1.5) παρουσιάζονται οι διαστάσεις των βάσεων και του ύψους των πτερυγίων καθώς και οι εφελκυστικές δυνάμεις F_{κ} . Παρατηρούμε λοιπόν, πως η αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων (δύναμη F_{κ}) είναι περίπου το 5% της φυγοκέντρου δύναμης για κάθε πτερωτή. Έτσι, **το μέγιστο φορτίο λειτουργίας είναι $F_{\lambda} = F_a + F_{\kappa} = 2153\text{N}$ για την 1^η πτερωτή και $F_{\lambda} = 2682\text{N}$ για τη 2^η πτερωτή.**

Πτερωτή	$D_{\beta\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}$ (mm)	Ύψος πτερυγίου (span)	Δύναμη F_{κ} (N)
1 ^η Πτερωτή	18	125	118.6
2 ^η Πτερωτή	24	125	165

Πίνακας Π1.5: Η εφελκυστική δύναμη F_{κ} που προκαλεί η αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων στον κοχλία τους.

4. Δύναμη προέντασης κοχλιών – Ροπή σύσφιξη κοχλιοσυνδέσεων

Κατά τη σύσφιξη της κοχλιοσύνδεσης επιθυμούμε να εφαρμόσουμε στον κοχλία μια δύναμη προέντασης τέτοια, ώστε από την μία, να έχουμε μια ικανή σύνδεση των στοιχείων χωρίς να λυθεί η κοχλιοσύνδεση κατά τη λειτουργία, και από άλλη, η δύναμη αυτή της προέντασης μαζί με το φορτίο λειτουργίας να μην υπερβεί την αντοχή του κοχλία σε εφελκυσμό, ούτε την αντοχή του σώματος (δίσκος πτερυγίων) σε θλίψη, αλλά ούτε και την αντοχή των σπειρωμάτων του κοχλία και του περικοχλίου σε διάτμηση.

Σύμφωνα με το [6] η δύναμη προέντασης F_π του κοχλία για μη μόνιμες κοχλιοσυνδέσεις, δίνεται από την σχέση $F_\pi=0.75 \cdot S_P \cdot A_t$, όπου A_t είναι η επιφάνεια της διατομής καταπονήσεως του σπειρώματος του κοχλία κατά τον εφελκυσμό και ορίζεται από τη σχέση (Π1.4). Σε περίπτωση που η κοχλιοσύνδεση θα είναι μόνιμη, προτείνεται η σχέση $F_\pi=0.9 \cdot S_P \cdot A_t$. Οι σχέσεις αυτές ενδείκνυται σε εφαρμογές που δεν έχουμε φορτίο λειτουργίας. Έτσι, στην περίπτωση μας δεν θα βασισθούμε σε αυτές.

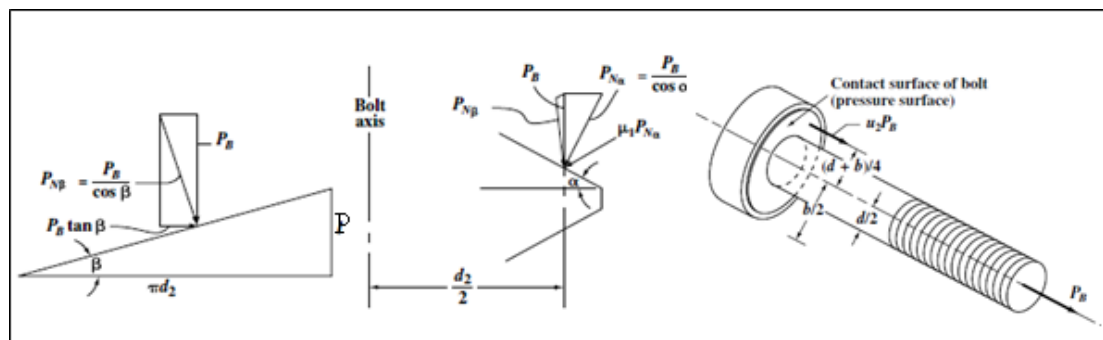
$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_m + d_p}{2} \right)^2, \quad d_3 = d_m: \text{Minor thread diameter,} \quad (\text{Π1.4})$$

$$d_2 = d_p: \text{Pitch(mean) Diameter}$$

Για να εφαρμοστεί στον κοχλία η δύναμη προέντασης, πρέπει να ασκηθεί μια ροπή σύσφιξης στο περικόχλιο, η οποία θα πρέπει να υπερνικήσει τις τριβές των σπειρωμάτων και την τριβή μεταξύ περικοχλίου και σώματος. Οι τριβές αυτές είναι το μεγαλύτερο ποσοστό της ροπής αυτής και μόνο ένα 10÷20% της ροπής σύσφιξης μετατρέπεται στη δύναμη προέντασης F_π . Η ροπή σύσφιξης ή αλλιώς προέντασης, δίνεται από την σχέση^{[6],[7],[9],[10],[24]} (Π1.5), όπου P είναι το βήμα του σπειρώματος, a είναι η ημιγωνία παρειάς του σπειρώματος, d είναι η ονομαστική διάμετρος του κοχλία, μ_1 ο συντελεστής τριβής μεταξύ των σπειρωμάτων, μ_2 είναι ο συντελεστής τριβής μεταξύ του περικοχλίου και του σώματος και b είναι η διάμετρος της επιφάνειας επαφής του περικοχλίου με το σώμα.

$$T_\pi = F_\pi \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{d_p \mu_1}{2 \cos a} + \frac{(d+b) \mu_2}{4} \right) \quad (\text{Π1.5})$$

Στην σχέση (Π1.5) ο πρώτος όρος αφορά στην ροπή που ασκείται για να μείνει η προένταση F_π , ο δεύτερος όρος αφορά στη ροπή που πρέπει να ασκηθεί για να υπερνικηθούν οι τριβές των σπειρωμάτων και ο τελευταίος όρος αφορά στη ροπή για να υπερνικηθούν οι τριβές μεταξύ περικοχλίου και σώματος. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα Π1.35) φαίνονται οι δυνάμεις που περιγράψαμε.



Σχήμα Π1.35: Δυνάμεις κατά την προένταση του κοχλία (πηγή :[6]).

Σημαντικό ρόλο στην προένταση έχει και το εργαλείο με το οποίο συσφίγγουμε. Κάθε εργαλείο έχει και κάποια απόκλιση από την ονομαστική ροπή που θέλουμε να συσφίξουμε. Στη διάταξή μας, χρησιμοποιούμε ροπόκλειδο ή αλλιώς δυναμόκλειδο, το οποίο έχει ένδειξη της ροπής με την οποία συσφίγγουμε. Σύμφωνα με το [24] (βλ. Σχήμα Π1.36) για χειροκίνητο δυναμόκλειδο και μέτρηση μόνο της ροπής, χωρίς την επάλειψη λιπαντικού στις τριβόμενες επιφάνειες, η απόκλιση είναι $\pm 20\%$. Για κάθε τρόπο σύσφιξης, ορίζεται και ο συντελεστής προέντασης α_π ο οποίος αν πολλαπλασιαστεί με τη δύναμη προέντασης F_π , δίνει τη μέγιστη δύναμη προέντασης που πιθανόν θα εφαρμοστεί στον κοχλία κατά τη σύσφιξη, λόγω του σφάλματος του τρόπου σύσφιξης. Έτσι, πρέπει ο έλεγχος αντοχής να γίνει για την δύναμη προέντασης $F_{\pi \max} = \alpha_\pi \cdot F_\pi$.

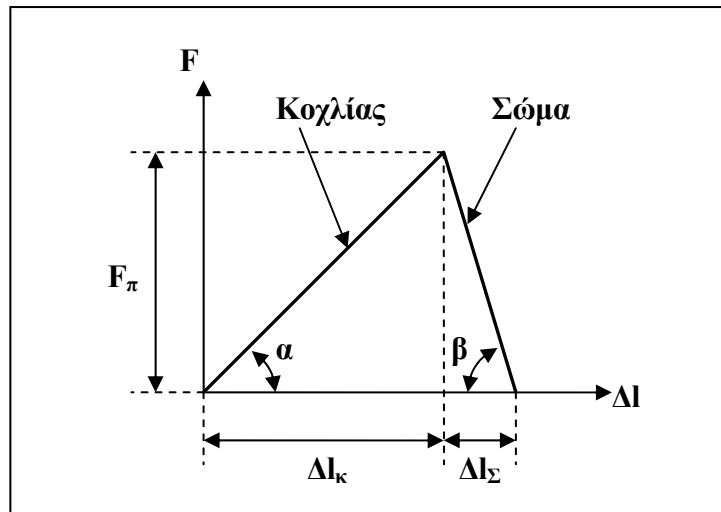
Π Ι Ν Α Κ Α Σ Δ 21 : Συντελεστής προεντάσεως α_π .

Τρόπος προεντάσεως	Μέγιστη δυνατή απόκλιση από την ονομαστική δύναμη προεντάσεως	α_π
Με χειροκίνητο ή μηχανοκίνητο δυναμόκλειδο και ακριβή μέτρηση της ροπής προεντάσεως ως προς την επιμήκυνση του κοχλία ή ως προς τη γωνία περιστροφής του περικοχλίου (ή του κοχλία) κατά την προένταση.	$\pm 0\%$	1,0
Με χειροκίνητο δυναμόκλειδο και μέτρηση μόνο της ροπής προεντάσεως. Επάλειψη του σπειρώματος και τριβόμενων επιφανειών με λάδι ή M_0S_2 .	$\pm 10\%$	1,25
Με χειροκίνητο δυναμόκλειδο και μέτρηση μόνο της ροπής προεντάσεως. Χωρίς επάλειψη με λιπαντικό.	$\pm 20\%$	1,6
Με μηχανοκίνητο δυναμόκλειδο (ηλεκτροκίνητο ή με πεπιεσμένο αέρα). Επάλειψη σπειρώματος και τριβόμενων επιφανειών με λάδι ή M_0S_2 .	$\pm 30\%$	2
Με μηχανοκίνητο δυναμόκλειδο (ηλεκτροκίνητο ή με πεπιεσμένο αέρα). Χωρίς επάλειψη με λιπαντικό.	$\pm 30\%$	2
Με μηχανοκίνητο κλειδί κρουστικής λειτουργίας. Ανακριβής ρύθμιση ροπής προεντάσεως.	$\pm 40\%$	2,5
Με χειροκίνητο κλειδί (γερμανικό ή πολυγωνικό κλειδί, καρυδάκι ή κλειδί Άλλεν) και προέκταση του μοχλοβραχίονα.	$\pm 50\%$	3
Με χειροκίνητο κλειδί και τυποποιημένο μήκος μοχλοβραχίονα.	$\pm 60\%$	4

Σχήμα Π1.36: Συντελεστής προέντασης (πηγή : [24]).

Στο σημείο αυτό, είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε το **τρίγωνο προέντασης**^{[6],[9],[24]} της κοχλιοσύνδεσης. Το τρίγωνο αυτό είναι ουσιαστικά ένα διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των συνδεόμενων στοιχείων της κοχλιοσύνδεσης (κοχλίας – σώμα) το οποίο προκύπτει από την εξής θεώρηση : τα συνδεόμενα στοιχεία μπορούν να εκφραστούν σαν ελατήρια με κάποια σταθερά ελατηρίου C_κ για τον κοχλία και C_Σ για το σώμα. Έτσι, ανάλογα με τη δύναμη προέντασης F_π έχουμε επιμήκυνση του κοχλία κατά $\Delta l_\kappa = F_\pi / C_\kappa$ και μια βράχυνση του σώματος κατά $\Delta l_\Sigma = F_\pi / C_\Sigma$. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα Π1.37) φαίνεται το τρίγωνο προέντασης, όπου για την κλίση

της ευθείας του κοχλία ισχύει $\tan\alpha = C_k$ και για την κλίση της ευθείας του σώματος ισχύει $\tan\beta = C_s$.

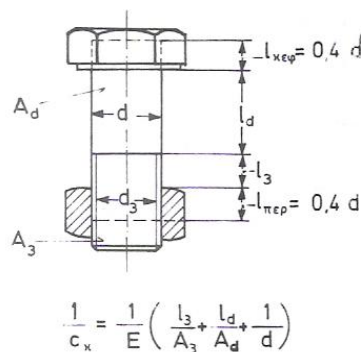


Σχήμα Π1.37: Τρίγωνο προέντασης κοχλιοσύνδεσης.

Οι σταθερές ελατηρίου των στοιχείων της κοχλιοσύνδεσης εξαρτώνται από τη γεωμετρία και το υλικό των στοιχείων και βασίζονται στη σχέση (Π1.6) στην οποία συνδυάζεται ο νόμος του Hooke και η σχέση της σταθεράς C ελατηρίου. Στη σχέση αυτή, Δl είναι η επιμήκυνση, l είναι το μήκος ενός σώματος, σ είναι η τάση, E το μέτρο ελαστικότητας (ή εφελκυσμού) (βλ. Πίνακας Π1.1), F είναι η δύναμη και A είναι η επιφάνεια μιας διατομής.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{AE} \Rightarrow \boxed{C} = \frac{F}{\Delta l} = \frac{AE}{l} \quad (\text{Π1.6})$$

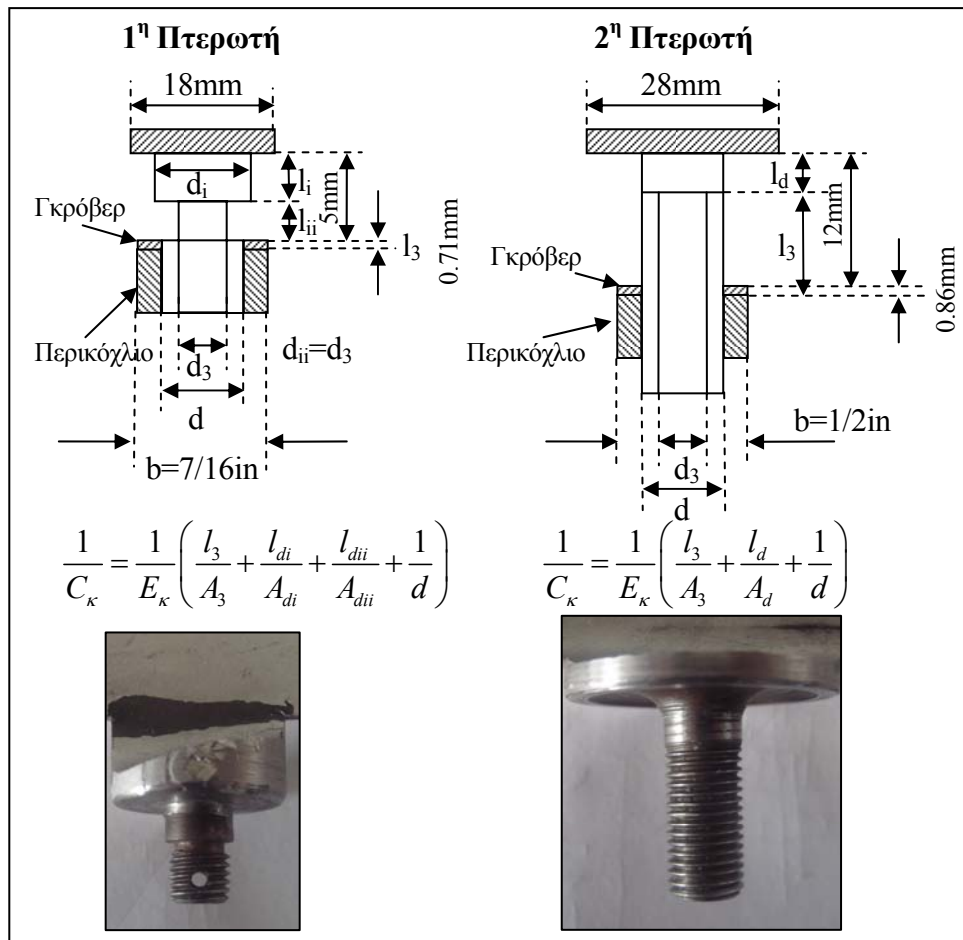
Οι διατομές όμως του κοχλία δεν είναι σταθερές σε όλο του το μήκος, αφού έχει τμήματα χωρίς σπείρωμα με διάμετρο κορμού διαφορετική από την d_3 . Έτσι για κάθε τμήμα ορίζεται η σταθερά ελατηρίου και η σχέση που συνδέει τις επιμέρους σταθερές με την ολική σταθερά ελατηρίου του κοχλία είναι η σχέση (Π1.7). Το παρακάτω σχήμα^[24] (Σχήμα Π1.38) επεξηγεί τα παραπάνω.



Σχήμα Π1.38: Σταθερά ελατηρίου ενός κοχλία (πηγή :[24]).

$$\frac{1}{C_{\kappa}} = \frac{1}{E_{\kappa}} \left(\frac{l_3}{A_3} + \frac{l_d}{A_d} + \frac{l_{di}}{A_{di}} + \dots + \frac{l_{dn}}{A_{dn}} + \frac{1}{d} \right), d_i, d_{ii}, \dots, d_n : \text{Πιθανές διαμορφώσεις} \quad (\text{Π1.7})$$

Για τους κοχλίες των πτερυγίων μας, οι διαμορφώσεις φαίνονται στο Σχήμα Π1.39 και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π1.6) παρουσιάζονται οι διαστάσεις των διαμορφώσεων και οι σταθερές ελατηρίων των κοχλίων που υπολογίστηκαν.



Σχήμα Π1.39: Διαμορφώσεις κοχλίων πτερυγίων για τον υπολογισμό του C_{κ} .

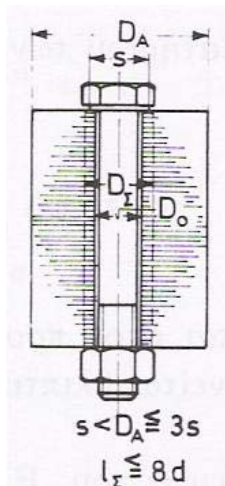
Κοχλίας	d(mm)	d ₃ (mm)	d _i (mm)	d _{ii} (mm)	l _d (mm)	l ₃ (mm)	l _i (mm)	l _{ii} (mm)	C _κ (MN/m)
1 ^η Πτερωτής	1/4"=6.35	5.1716	7.1	5.1716	-	0.71	3.8	1.2	581
2 ^η Πτερωτής	5/16"=7.94	6.5627	-	-	5	7.86	-	-	435

Πίνακας Π1.6: Διαμορφώσεις κοχλίων πτερυγίων και σταθερές ελατηρίων C_{κ} .

Όσον αφορά στην σταθερά C_{Σ} του σώματος (δίσκοι πτερυγίων), η δυσκολία υπολογισμού της έγκειται στον προσδιορισμό της επιφάνειας A_{Σ} που καταπονείται θλιπτικά. Σύμφωνα με πειραματικές έρευνες του Fritsche^[24], το τμήμα των στοιχείων του υλικού που συμμετέχει στην παραμόρφωση, έχει βαρελοειδή μορφή (βλ. Σχήμα Π1.40)

και η επιφάνεια A_{Σ} της διατομής του αναπληρωματικού κυλίνδρου προσεγγίζεται με την σχέση (Π1.8), όταν το υλικό είναι κράμα αλουμινίου και όταν $s < D_A \leq 3s$. Στη σχέση αυτή D_A είναι η διάμετρος της μετωπικής επιφάνειας του σώματος, s είναι η διάμετρος της επιφάνειας επαφής του περικοχλίου ή του κεφαλιού του κοχλία, l_{Σ} είναι η απόσταση των επιφανειών επαφής του σώματος και D_0 είναι η διάμετρος της οπής του σώματος.

$$A_{\Sigma} = \frac{\pi}{4}(D_{\Sigma}^2 - D_0^2) = \frac{\pi}{4}(s^2 - D_0^2) + \frac{\pi}{8}\left(\frac{D_A}{s} - 1\right)\left(\frac{s l_{\Sigma}}{3} + \frac{l_{\Sigma}^2}{36}\right), s < D_A \leq 3s \quad (\text{Π1.8})$$



Σχήμα Π1.40: Σταθερά ελατηρίου σώματος C_{Σ} περιορισμένων διαστάσεων (πηγή :[24]).

Στη διάταξή μας, οι γεωμετρικοί περιορισμοί στους δίσκους είναι το πάχος των δίσκων το οποίο είναι 42mm. Στο κάθετο επίπεδο στον άξονα των δίσκων, η απόσταση (τόξο κύκλου) από την μια οπή πρόσδεσης πτερυγίου του δίσκου, στην μεθεπόμενη οπή, είναι πάνω από 42mm. Άρα, επιλέγουμε προφανώς τη μικρότερη και έχουμε $D_A=42\text{mm}$. Για την τιμή του s , πήραμε τη μέση τιμή της διαμέτρου της πατούρας του περικοχλίου (b) και της διαμέτρου της πατούρας του πτερυγίου, οι διαστάσεις των οποίων φαίνονται στο Σχήμα Π1.39. Οι διαστάσεις του βάθους l_{Σ} των οπών στους δίσκους φαίνονται επίσης στο Σχήμα Π1.39. Τελικά, οι σταθερές ελατηρίων των δίσκων (σώμα) των πτερυγίων υπολογίζονται από την σχέση $C_{\Sigma}=A_{\Sigma} \cdot E_{\Sigma}/l_{\Sigma}$ Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π1.7) παρουσιάζονται οι σταθερές ελατηρίων C_{Σ} των δίσκων και οι απαραίτητες διαστάσεις που χρειάστηκαν για τον υπολογισμό τους.

Δίσκος	$D_A(\text{mm})$	$s(\text{mm})$	$l_{\Sigma}(\text{mm})$	$A_{\Sigma}(\text{mm}^2)$	$C_{\Sigma}(\text{MN/m})$
1 ^{ης} Πτερωτής	42	14.55	5	134.49	1929
2 ^{ης} Πτερωτής	42	20.35	12	310.66	1856

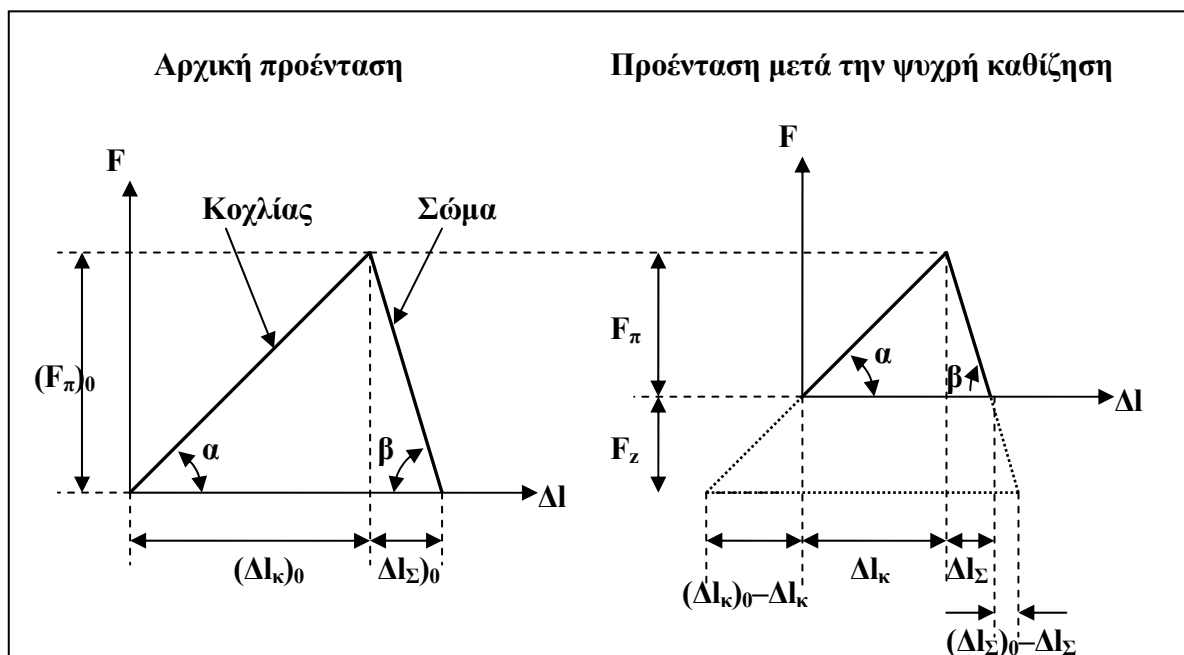
Πίνακας Π1.7: Διαμορφώσεις δίσκων (σώμα) πτερυγίων και σταθερές ελατηρίων C_{Σ} .

Ένα σημαντικό φαινόμενο που πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση της δύναμης προέντασης σε κοχλιοσυνδέσεις που λειτουργούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, είναι η **ψυχρή καθίζηση**^[24]. Η πτώση της δύναμης προέντασης προέρχεται από τις πλαστικές μικροπαραμορφώσεις της επιφανειακής τραχύτητας σε όλες της θέσεις που αναπτύσσεται επιφανειακή πίεση, δηλαδή, στις επιφάνειες επαφής μεταξύ κοχλία – περικοχλίου και σώματος. Το μεγαλύτερο μέρος της ψυχρής καθίζησης δημιουργείται σε σύντομο χρονικό διάστημα λειτουργίας αμέσως μετά τη συναρμολόγηση και την προένταση. Το μέγεθος της ολικής καθίζησης Δl_z σε mm μιας κοχλιοσύνδεσης, δίνεται εμπειρικούς – πειραματικούς τύπους^[24] ως : $\Delta l_z=6+2n$ για λείες επιφάνειες συνδεόμενων στοιχείων, και $\Delta l_z=6+2n$ για τραχιές επιφάνειες συνδεόμενων στοιχείων, όπου n είναι ο αριθμός θέσεων που έχουμε επαφή συνδεόμενων στοιχείων.

Στην διάταξή μας, επειδή οι κοχλιοσυνδέσεις έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές, το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο, έτσι, επιλέγουμε $\Delta l_z=5\mu\text{m}$. Στο Σχήμα Π1.41 φαίνεται η αλλοίωση του τριγώνου προέντασης λόγω της ψυχρής καθίζησης. Η πτώση της δύναμης προέντασης F_z κατά την καθίζηση δίνεται από την σχέση (Π1.9) και για την διάταξή μας προκύπτει για την 1^η πτερωτή $F_z=2232\text{N}$ και για τη 2^η πτερωτή $F_z=1763\text{N}$.

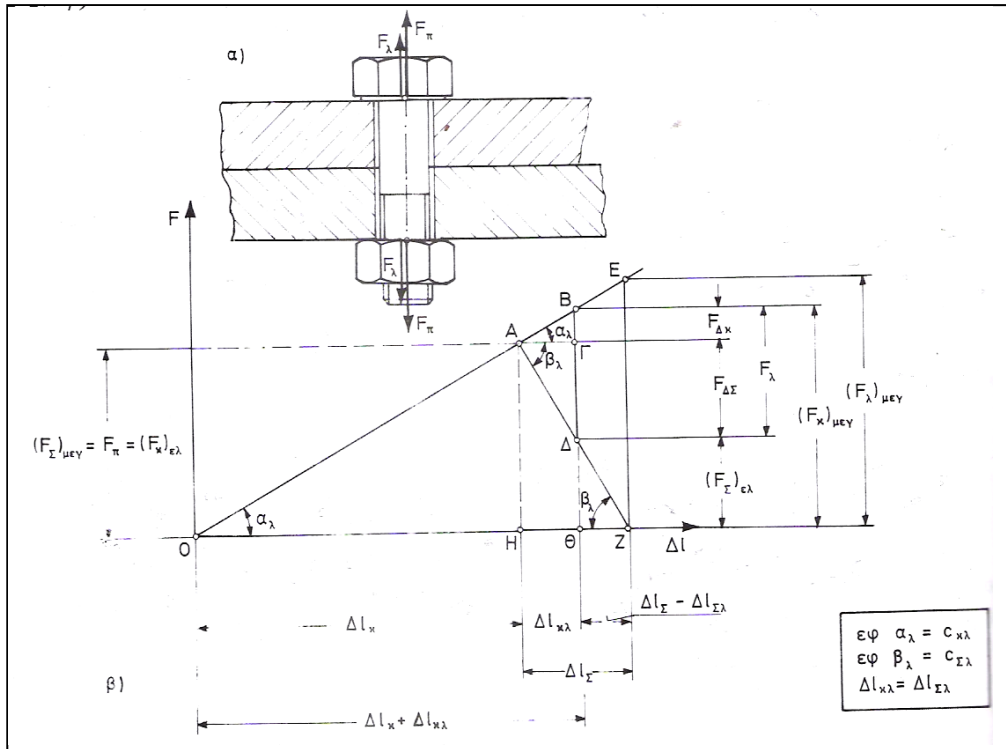
$$F_z = \Delta l_z \frac{C_\kappa C_\Sigma}{C_\kappa + C_\Sigma} \quad (\text{Π1.9})$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι εάν θέλουμε να μείνει στην κοχλιοσύνδεση μια προένταση F_π , τότε η αρχική προένταση πρέπει να είναι $(F_\pi)_0 = F_\pi + F_z$.



Σχήμα Π1.41: Αλλοίωση του τριγώνου προέντασης μιας κοχλιοσύνδεσης λόγω ψυχρής καθίζησης .

Κατά τη λειτουργία όμως εκτός από τη δύναμη προέντασης F_{π} , έχουμε και το φορτίο λειτουργίας (δύναμη F_{λ}) που αναλύσαμε παραπάνω, να εφελκύνει επιπλέον τον κοχλία. Όμως, κατά τη λειτουργία, η δύναμη που εφελκύνει τον κοχλία δεν είναι η $F_{\pi}+F_{\lambda}$ αλλά η $F_{\pi}+F_{\Delta\kappa}$ όπου $F_{\Delta\kappa} < F_{\lambda}$. Αντίστοιχα η δύναμη που θλίβει το σώμα κατά τη λειτουργία, δεν είναι η $F_{\pi}-F_{\lambda}$ αλλά η $F_{\pi}-F_{\Delta\Sigma}$ όπου $F_{\Delta\Sigma} < F_{\lambda}$. Με το Σχήμα Π1.42 γίνεται κατανοητό αυτό. Οι δυνάμεις $F_{\Delta\kappa}$ και $F_{\Delta\Sigma}$ δίνονται από τις σχέσεις (Π1.10) και (Π1.11) αντίστοιχα.



Σχήμα Π1.42: Τρίγωνο προέντασης με αξονικό εφελκυστικό φορτίο λειτουργίας (πηγή :[24]).

$$F_{\Delta\kappa} = F_{\lambda} \frac{C_{\kappa}}{C_{\kappa} + C_{\Sigma}} \quad (\text{Π1.10})$$

$$F_{\Delta\Sigma} = F_{\lambda} \frac{C_{\Sigma}}{C_{\kappa} + C_{\Sigma}} \quad (\text{Π1.11})$$

Προσοχή χρειάζεται η περίπτωση που το φορτίο λειτουργίας είναι αρκετά μεγάλο $((F_{\lambda})_{\text{μεγ}}$ στο Σχήμα Π1.42), ώστε να μηδενιστεί η προένταση του σώματος, με αποτέλεσμα να μην έχουμε επαφή του κεφαλιού του κοχλία (πατούρα πτερυγίου στην περίπτωση μας) με το σώμα (δίσκος). Στην περίπτωση αυτή, με την επίδραση των κραδασμών και του δυναμικού φορτίου κατά τη λειτουργία, η κοχλιοσύνδεση ενδέχεται να λυθεί. Η σχέση^[24] (Π1.12) δίνει το μέγιστο φορτίο λειτουργίας ώστε να ισχύει

$(F_{\Sigma})_{ελ} = 0.1 \cdot F_{\pi}$ κατά τη λειτουργία, σαν περιθώριο ασφαλείας. Στη σχέση αυτή, διαιρούμε την δύναμη προέντασης F_{π} με τον συντελεστή προέντασης α_{π} , διότι προηγουμένως είπαμε πως ο τρόπος προέντασης έχει κάποιο σφάλμα. Έτσι, πρέπει να αναζητήσουμε το μέγιστο φορτίο λειτουργίας για την ελάχιστη πιθανή δύναμη προέντασης.

$$(F_{\lambda})_{μεγ} = \frac{0.9F_{\pi}/\alpha_{\pi}}{1 - \frac{C_{\kappa}}{C_{\kappa} + C_{\Sigma}}} = \frac{0.9F_{\pi}/\alpha_{\pi}}{\frac{C_{\Sigma}}{C_{\kappa} + C_{\Sigma}}} \quad (\text{Π1.12})$$

Στη συνέχεια βέβαια, πρέπει να εξετάσουμε αν ο κοχλίας αντέχει το μέγιστο αυτό φορτίο λειτουργίας.

Έλεγχος Στατικής Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης

Ο κορμός του κοχλία καταπονείται από στατική εφελκυστική και στρεπτική τάση. Η ισοδύναμη τάση δίνεται από τη σχέση^[24] (Π1.13) η οποία καταλήγει στη σχέση^[24] (Π1.14).

$$\sigma_{i\sigma} = \sqrt{\sigma_z^2 + (\alpha\tau_t)^2} \quad (\text{Π1.13})$$

$$\sigma_z = \frac{(F_{\pi})_{μεγ} + F_{\Delta\kappa}}{A_t} : \text{Στατική εφελκυστική τάση στον κορμό του κοχλία. } A_t : \text{σχ. (Π1.4)}$$

$$(F_{\pi})_{μεγ} = \alpha_{\pi} (F_{\pi} + F_z) : \text{Μέγιστη δύναμη προέντασης}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{\varepsilon\pi}}{\tau_{\varepsilon\pi}} = \frac{S_U}{S_S} = \frac{S_U}{0.58S_U} = 1.73 : \text{Λόγος καταπόνησης υλικού}$$

$$\tau_t = \frac{(T_{\kappa\pi})_{μεγ}}{W_t} : \text{Στατική στρεπτική τάση στον κορμό του κοχλία}$$

$$(T_{\kappa\pi})_{μεγ} = (F_{\pi})_{μεγ} \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{d_p \mu_1}{2 \cos a} \right) : \text{Μέγιστη ροπή στον κορμό του κοχλία}$$

$$W_t = \frac{\pi d_t^3}{16}, \quad d_t = \frac{d_m + d_p}{2} : \text{Ροπή αντίστασης στον κορμό (με σπείρωμα) του κοχλία}$$

$$\sigma_{i\sigma} = \sqrt{\left(\frac{(F_{\pi})_{μεγ} + F_{\Delta\kappa}}{A_t} \right)^2 + 3 \left(\frac{16(F_{\pi})_{μεγ} \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{d_p \mu_1}{2 \cos a} \right)}{\pi d_t^3} \right)^2} \quad (\text{Π1.14})$$

Ο συντελεστής ασφαλείας του κορμού (με σπείρωμα) του κοχλίου είναι :

$$S_f = \frac{\sigma_{\text{ισ}}}{S_Y} \geq 1.1 \quad (\text{Π1.15})$$

Στη διάταξή μας, λόγω του μικρού ορίου ελαστικότητας S_Y του κοχλίου, και της μεγάλης πτώσης της δύναμης προέντασης F_z λόγω ψυχρής καθίζησης, είναι αδύνατο να είμαστε μέσα στα όρια ασφαλείας λαμβάνοντας υπ' όψιν το μέγιστο φορτίο λειτουργίας. Έτσι, υπολογίσαμε τη μέγιστη δύναμη προέντασης που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ώστε $S_f=1.1$ με φορτίο λειτουργίας που αντιστοιχεί στις $N=300\text{RPM}$ και για τις δύο πτερωτές. Αυτό έγινε ώστε με μια λειτουργία της μηχανής στις 300 σ.α.λ. για μισή ώρα, αμέσως μετά την προένταση των κοχλιοσυνδέσεων, να μειωθεί η δύναμη προέντασης λόγω της καθίζησης. Έτσι, μετά από μισή ώρα λειτουργίας, η δύναμη προέντασης δεν θα είναι $F_\pi+F_z$ αλλά F_π . Αποτέλεσμα αυτού είναι να βελτιωθεί (αυξηθεί) ο συντελεστής ασφαλείας κι έτσι να μπορούμε να ανεβάσουμε στροφές στο επιτρεπόμενο όριο το οποίο καθορίζεται από το μέγιστο φορτίο λειτουργίας της σχέσης (Π1.12) και φυσικά και από την σχέση (Π1.15).

Άρα λοιπόν, έχουμε για την 1^η πτερωτή $F_\pi+F_z=3300\text{N}$ και για τη 2^η $F_\pi+F_z=5300\text{N}$. Έτσι από την σχέση (Π1.5) στην οποία επιλέγουμε συντελεστή τριβής σπειρωμάτων $\mu_1=0.15$ και συντελεστή τριβής περικοχλίου $\mu_2=0.17$ (αυξημένη τριβή λόγω χρήσης γκρόβερ-serrated external tooth lock washer DIN 6798), για προένταση $F_\pi+F_z$, έχουμε ροπή σύσφιξης για την 1^η πτερωτή $T=7\text{Nm}$ και για τη 2^η πτερωτή $T=14\text{Nm}$. Έτσι, ο συντελεστής ασφαλείας για σύνθετη καταπόνηση, για φορτίο λειτουργίας που αντιστοιχεί σε 300 σ.α.λ είναι και για τις δύο πτερωτές 1.1.

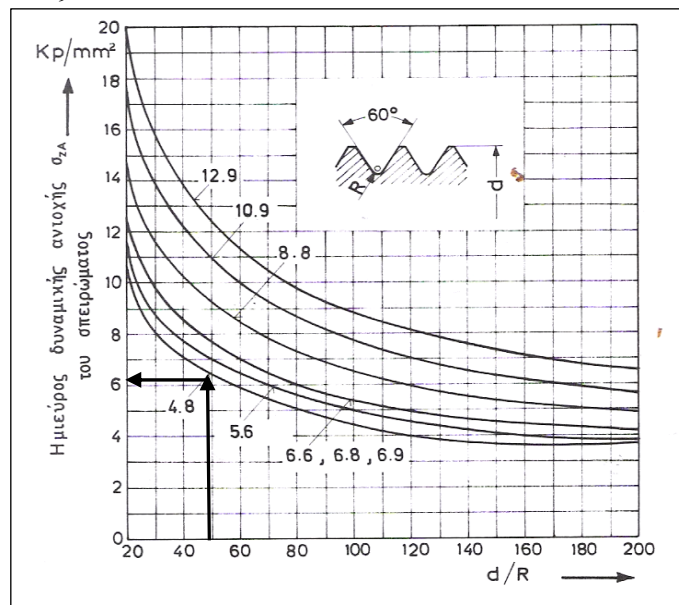
Μετά το πρώτο μισάωρο λειτουργίας η προένταση θα έχει μειωθεί κατά F_z . Άρα η προένταση για την 1^η πτερωτή είναι $F_\pi=1050\text{N}$ και για την 2^η πτερωτή είναι $F_\pi=3500\text{N}$. Έτσι, από την σχέση (Π1.12) το μέγιστο φορτίο λειτουργίας είναι για την 1^η πτερωτή $(F_\lambda)_{\text{μεγ}}=760\text{N}$ και για τη 2^η πτερωτή $(F_\lambda)_{\text{μεγ}}=2432\text{N}$. Αυτό αντιστοιχεί σε μέγιστες σ.α.λ. για την 1^η πτερωτή $N_{\text{μεγ}}=1600\text{rpm}$ και για τη 2^η πτερωτή $N_{\text{μεγ}}=2800\text{rpm}$. Ο συντελεστής ασφαλείας τώρα είναι 3.1 για την 1^η και 1.5 για την 2^η πτερωτή.

Έλεγχος Δυναμικής Αντοχής Κοχλιοσύνδεσης

Ο συντελεστής ασφαλείας κοχλίου σε δυναμική θραύση του σπειρώματος δίνεται από τη σχέση^[24] (Π1.16). Το σ_{zA} είναι το ημιεύρος δυναμικής αντοχής του πυρήνα του σπειρώματος και το βρίσκουμε από το παρακάτω διάγραμμα^[24] (Σχήμα Π1.43). Για τους κοχλίες μας το $S_Y=275\text{MPa}$ που αντιστοιχεί σε κατηγορία υλικού περίπου 4.7 (4.7 σημαίνει $S_U=40 \cdot 9.8 \approx 400\text{MPa}$ και $S_Y=4 \cdot 7 \cdot 9.8 \approx 280\text{MPa}$). Η ακτίνα καμπυλότητας R στον πυρήνα του σπειρώματος, δίδεται από τη σχέση^[6] $R(\text{in})=0.14434 \cdot P$, όπου P το βήμα. Έτσι, για την 1^η πτερωτή έχουμε $d/R=48.5$ άρα $\sigma_{zA} \approx 60\text{MPa}$ και για τη 2^η πτερωτή

έχουμε $d/R=52$ άρα $\sigma_{zA} \approx 60\text{MPa}$. Το κ_1 και κ_2 είναι ο συντελεστής κατασκευής του σπειρώματος και ο συντελεστής μορφής του περικοχλίου αντίστοιχα. Στην περίπτωση μας, επιλέγουμε τη δυσμενέστερη περίπτωση για το κ_1 , και λόγω του ότι χρησιμοποιούμε περικόχλιο θλίψεως, έχουμε $\kappa_1=\kappa_2=1$.

$$\left. \begin{aligned} S_{fd} &= \frac{(\sigma_{zA})_{\varepsilon\pi}}{\sigma_{za}} \geq 1.4 \\ \sigma_{za} &= \frac{2F_{\Delta\kappa}}{\pi d_m^2} \\ (\sigma_{zA})_{\varepsilon\pi} &= \kappa_1 \kappa_2 \sigma_{zA} \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_{\Delta\kappa} \leq \frac{\pi d_m^2 \kappa_1 \kappa_2 \sigma_{zA}}{2 \cdot 1.4} \quad (\text{Π1.16})$$



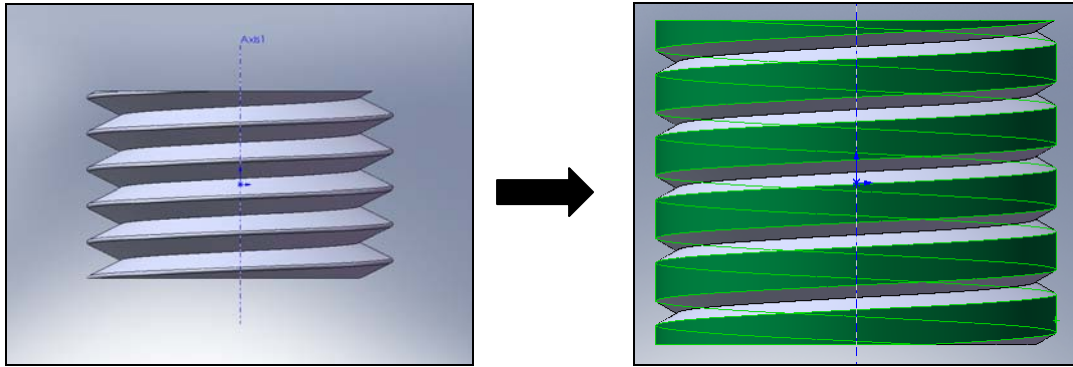
Σχήμα Π1.43: Η μείζονος δυναμικής αντοχής του πυρήνα του σπειρώματος συναρτήσει της κατηγορίας του υλικού και του λόγου d/R (πηγή :[24]).

Τελικά, έχουμε για την 1^η περωτή $F_{\Delta\kappa} \leq 1800\text{N}$ και για τη 2^η περωτή $F_{\Delta\kappa} \leq 2900\text{N}$. Παρατηρούμε λοιπόν ότι δεν έχουμε κανένα πρόβλημα σε δυναμική αντοχή, αφού όπως δείξαμε πριν το μέγιστο φορτίο λειτουργίας είναι για την 1^η περωτή $(F_{\lambda})_{\mu\epsilon\gamma} = 760\text{N}$ και για τη 2^η περωτή $(F_{\lambda})_{\mu\epsilon\gamma} = 2432\text{N}$ και πάντα ισχύει $F_{\lambda} \geq F_{\Delta\kappa}$.

Κρίσιμο μήκος φέροντος σπειρώματος

Το κρίσιμο μήκος φέροντος σπειρώματος είναι το μήκος του δεσμευμένου σπειρώματος του κοχλία, στο οποίο υπάρχει ροή δύναμης από τον κοχλία στο περικόχλιο. Σύμφωνα με τα [6],[7], το μήκος αυτό πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην καταρρεύσει το σπείρωμα του κοχλία ή του περικοχλίου, πριν τη κατάρρευση του κορμού του σπειρώματος. Αυτό σημαίνει ότι η διατμητική τάση στα δεσμευμένα

σπειρώματα πρέπει να είναι μικρότερη από την εφελκυστική τάση στον κορμό του κοχλία. Έτσι, εάν A_s είναι η επιφάνεια που υπόκειται σε διατμητική φόρτιση το σπείρωμα του κοχλία (βλ. Σχήμα Π1.44), τότε σύμφωνα με τα [6],[7] θα πρέπει $A_s=2 \cdot A_t$ σαν συντελεστής ασφαλείας, όπου A_t από τη σχέση (Π1.4). Έτσι, το μήκος φέροντος σπειρώματος L_e σε ίντσες δίνεται από τη σχέση^[6] (Π1.17)



Σχήμα Π1.44: Επιφάνεια δεσμευμένου σπειρώματος κοχλία που υπόκειται σε διάτμηση.

$$L_e = \frac{2 \cdot A_t}{\pi \cdot D_{m_{N_{\max}}} \left(\frac{1}{2} + 0.57735 \cdot n (D_{p_{B_{\min}}} - D_{m_{N_{\max}}}) \right)} \quad (\text{Π1.17})$$

Οι επιφάνειες A_s και A_n του κοχλία και του περικοχλίου αντίστοιχα σε in^2 , που υπόκειται σε διάτμηση δίνονται από τις σχέσεις^[6] (Π1.18) και (Π1.19). Τα μεγέθη μέσα στις σχέσεις αυτές, δίδονται σε παραπάνω πίνακα (Πίνακας Π1.2).

$$A_s = L_e \cdot \pi \cdot D_{m_{N_{\max}}} \left(\frac{1}{2} + 0.57735 \cdot n (D_{p_{B_{\min}}} - D_{m_{N_{\max}}}) \right) \quad (\text{Π1.18})$$

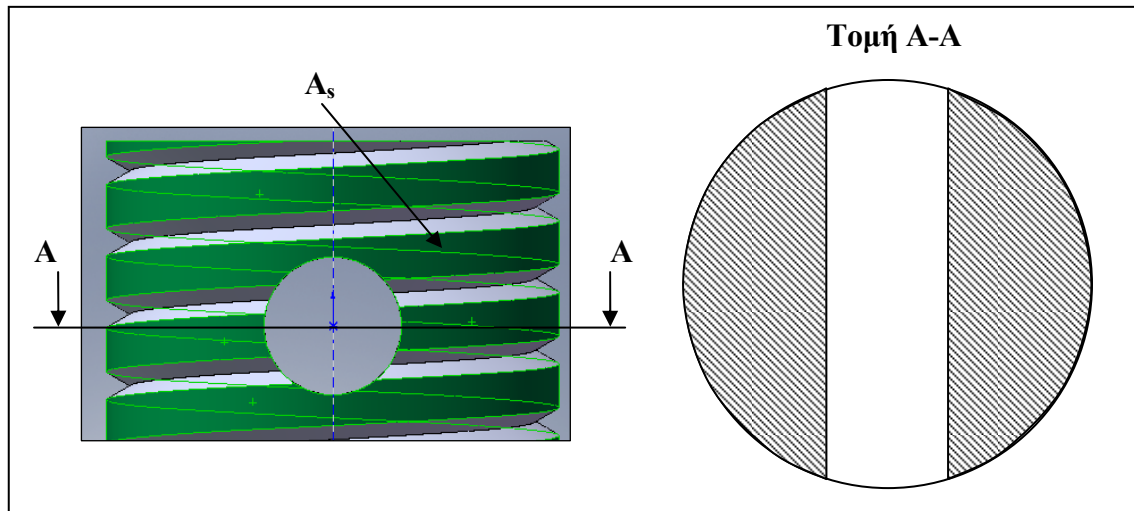
$$A_n = L_e \cdot \pi \cdot D_{B_{\min}} \left(\frac{1}{2} + 0.57735 \cdot n (D_{B_{\min}} - D_{p_{N_{\max}}}) \right) \quad (\text{Π1.19})$$

Εάν το υλικό του περικοχλίου έχει μικρότερη αντοχή από του κοχλία (μικρότερο S_U), τότε το μήκος φέροντος σπειρώματος πρέπει να αυξηθεί από L_e σε Q για να μην καταρρεύσει το σπείρωμα του περικοχλίου. Το Q δίνεται από τη σχέση (Π1.20).

$$Q = L_e \cdot J, \text{ όπου } J = \frac{A_s \cdot S_{UBOLT}}{A_n \cdot S_{UNUT}} \quad (\text{Π1.20})$$

Στη διάταξή μας, το μήκος φέροντος σπειρώματος των κοχλιών, είναι για την 2^η πτερωτή όσο το πάχος του περικοχλίου το οποίο είναι $H=17/64\text{in}=6.75\text{mm}$ (βλ και Πίνακας Π1.2) και για την 1^η πτερωτή είναι $H-1\text{mm}=7/32\text{in}-1\text{mm}=5.56\text{mm}-1\text{mm}=4.56\text{mm}$, αφού στην 1^η πτερωτή ο κοχλίας δεν εξέρχεται για 1mm από το περικόχλιο. Επίσης, το υλικό των περικοχλίων έχει μεγαλύτερη αντοχή από το υλικών των κοχλιών, άρα δεν χρειάζεται η σχέση (Π1.20).

Όμως, ο κοχλίας των πτερυγίων της 1^{ης} πτερωτής έχει μια οπή διαμέτρου 1.75mm εγκάρσια στον άξονα του (βλ. και Σχήμα Π1.39), στη μέση περίπου του μήκους φέροντος σπειρώματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η διάμετρος A_s να είναι μικρότερη από αυτήν που υπολογίζει η σχέση (Π1.18). Με τη βοήθεια προγράμματος CAD (βλ. και Σχήμα Π1.45) υπολογίσαμε ότι το εμβαδόν της επιφάνειας A_s μειώνεται κατά 7.9% λόγω της οπής. Αυτό σημαίνει ότι το ελάχιστο μήκος φέροντος σπειρώματος δεν πρέπει να είναι L_e αλλά $1.079 \cdot L_e$.



Σχήμα Π1.45: Επιφάνεια δεσμευμένου σπειρώματος κοχλία που υπόκειται σε διάτμηση, για τον κοχλία της 1^{ης} πτερωτής που φέρει εγκάρσια οπή.

Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι για την 1^η πτερωτή $L_e=4.98\text{mm}$ και για τη 2^η πτερωτή $L_e=5.06\text{mm}$. Παρατηρούμε για τη 2^η πτερωτή το μήκος αυτό είναι λίγο μικρότερο από το πάχος του περικοχλίου, πράγμα αναμενόμενο, αφού τα περικόχλια έχουν πάχος βασισμένο στις παραπάνω σχέσεις. Για τη 1^η πτερωτή όμως το απαιτούμενο μήκος είναι μεγαλύτερο από το υπάρχον. Έτσι, πρέπει να ελέγξουμε αν η μέγιστη δύναμη που αντέχει η A_s σε διάτμηση είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη δύναμη που αντέχει η A_t σε εφελκυσμό. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω, για την 1^η πτερωτή έχουμε $A_s=0.06549\text{in}^2$ και μέγιστη δύναμη σε διάτμηση $F_{s_{op}} = A_s \cdot S_S=12620\text{N}$. Επίσης, η μέγιστη δύναμη σε εφελκυσμό είναι $F_{U_{op}} = A_t \cdot S_U=12085\text{N}$. Άρα, βλέπουμε ότι ακόμα και με μειωμένο εμβαδόν A_s έχουμε $F_{s_{op}} > F_{U_{op}}$.

Τέλος, πρέπει να ελέγξουμε σε θραύση τη διατομή του πυρήνα του κοχλία της πρώτης πτερωτής όπου έχουμε την οπή, η οποία φαίνεται στο Σχήμα Π1.45 (δεξιά) με τη διαγράμμιση. Το εμβαδόν σε αυτή τη θέση υπολογίστηκε με απλή γεωμετρία και είναι $A_{thole}=0.02257\text{in}^2$. Άρα, σε αυτήν τη θέση, η μέγιστη δύναμη σε εφελκυσμό είναι $F_{U_{op}}=A_{thole} \cdot S_U=7500\text{N}$, η οποία είναι πολύ μικρότερη από την $F_{U_{op}}$. Σύμφωνα όμως με το [24], σε μια κοχλιοσύνδεση με περικόχλιο θλίψεως, όπως ακριβώς και στην περίπτωση μας, οι πρώτες 2 σπείρες του περικοχλίου παραλαμβάνουν σχεδόν το 50% του αξονικού φορτίου του κοχλία. Έτσι, στην περιοχή της οπής το 50% του αξονικού φορτίου θα καταπονεί την A_{thole} αφού η οπή είναι μετά τις πρώτες 2 σπείρες. Άρα, μπορούμε να

πούμε ότι η διατομή αυτή αντέχει μέχρι 15000N αξονικό φορτίο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει φόβος για αστοχία του υλικού στη θέση αυτή. Να παρατηρήσουμε επίσης, ότι οι οριακές αυτές δυνάμεις είναι πολύ μεγαλύτερες από τις δυνάμεις προέντασης και λειτουργίας που αναλύσαμε παραπάνω, με αποτέλεσμα να μην έχουμε αστοχία υλικού κατά τη λειτουργία.

Συνοψίζοντας, **κάθε φορά που συναρμολογούμε τις κοχλιοσυνδέσεις των πτερωτών πρέπει να κάνουμε τα εξής, 1^{ον}**) Να χρησιμοποιούμε τα γκρόβερ ώστε να μη λυθεί η κοχλιοσύνδεση, αφού αυτά αυξάνουν το συντελεστή τριβής μεταξύ των επιφανειών επαφής, και προσφέρουν μια επιπλέον προένταση στον κοχλία **2^{ον}**) Να χρησιμοποιούμε υγρή κόλλα (LocTight) επάνω στα σπειρώματα (βλ. Σχήμα Π1.46 α), πριν το σφίξιμο των περικοχλίων, ώστε να εξασφαλίσουμε ότι δεν θα λυθεί η κοχλιοσύνδεση, αφού η κόλλα αυτή στερεοποιείται μετά το σφίξιμο και δημιουργεί μεγάλο συντελεστή τριβής ανάμεσα στα σπειρώματα **3^{ον}**) Συσφίγγουμε με χρήση ροπόκλειδου (βλ. Σχήμα Π1.46 β) με ροπή $T=7\text{Nm}$ τους κοχλίες της 1^{ης} πτερωτής και με ροπή $T=14\text{Nm}$ τους κοχλίες της 2^{ης} πτερωτής **4^{ον}**) Να έχουμε σε λειτουργία τις πτερωτές στις 300RPM για μισή ώρα ώστε να επέλθει η ψυχρή καθίζηση και μετά να ανεβάσουμε στις επιθυμητές στροφές **5^{ον}**) Να φροντίζουμε ότι δεν θα ξεπεράσουμε τις μέγιστες επιτρεπόμενες στροφές των πτερωτών όπου για την 1^η είναι 1600RPM και για τη 2^η 2900RPM. Να σημειώσουμε ότι σε περίπτωση που η κατεργασία βαφής του υλικού του κοχλία είναι σταδιακή βαφή και επαναφορά, και όχι ανόπτηση, τότε η αντοχή σε εφελκυσμό S_Y ανέρχεται στα 585MPa, με αποτέλεσμα για τις ίδιες ροπές σύσφιξης των κοχλίων των πτερωτών, το εύρος σ.α.λ. των πτερωτών να φθάνει με ασφάλεια τις 3000rpm.



Σχήμα Π1.46: α) Προσθήκη ασφαλιστικής κόλλας LocTight στα σπειρώματα, β) Σύσφιξη με ροπόκλειδο, γ) Χρήση γκρόβερ DIN 127B στους κοχλίες του αποστάτη των πτερωτών.

Τέλος, για τους κοχλίες του αποστάτη των πτερωτών που συνδέονται στον δίσκο της πρώτης πτερωτής, χρησιμοποιούμε M5 κοχλίες με allen κεφαλή (Socket head screws) και γκρόβερ DIN127B για να εξασφαλίσουμε ότι δεν θα λυθούν οι κοχλίες λόγω των κραδασμών. Η ροπή σύσφιξης των κοχλίων αυτών υπολογίστηκε από την απλουστευμένη σχέση^[24] $T(\text{Nm})=K_T \cdot 10^{-4} \cdot S_Y \cdot d^3$ όπου $K_T=8.03$ εάν ο συντελεστής τριβής είναι παντού $\mu=0.15$, το S_Y σε kp/mm^2 και το d σε mm είναι η ονομαστική διάμετρος του κοχλία. Τη σχέση αυτήν, τη χρησιμοποιούμε επειδή εδώ δεν έχουμε κάποιο φορτίο λειτουργίας να καταπονεί τη κοχλιοσύνδεση. Επιλέγοντας απλή κατηγορία υλικού 4.8 έχουμε $S_Y=32\text{kp/mm}^2$, άρα καταλήγουμε στην ροπή **$T=3.5\text{Nm}$** .

Π1.4 Έλεγχος αζυγοσταθμίας πτερωτών και ακτινικής ταλάντωσης πτερυγίων.

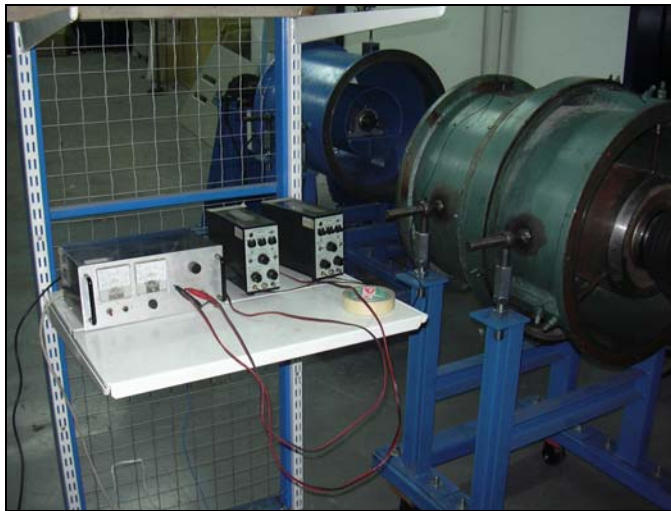
Πριν την τοποθέτηση των πτερωτών μέσα στο κέλυφος, έγιναν μετρήσεις του κραδασμού των πτερωτών και της ακτινικής ταλάντωσης των πτερυγίων τους. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν ώστε να σιγουρευτούμε ότι οι κραδασμοί ή ακτινική ταλάντωση των πτερυγίων δεν πρόκειται να προκαλέσουν κάποια επαφή των πτερυγίων στο κέλυφος κατά τη λειτουργία της διάταξης. Οι μετρήσεις έγιναν με τα δύο κελύφη να είναι αποσυναρμολογημένα και με την κάθε πτερωτή τοποθετημένη στην άτρακτο της 2^{ης} πτερωτής αλλά έξω από το κέλυφος.

Π1.4.1 Έλεγχος αζυγοσταθμίας πτερωτών.

Για τον έλεγχο της αζυγοσταθμίας τοποθετήσαμε επιταχυνσιόμετρα στο (πράσινο) κέλυφος της 2^{ης} πτερωτής για μέτρηση οριζόντιου και κατακόρυφου κραδασμού όπως φαίνεται στο Σχήμα Π1.47. Επιχειρήσαμε τη μέτρηση της ταχύτητας (mm/s) του κραδασμού με χρήση ενισχυτών επιταχυνσιόμετρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα Π1.48. Έπειτα, τοποθετήσαμε εναλλάξ τη 1^η και τη 2^η πτερωτή σε αξονική θέση έξω από το κέλυφος. Να σημειώσουμε ότι ο κραδασμός της 1^{ης} πτερωτής μετρήθηκε με τον αποστάτη να είναι συνδεδεμένος στο δίσκο της 1^{ης} πτερωτής.



Σχήμα Π1.47:
Επιταχυνσιόμετρα για μέτρηση κατακόρυφου και οριζόντιου κραδασμού.



Σχήμα Π1.48: Ενισχυτές επιταχυνσιόμετρων και ρύθμιση για μέτρηση ταχύτητας κραδασμού.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κραδασμού των πτερωτών ήταν τέτοια που μας οδήγησαν στο να μην εκτελέσουμε ζυγοστάθμιση καθώς η ταχύτητα του κραδασμού και για τις δύο πτερωτές ήταν γύρω στο **1mm/s** που είναι αρκετά χαμηλή τιμή και

συνεπάγεται ομαλή λειτουργία. Βέβαια, επιχειρήσαμε να εφαρμόσουμε τη γραφική μέθοδο ζυγοστάθμισης ενός επιπέδου ώστε να διαπιστώσουμε τη τιμή της διορθωτικής μάζας που πρέπει να εγκατασταθεί σε κάθε δίσκο πτερυγίων. Όμως, λόγω του μικρού κραδασμού των πτερωτών, δεν κάναμε αυτήν την επέμβαση και γι' αυτό δε θα αναφερθούμε καθόλου σε αυτή τη διαδικασία στην παρούσα εργασία. Για λεπτομέρειες της μεθόδου αυτής, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο “Rotating Machinery : Practical solutions to unbalance and misalignment, Robert B. McMillan”.

Π1.4.2 Έλεγχος ακτινικής ταλάντωσης πτερυγίων.

Για να βεβαιωθούμε ότι τα πτερυγία δεν πρόκειται να έλθουν σε επαφή με το κέλυφος κατά τη λειτουργία, μετρήσαμε την ταλάντωση των πτερυγίων της 1^{ης} και της 2^{ης} πτερωτής. Η μέτρηση έγινε με δύο αισθητήρες προσέγγισης – απόστασης (distance proximity sensors) επαγωγικού τύπου, οι οποίοι τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται στο Σχήμα Π1.49, ώστε ο ένας να μετρά την κατακόρυφη και ο άλλος την οριζόντια ταλάντωση κάθε πτερυγίου.



Σχήμα Π1.49: Αισθητήρες προσέγγισης – απόστασης για μέτρηση οριζόντιας και κατακόρυφης ταλάντωσης πτερυγίων.

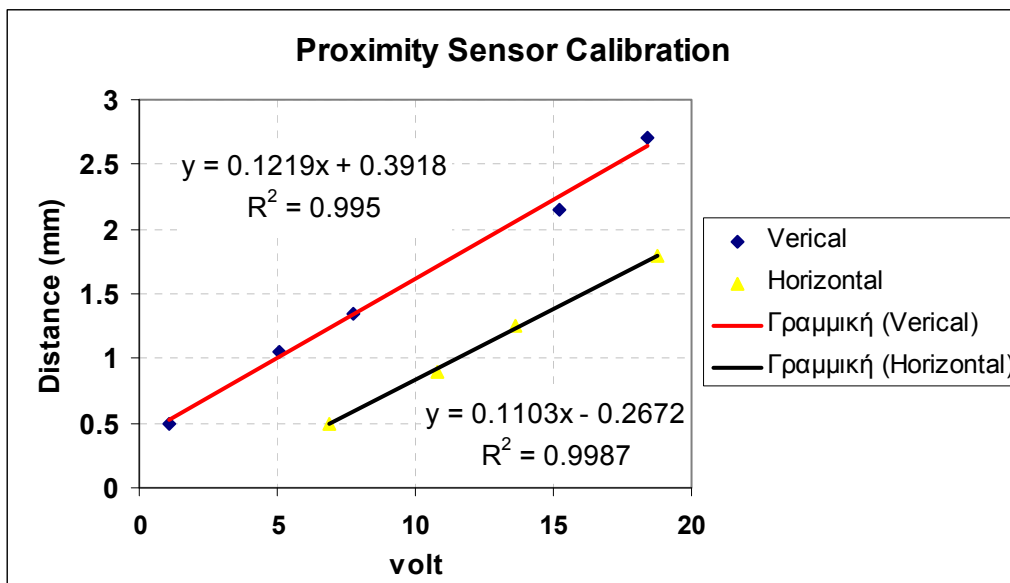
Αυτό που θέλουμε να διαπιστώσουμε είναι εάν το πλάτος ταλάντωσης του κάθε πτερυγίου είναι αρκετά μικρότερο του ακτινικού διάκενου (1mm) για ένα μεγάλο εύρος στροφών της πτερωτής. Έτσι, εξασφαλίζουμε ότι όταν η πτερωτή εισέλθει στο κέλυφος, δεν πρόκειται να προκληθεί κάποια επαφή πτερυγίου με το κέλυφος για αυτό το εύρος στροφών.

Το πρώτο βήμα ήταν η βαθμονόμηση των αισθητήρων προσέγγισης, η οποία εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το υλικό του μετάλλου που θέλουμε να μετρήσουμε. Η

καμπύλη βαθμονόμησης των αισθητήρων είναι γραμμική. Για να το πετύχουμε αυτό πήραμε ζεύγη τιμών απόστασης – τάσης εξόδου αισθητήρα, τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π1.8). Η καμπύλη βαθμονόμησης των αισθητήρων είναι γραμμική και παρουσιάζεται στο Σχήμα Π1.50.

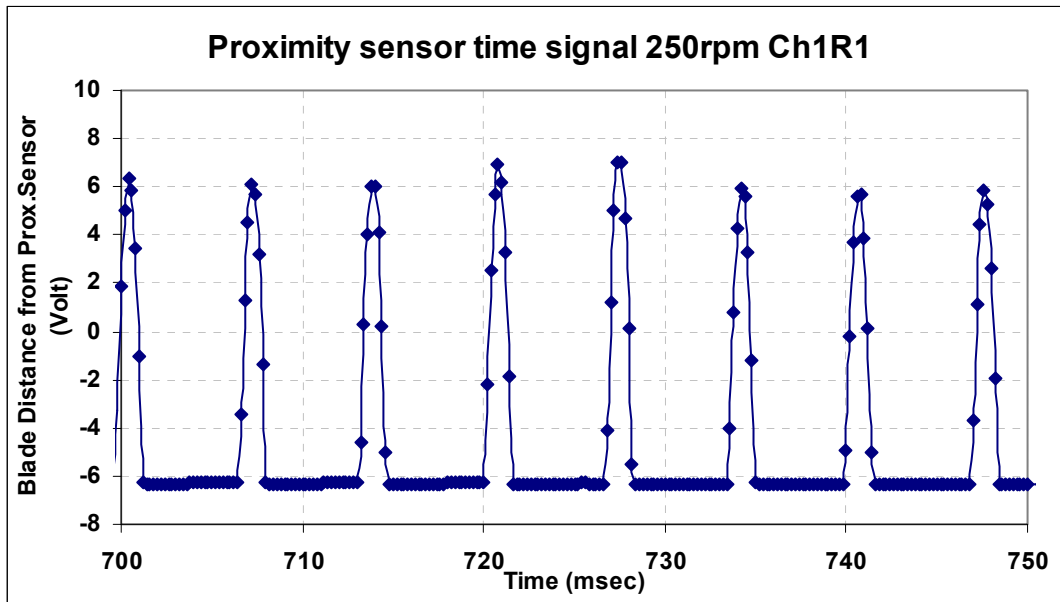
Vertical ($y = a \cdot x + b$)		Horizontal ($y = a \cdot x + b$)	
Y (distance [mm])	X (Volt)	Y (distance [mm])	X (Volt)
0	0.74	1.25	13.6
0.5	1.089	0.5	6.86
1.05	5.04	0.9	10.83
1.35	7.75	1.8	18.75
2.15	15.2	-	-
2.7	18.43	-	-
a	0.1219	a	0.1103
b	0.3918	b	-0.2672

Πίνακας Π1.8: Βαθμονόμηση αισθητήρων προσέγγισης – απόστασης.



Σχήμα Π1.50: Καμπύλες βαθμονόμησης αισθητήρων προσέγγισης – απόστασης.

Στη συνέχεια, αυτό που έπρεπε να μετρήσουμε είναι η χρονοσειρά της απόστασης αυτής που μετράνε οι αισθητήρες. Η χρονοσειρά αυτή αποτελείται από κορυφές που αντιστοιχούν στην ελάχιστη απόσταση των πτερυγίων από τον αισθητήρα. Βέβαια, η απόσταση αυτή αλλάζει από πτερύγιο σε πτερύγιο αφού τα πτερύγια δεν έχουν ακριβώς το ίδιο μήκος, αλλά διαφορετικό (σε τάξη μεγέθους μm). Επίσης, η απόσταση αυτή αλλάζει και για το ίδιο το πτερύγιο συναρτήσει του χρόνου αφού τα πτερύγια ταλαντώνονται λόγω των κραδασμών. Ένα παράδειγμα χρονοσειράς φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα Π1.51.



Σχήμα Π1.51: Χρονοσειρά απόστασης πτερυγίων από τον αισθητήρα απόστασης.

Παρατηρούμε ότι για να "πιάσουμε" αυτές τις κορυφές πρέπει η συχνότητα δειγματοληψίας f_s να είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη συχνότητα περάσματος πτερυγίων f_b . Παράλληλα για να έχουμε εικόνα της ταλάντωσης των πτερυγίων πρέπει ο χρόνος δειγματοληψίας να είναι τόσο μεγάλος ώστε το κάθε πτερύγιο να περάσει αρκετές φορές από τον αισθητήρα, για να "πιάσουμε" τουλάχιστον μια πλήρη ταλάντωσή του. Έτσι λοιπόν, θέτουμε τον αριθμό σημείων που θέλουμε και ανάλογα τη συχνότητα περιστροφής επιλέγουμε μια αντίστοιχη συχνότητα δειγματοληψίας.

Στις μετρήσεις που κάναμε πήραμε $N=13386$ σημεία για διάφορες στροφές των πτερωτών. Επίσης, ρυθμίσαμε τους αισθητήρες να απέχουν απόσταση 1.5mm από το πτερύγιο 21 της 2^{ης} πτερωτής. Στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π1.9) παρουσιάζονται τα στοιχεία των μετρήσεων.

RPM	Συχνότητα περάσματος πτερυγίων $f_b=34 \cdot \text{RPM}/60$ (Hz)	Συχνότητα δειγματοληψίας f_s (Hz)
250	141.6	5000
500	283.3	10000
750	425	15000
1000	566.7	20000
1250	708.3	25000

Πίνακας Π1.9: Στοιχεία μετρήσεων με αισθητήρα απόστασης.

Αυτό που μας ενδιαφέρει τώρα είναι να εξάγουμε μέσα από κάθε χρονοσειρά τις κορυφές (τις ελάχιστες αποστάσεις δηλαδή) που αντιστοιχούν σε κάθε πτερύγιο. Αυτό το

χρειαζόμαστε ώστε να δούμε την ταλάντωση κάθε πτερυγίου ξεχωριστά και πως η μέση τιμή της ταλάντωσης όλων των πτερυγίων μεταβάλλεται με την αλλαγή των στροφών. Για να το κάνουμε αυτό, δημιουργήσαμε έναν κώδικα σε Fortran (BladeProx) στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Ο κώδικας λειτουργεί ως εξής :

Ουσιαστικά, ανιχνεύει την κάθε κορυφή της χρονοσειράς και μάλιστα αυτή που αντιστοιχεί στο ίδιο κάθε φορά πτερύγιο. Το αρχείο εισόδου της είναι ένα αρχείο .dat με τη χρονοσειρά του μεγέθους time(msec) - Amplitude(volt). Οι τιμές εισόδου του είναι ο αριθμός το σημείων δειγματοληψίας N, η ταχύτητα περιστροφής σε rpm, το χρονικό βήμα δειγματοληψίας ($1/f_s$), και ο χρόνος εμφάνισης της 1^{ης} κορυφής (πρέπει να πλοτάρουμε τη χρονοσειρά για να το δούμε αυτό). Έτσι, υπολογίζει τη συχνότητα περάσματος πτερυγίων και από κει το χρόνο περάσματος πτερυγίων T_b . Στη συνέχεια, ανιχνεύει τη 1^η κορυφή που αντιστοιχεί στο χρόνο t_1 που εισάγαμε και την αντιστοιχίζει στο πτερύγιο υπ' αριθμόν 1. Να πούμε εδώ ότι η αρίθμηση αυτή των πτερυγίων δεν έχει σχέση με την πραγματική. Έτσι, δε μπορούμε να ξέρουμε σε ποιο "αληθινό" πτερύγιο αντιστοιχεί κάθε ταλάντωση. Συνεχίζοντας λοιπόν, ο κώδικας διαβάζει ένα – ένα τα ζεύγη της χρονοσειράς και μετά από χρόνο $t_1+0.95 \cdot T_b$ (περίπου στη "ράχη" της κορυφής) αρχίζει να συγκρίνει το amplitude A της τωρινής τιμής i με το amplitude της προηγούμενης i-1. Όταν λοιπόν $A_i < A_{i-1}$ τότε βρήκε τη 2^η κορυφή και την αντιστοιχίζει στο πτερύγιο υπ' αριθμόν 2. Η διαδικασία συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο και στο τέλος έχει επιτευχθεί η αντιστοιχία των κορυφών για τα z=34 πτερύγια του ρότορα.

Τα αρχεία εξόδου του κώδικα είναι :

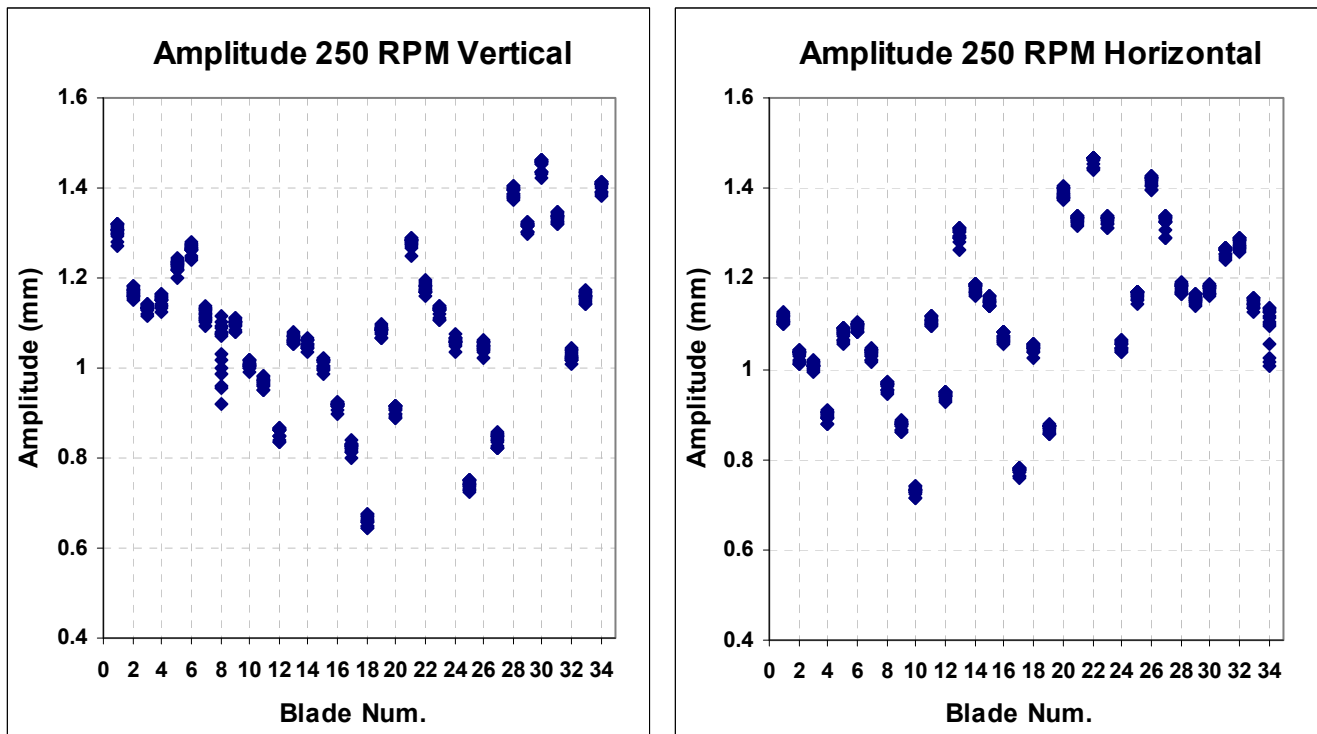
Αρχείο Nblade Amplitude.dat : το αρχείο αυτό περιέχει το amplitude σε volt συναρτήσει του a/a των πτερυγίων.

Αρχείο time Nblade Amplitude.dat : το αρχείο αυτό περιέχει το amplitude σε volt συναρτήσει του a/a των πτερυγίων και του χρόνου (msec) εμφάνισης.

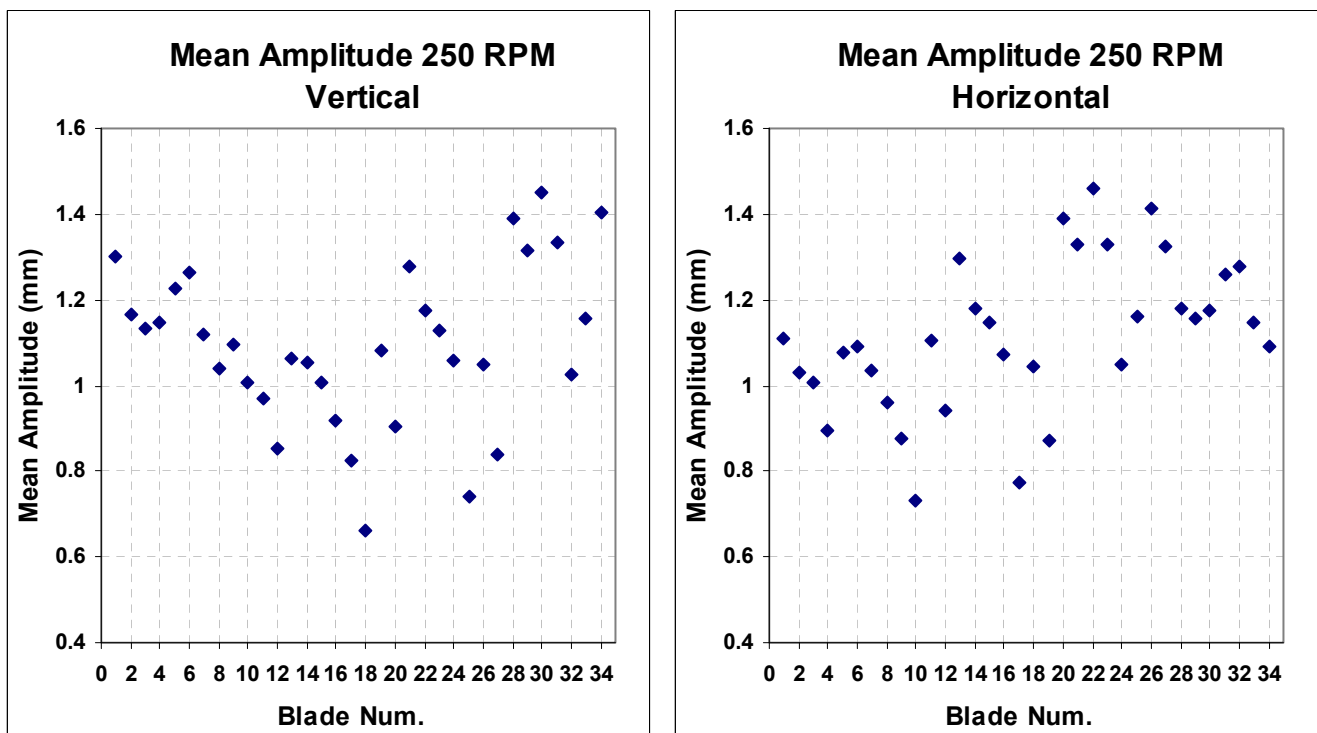
Αρχείο mean Nblade MaxDAmpl.dat : το αρχείο αυτό περιέχει τη διαφορά του ελάχιστου από το μέγιστο amplitude κάθε πτερυγίου συναρτήσει του a/a των πτερυγίων. Είναι δηλαδή ένα αρχείο με τόσες γραμμές όσες και ο αριθμός των πτερυγίων (34).

Αρχείο mean Nblade Amplitude.dat : το αρχείο αυτό περιέχει τη μέση τιμή του amplitude κάθε πτερυγίου συναρτήσει του a/a των πτερυγίων. Είναι δηλαδή ένα αρχείο με τόσες γραμμές όσες και ο αριθμός των πτερυγίων (34).

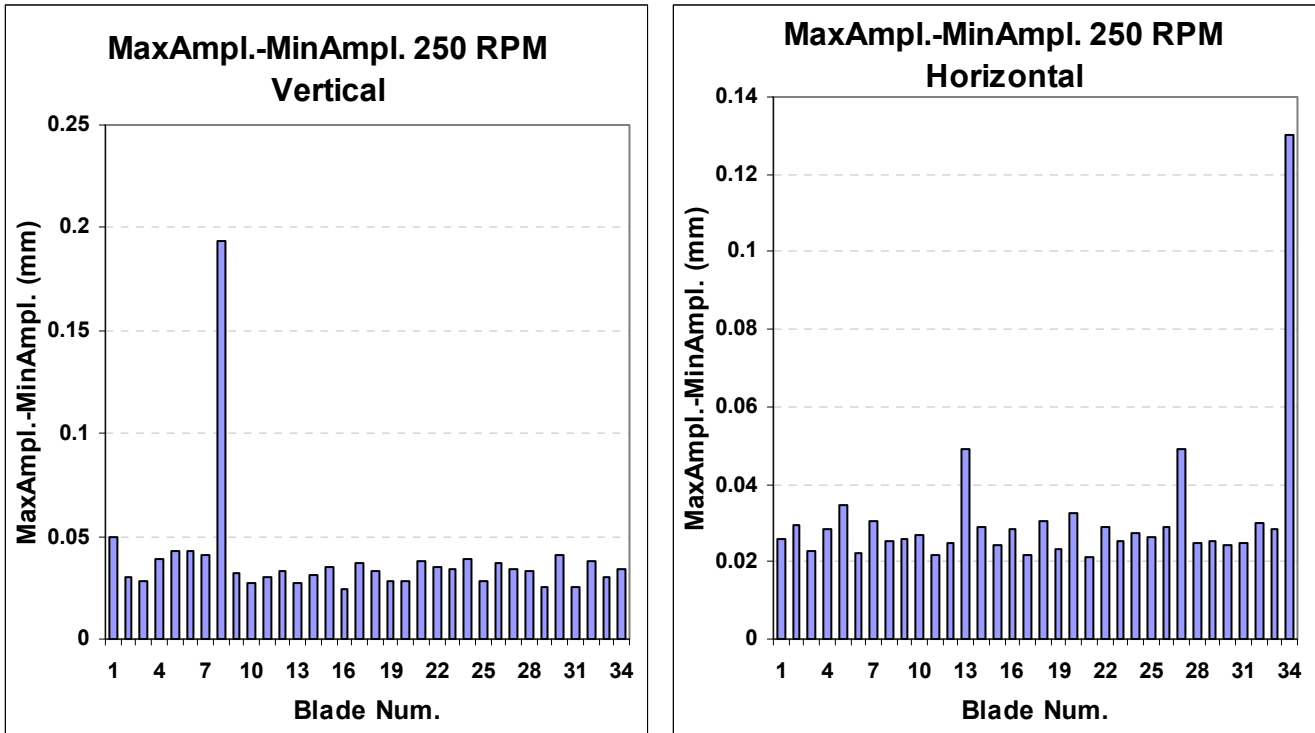
Παρακάτω λοιπόν, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για τη 2^η μόνο πτερωτή, καθώς για τη 1^η πτερωτή τα αποτελέσματα είναι παρόμοια. Επίσης, για τη 2^η πτερωτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των χρονοσειρών για την κατακόρυφη και οριζόντια ταλάντωση μόνο για τις 250rpm, καθώς 1^{ov}) για τις υπόλοιπες στροφές τα αποτελέσματα είναι παρόμοια, και 2^{ov}) σε αυτές τις στροφές εμφανίζεται μεγάλο το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις σε άλλες στροφές.



Σχήμα Π1.52: Απόσταση (σε mm) κάθε πτερυγίου για κατακόρυφη και οριζόντια ταλάντωση. Παρατηρούμε ότι για την κατακόρυφη ταλάντωση το πτερύγιο 8 έχει το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, ενώ για την οριζόντια ταλάντωση το πτερύγιο 34 έχει τη μεγαλύτερη ταλάντωση.

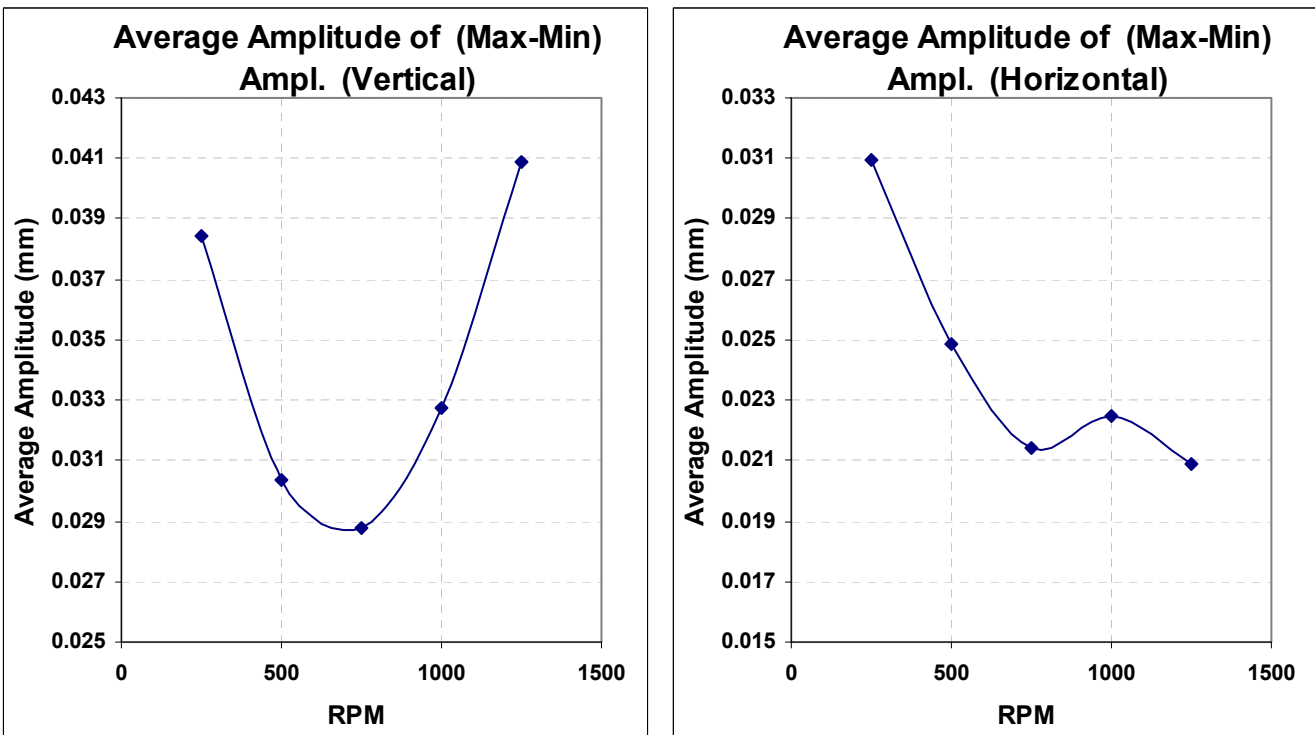


Σχήμα Π1.53: Μέση τιμή της απόστασης (σε mm) κάθε πτερυγίου για κατακόρυφη και οριζόντια ταλάντωση.

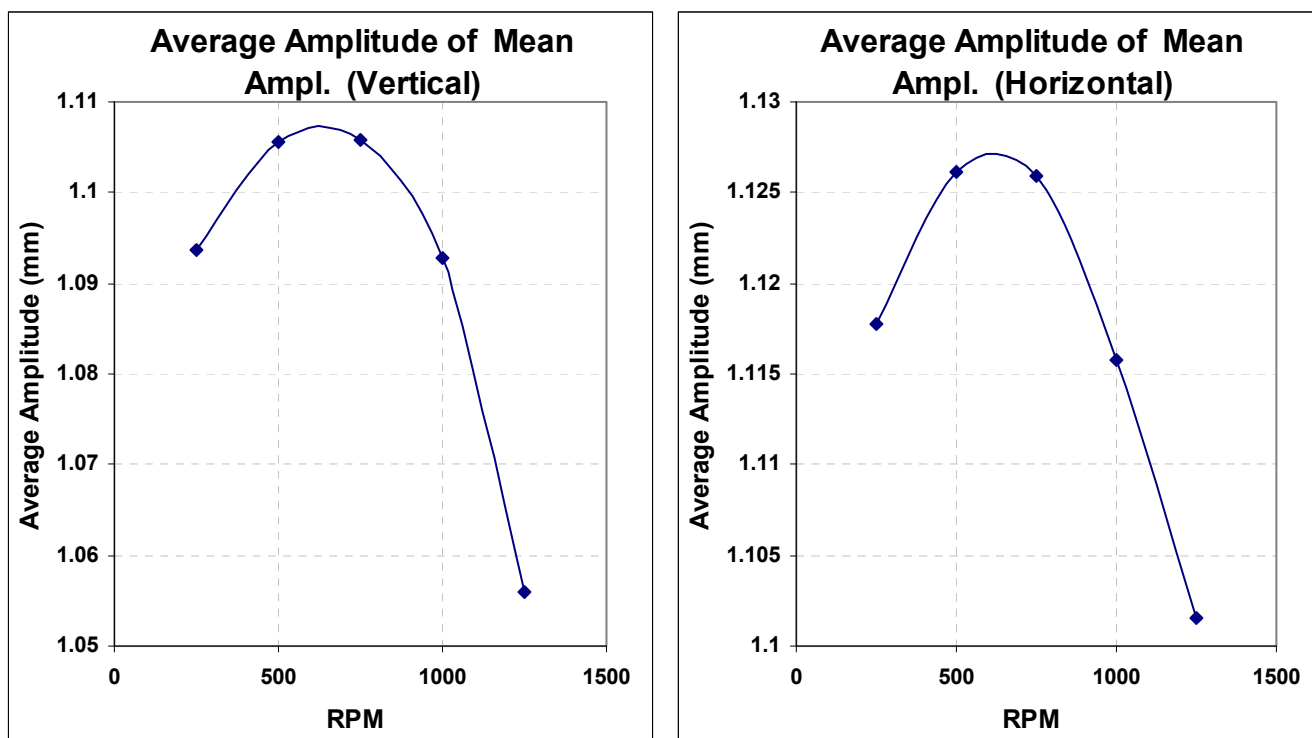


Σχήμα Π1.54: Μέγιστη – ελάχιστη απόσταση (σε mm) κάθε πτερυγίου για κατακόρυφη και οριζόντια ταλάντωση. Παρατηρούμε ότι για την κατακόρυφη ταλάντωση το πτερύγιο 8 έχει το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, ενώ για την οριζόντια ταλάντωση το πτερύγιο 34 έχει τη μεγαλύτερη ταλάντωση. Ουσιαστικά πρόκειται για το ίδιο πτερύγιο αφού $34/4 \approx 8$.

Γενικά, το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης δε ξεπερνά τα $\Delta l = 0.19\text{mm}$.



Σχήμα Π1.55: Μέσος όρος μέγιστης – ελάχιστης απόστασης (σε mm) όλων των πτερυγίων συναρτήσει των στροφών για κατακόρυφη και οριζόντια ταλάντωση. Γενικά, το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης δε ξεπερνά τα $\Delta l = 0.04\text{mm}$.



Σχήμα Π1.56: Μέσος όρος μέσου όρου απόστασης (σε mm) όλων των πτερυγίων συναρτήσει των στροφών για κατακόρυφη και οριζόντια ταλάντωση. Παρατηρούμε ότι για τις στροφές που θα κάνουμε μετρήσεις (πάνω από 500rpm) η μέγιστη μετατόπιση των πτερυγίων ελαττώνεται. Άρα, δε θα έχουμε πρόβλημα επαφής πτερυγίων με το κέλυφος.

Γενικά λοιπόν παρατηρούμε ότι για το σύνολο των πτερυγίων στη περιοχή στροφών που κάνουμε μετρήσεις (μετά τις 500rpm), το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης δε ξεπερνά τα 0.04mm, που είναι πολύ μικρό και δε προκαλεί ανησυχία. Επίσης, από την περιοχή αυτή στροφών και πέρα η μέγιστη μετατόπιση των πτερυγίων ελαττώνεται. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι δε θα έχουμε κάποιο πρόβλημα επαφής πτερυγίου στο κέλυφος για το αξονικό διάκενο του 1mm.

Π2

Ψηφιοποίηση γεωμετρίας πτερυγίων

Π2.1 Ανάγκη για ψηφιοποίηση γεωμετρίας πτερυγίων.

Η ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των πτερυγίων έγινε για τους εξής λόγους :

1^{ον}) Ένα βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος της ροής που θέλουμε να μετράμε στη διάταξη είναι οι γωνίες πρόσπτωσης καθ' ύψος των πτερυγίων και για τους δύο ρότορες. Ως γνωστόν η γωνία πρόσπτωσης είναι η διαφορά της γωνίας μετάλλου του πτερυγίου από τη σχετική γωνία ροής. Έτσι, απαραίτητη είναι η γνώση της καθ' ύψος του πτερυγίου διανομής, της εφαιπόμενης της μέσης γραμμής κυρτότητας στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής.

2^{ον}) Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα από υπολογιστικά μοντέλα της ροής είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την καλύτερη κατανόηση της φυσικής της ροής και κατ' επέκταση για τον καλύτερο σχεδιασμό μιας διάταξης. Από αυτή τη σκοπιά, η γνώση της γεωμετρίας των πτερυγίων δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της ροής με κάποιο πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) αρχικά στις δύο διαστάσεις (2D) στη μέση ακτίνα, αλλά και στις τρεις διαστάσεις (3D).

Π2.2 Επιλογή τρόπου ψηφιοποίησης των πτερυγίων.

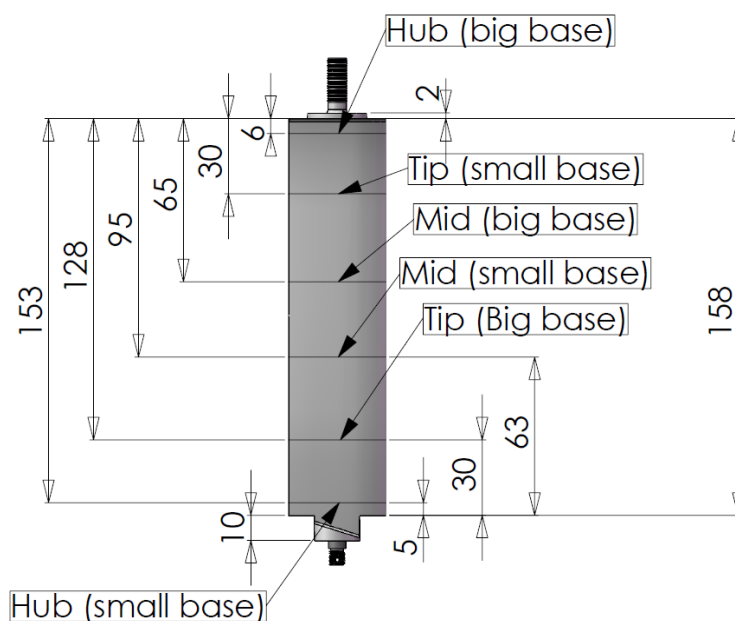
Η πρώτη σκέψη ήταν να γίνει η ψηφιοποίηση της γεωμετρίας των πτερυγίων με χρήση του σαρωτή 3Δ σάρωσης του E.Θ.Σ.. Όμως, λόγω της πολυπλοκότητας της μεθόδου αυτής αποφασίσαμε να κόψουμε τα πτερύγια σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος τους και να κάνουμε 2Δ σάρωση της κάθε αεροτομής κάθε θέσης. Έτσι, μέσω παρεμβολών μεταξύ των αεροτομών καθ' ύψος του πτερυγίου μπορούμε να βρούμε την γεωμετρία σε ένα ύψος του πτερυγίου στο οποίο δεν έχουμε κάνει ψηφιοποίηση. Παράλληλα, με τη μέθοδο αυτή έχουμε πιο γρήγορα αποτελέσματα για τη γεωμετρία της αεροτομής στη μέση ακτίνα που ψηφιοποιήσαμε, ώστε να μπορέσουμε παράλληλα με τις πειραματικές μετρήσεις να έχουμε κάποια αποτελέσματα για τη ροή από κάποιο CFD πρόγραμμα. Όσον αφορά στη συστροφή του πτερυγίου, ο τρόπος υπολογισμού της έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2.4.2 στην παράγραφο «Ρύθμιση της επιθυμητής γωνίας κλίσης των πτερυγίων».

Εκ των υστέρων βέβαια, πρέπει να σημειώσουμε ότι η 3Δ σάρωση των πτερυγίων είναι απαραίτητη, καθώς μόνο έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε με ικανοποιητική ακρίβεια την συστροφή του πτερυγίου, το εάν έχει ή όχι κάποια δίδρο γωνία, ή κάποια οπισθόκλιση. Με άλλα λόγια, μόνο με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να γνωρίζουμε τη σχετική θέση των αεροτομών μεταξύ τους καθ' ύψος των πτερυγίων.

Π2.3 Ψηφιοποίηση των αεροτομών.

Τα πτερύγια των περωτών έχουν προέλθει από πτερύγια της 3^{ης} βαθμίδας στατόρων του κινητήρα J-79. Στη διάταξή μας, οι περωτές έχουν 34 πτερύγια η κάθε μία, έτσι χρειαστήκαμε συνολικά 68 πτερύγια του J-79 τα οποία κόπηκαν έτσι ώστε τα πτερύγια της 1^{ης} περωτής να έχουν τη μικρή βάση πτερυγίων που αντιστοιχεί σε αεροτομή μικρού πάχους στο hub, ενώ τα πτερύγια της 2^{ης} περωτής να έχουν τη μεγάλη βάση που αντιστοιχεί σε παχιά αεροτομή στο hub.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, το πτερύγιο του J-79 κόπηκε σε τέτοιες θέσεις ώστε να έχουμε αεροτομές προς ψηφιοποίηση όσο το δυνατόν κοντά στο hub, στη μέση ακτίνα R_m και στο tip του πτερυγίου κάθε ρότορα. Οι θέσεις που κόπηκε το πτερύγιο του J-79 φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα Π2.1. Να σημειώσουμε ότι το κανάλι ροής έχει ύψος 124.5mm.

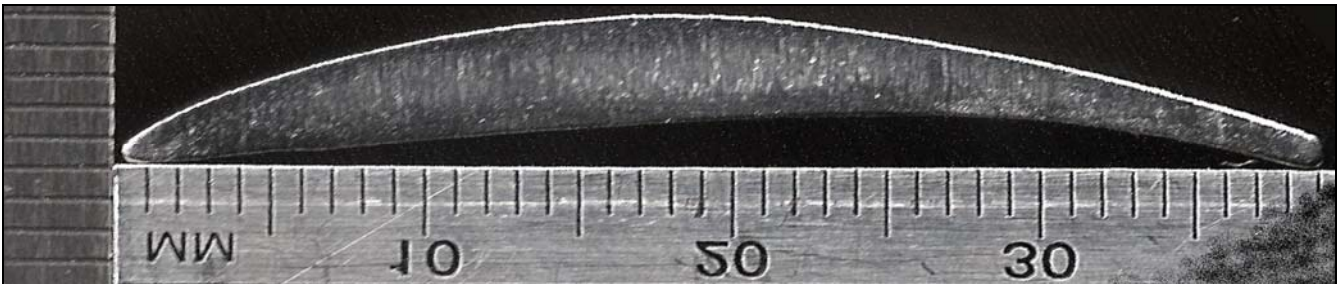


Σχήμα Π2.1: Θέσεις κατά το εκπέτασμα του πτερυγίου J-79 που έγινε ψηφιοποίηση των αεροτομών.

Π2.3.1 Μέθοδος ψηφιοποίησης.

Για να ψηφιοποιήσουμε τις επιμέρους αεροτομές, τοποθετήσαμε τη κάθε μια στο γυαλί του σαρωτή (scanner) μαζί με δύο χάρακες, με τέτοιο τρόπο ώστε ο ένας χάρακας να ακουμπά στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής ώστε να είναι σχεδόν παράλληλος με τη χορδή, και ο άλλος να είναι κάθετος σε αυτόν. Το αποτέλεσμα της σάρωσης φαίνεται στο Σχήμα Π2.2. Στη συνέχεια, μέσω προγράμματος ψηφιοποίησης (digitizer) ορίσαμε μέσω των γραμμών κάθε χάρακα τις διαστάσεις του συστήματος συντεταγμένων, του οποίου την αρχή των αξόνων τοποθετήσαμε στην ακμή πρόσπτωσης. Η ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής επιλέχθηκαν ως τα σημεία εκείνα του περιγράμματος της

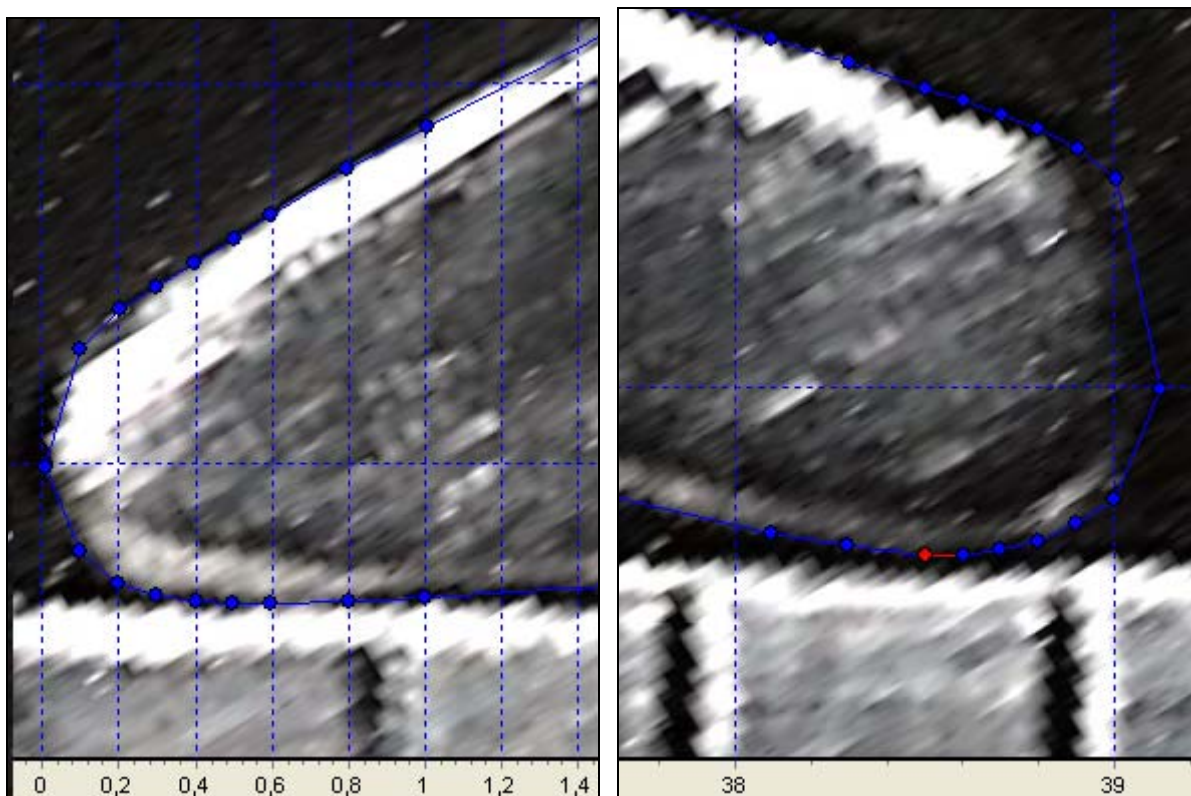
αεροτομής με τη μικρότερη και μεγαλύτερη τετμημένη αντίστοιχα. Έτσι, η αεροτομή περιστράφηκε όσο χρειαζόταν ώστε η ευθεία που ενώνει την ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής (χορδή) να ταυτίζεται με τον άξονα τετμημένων.



Σχήμα Π2.2: Η αεροτομή όπως προκύπτει από τη σάρωση και είναι έτοιμη για ψηφιοποίηση.

Στη συνέχεια, πήραμε σημεία επάνω στο περίγραμμα της αεροτομής ξεκινώντας από την ακμή πρόσπτωσης, συνεχίζοντας στην πάνω γραμμή (πλευρά υποπίεσης – suction side), έπειτα στην ακμή εκφυγής και τέλος στην κάτω γραμμή (πλευρά υπερπίεσης – pressure side) με το τελευταίο σημείο να είναι πάλι πάνω στην ακμή πρόσπτωσης. Συνήθως στις υποηχητικές αεροτομές στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής προσαρμόζεται τόξο κύκλου για ένα αξονικό μήκος περίπου 0.5% της χορδής^{[2],[3]}. Η χορδή στις αεροτομές των πτερυγίων της διάταξης είναι περίπου 39mm, συνεπώς το κυκλικό τόξο θα προσαρμόζεται περίπου στα 0.2mm. Για το λόγο αυτό, στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής, για την πάνω και κάτω πλευρά της αεροτομής πήραμε σημεία ανά 0.1mm και λόγω της μεγάλης κλίσης της διανομής πάχους κοντά στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής πήραμε σημεία ανά 0.1mm για ένα μήκος 0.6mm και στη συνέχεια 2 επιπλέον σημεία ανά 0.2mm (βλ. και Σχήμα Π2.3). Όλα τα υπόλοιπα σημεία που πήραμε είναι ανά 1mm. Τα αντίστοιχα σημεία της πάνω και κάτω πλευράς έχουν τις ίδιες τετμημένες. Για κάθε αεροτομή, πήραμε 103 σημεία, εκ των οποίων το 1^ο είναι πάνω στην ακμή πρόσπτωσης, τα επόμενα 50 στην επάνω πλευρά, το επόμενο στην ακμή εκφυγής, τα επόμενα 50 στην κάτω πλευρά και το τελευταίο στην ακμή πρόσπτωσης. Με την ψηφιοποίηση των αεροτομών, οι συντεταγμένες τους αποθηκεύονται σε αρχείο δεδομένων (.dat) για περαιτέρω επεξεργασία.

Μετά την ψηφιοποίηση κάθε αεροτομής, απεικονίσαμε γραφικά τις συντεταγμένες και μεγεθύνοντας το διάγραμμα διορθώσαμε χειροκίνητα τη θέση κάποιων σημείων ώστε να έχουμε ομαλότερη καμπύλη.



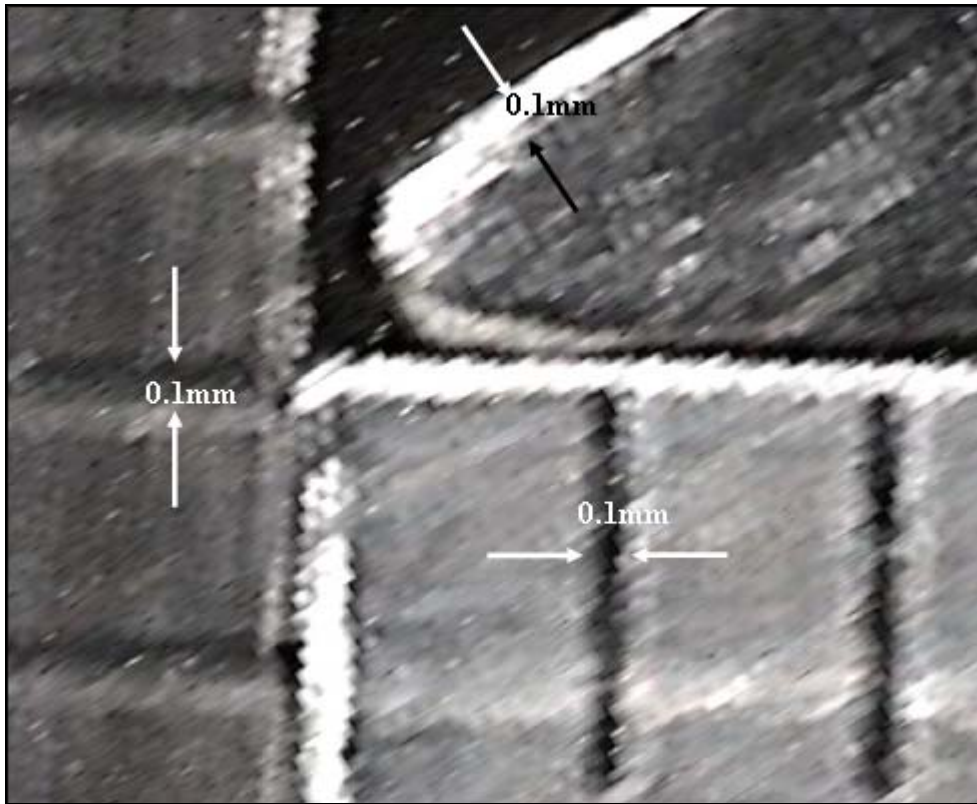
Σχήμα Π2.3: Ψηφιοποίηση των αεροτομών στην ακμή πρόσπτωσης (αριστερά) και εκφυγής (δεξιά).

Π2.3.2 Σφάλμα από την ψηφιοποίηση.

Για την εκτίμηση του σφάλματος της ψηφιοποίησης των αεροτομών, θεωρήσαμε ότι το σφάλμα από την σάρωση είναι αμελητέο μπροστά σε αυτό που προκαλείται από τον χειροκίνητο ορισμό των διαστάσεων του συστήματος συντεταγμένων στο πρόγραμμα ψηφιοποίησης.

Η μόνη πηγή συστηματικού σφάλματος που λάβαμε υπ' όψιν είναι αυτή που προκαλείται από τα πάχη γραμμών του χάρακα και του περιγράμματος της αεροτομής. Όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα Π2.4 τα πάχη των γραμμών του χάρακα και του περιγράμματος είναι $\delta=0.1\text{mm}$. Κατά την ψηφιοποίηση προσπαθήσαμε να ορίσουμε τις διαστάσεις του σ.σ. τοποθετώντας τις κατακόρυφες ευθείες σταθερής τετμημένης και τεταγμένης στο κέντρο των γραμμών (ανά mm) του κάθε χάρακα. Θεωρώντας μηδενικό το σφάλμα υποδιαίρέσεων του κάθε χάρακα, η διακριτική μας ικανότητα μας επιτρέπει να πούμε ότι το σφάλμα για τα πάχη γραμμών του χάρακα κατά x και y άξονα είναι $\sigma_{x1}=\sigma_{y1}=\delta/3=\pm 0.033\text{mm}$. Όπως φαίνεται παραπάνω στο Σχήμα Π2.3 τα σημεία που παίρναμε βρίσκονται στο άκρο του περιγράμματος, άρα με βάση τη διακριτική μας ικανότητα μπορούμε να πούμε ότι το σφάλμα για το πάχος του περιγράμματος της αεροτομής κατά x και y άξονα είναι $\sigma_{x2}=\sigma_{y2}=\delta/5=\pm 0.02\text{mm}$.

Έτσι λοιπόν, το συνολικό σφάλμα κατά την x και y διεύθυνση μπορεί να προκύψει ως : $\sigma_x = \sigma_y = \sqrt{\sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2} = \pm 0.039mm$.



Σχήμα Π2.4: Πάχη (δ) γραμμών του χάρακα και του περιγράμματος από τη σάρωση της αεροτομής, που προσδίδουν σφάλμα στην ψηφιοποίηση.

Π2.3.3 Διερεύνηση της διανομής πάχους των αεροτομών.

Η διανομή πάχους των αεροτομών των πτερυγίων προέκυψε με την αφαίρεση της τεταγμένης των σημείων της κάτω πλευράς από την τεταγμένη των σημείων της πάνω πλευράς, προφανώς μεταξύ των σημείων με ίδια τετμημένη. Ο τρόπος αυτός υπολογισμού της διανομής πάχους δεν είναι απόλυτα σωστός, καθώς η διανομή πάχους ορίζεται ως η απόσταση κάθε σημείου της κάτω πλευράς από το σημείο εκείνο της πάνω πλευράς ώστε και τα δύο σημεία να βρίσκονται επάνω σε ευθεία κάθετη στην εφαπτομένη της μέσης γραμμής κυρτότητας. Παρ' όλα αυτά ο τρόπος που υπολογίσαμε τη διανομή πάχους είναι αρκετά ικανοποιητικός για τον τρόπο με τον οποίο θα τη χρησιμοποιήσουμε.

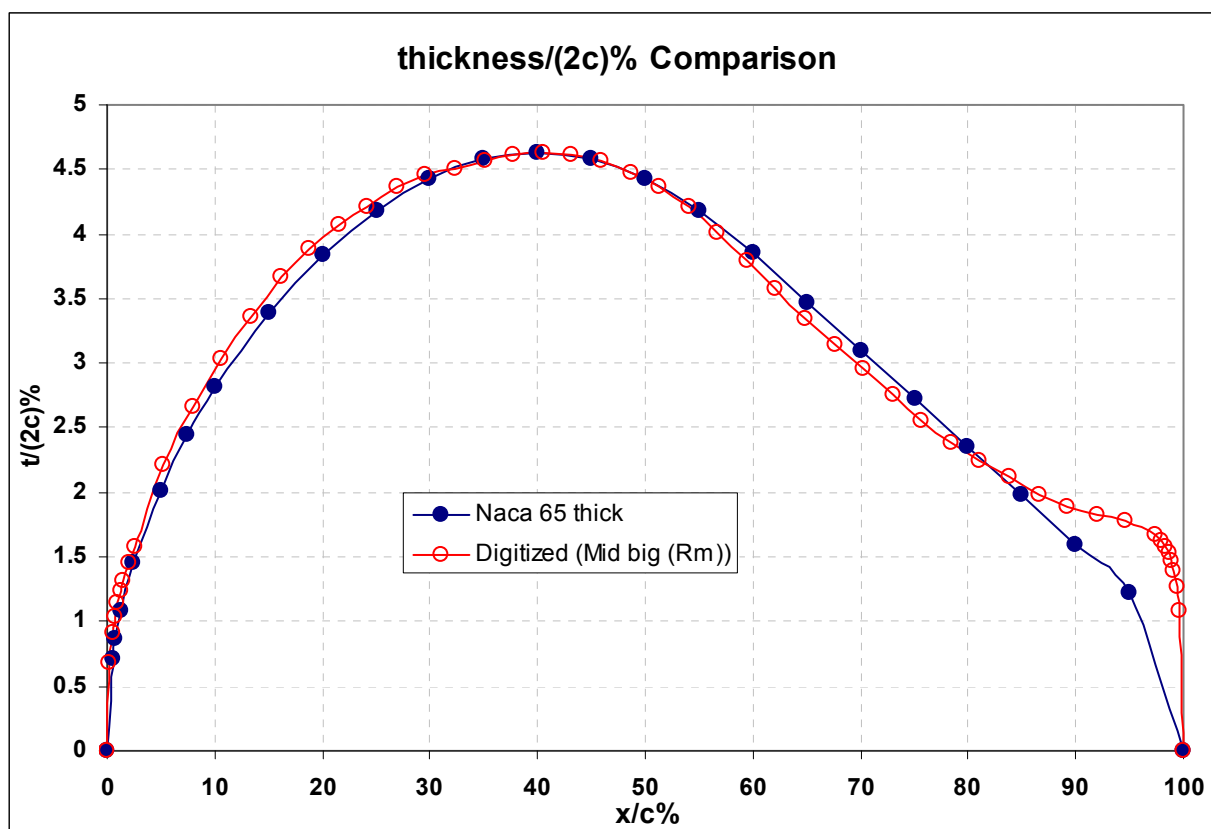
Συγκρίναμε τη διανομή πάχους των αεροτομών που ψηφιοποιήσαμε με τη διανομή πάχους της τυποποιημένης NACA-65 thick που αντλήσαμε από το [2] και το [16]. Ο λόγος που επιχειρήσαμε τη σύγκριση αυτή είναι λόγω της αμερικάνικης προέλευσης του κινητήρα J-79, άρα και των πτερυγίων του, αλλά παράλληλα και λόγω

της χρονολογίας κατασκευής του (1955) κατά την οποία η χρήση αυτού του τύπου αεροτομής σε πτερυγώσεις συμπιεστών ήταν ευρεία.

Η ιδέα ήταν ότι σε περίπτωση ταύτισης των διανομών πάχους τότε θα μπορούσαμε χωρίς περαιτέρω ψηφιοποίηση να χρησιμοποιούμε τη διανομή πάχους της Naca-65 για την αποτύπωση της γεωμετρίας των πτερυγίων.

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα Π2.5, η διανομή του αδιάστατου ως προς τη χορδή μισού πάχους της αεροτομής για τη ψηφιοποιημένη αεροτομή είναι αρκετά όμοια με τη διανομή πάχους για τη Naca-65. Παρατηρούμε όμως ότι η ψηφιοποιημένη αεροτομή είναι πολύ παχύτερη από τη Naca-65 από το 75-100% της χορδής. Επίσης, παρατηρούμε ότι το μέγιστο πάχος εμφανίζεται στο 40% της χορδής.

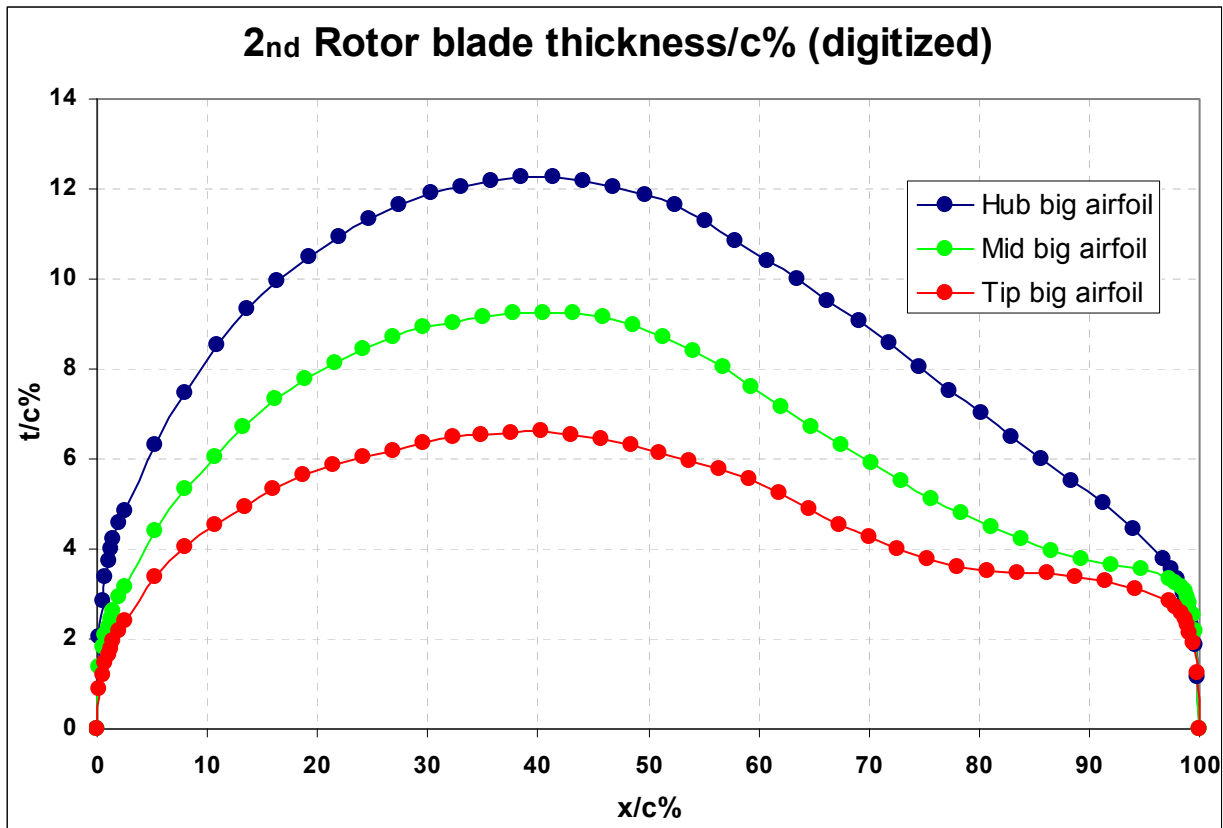
Να σημειώσουμε ότι ίδια συμπεριφορά παρατηρείται για όλες τις αεροτομές καθ' ύψος του πτερυγίου που ψηφιοποιήσαμε, και γι' αυτό δεν παραθέτουμε επιπλέον διαγράμματα σύγκρισης.



Σχήμα Π2.5: Σύγκριση διανομής αδιάστατου ως προς της χορδή μισού πάχους ψηφιοποιημένης αεροτομής με διανομή πάχους Naca 65 thick.

Για λόγους πληρότητας, παραθέτουμε στο Σχήμα Π2.6 για το 2^ο ρότορα (μεγάλη βάση πτερυγίων) τη διανομή καθ' ύψος του πτερυγίου της διανομής αδιάστατου ως προς τη χορδή πάχους των αεροτομών. Παρατηρούμε και εδώ ότι για όλες τις αεροτομές, το μέγιστο πάχος βρίσκεται στο 40% της χορδής. Παράλληλα, όσο λεπταίνει η αεροτομή,

το πάχος κοντά στην ακμή πρόσπτωσης παραμένει υψηλό, προφανώς και για κατασκευαστικούς λόγους.



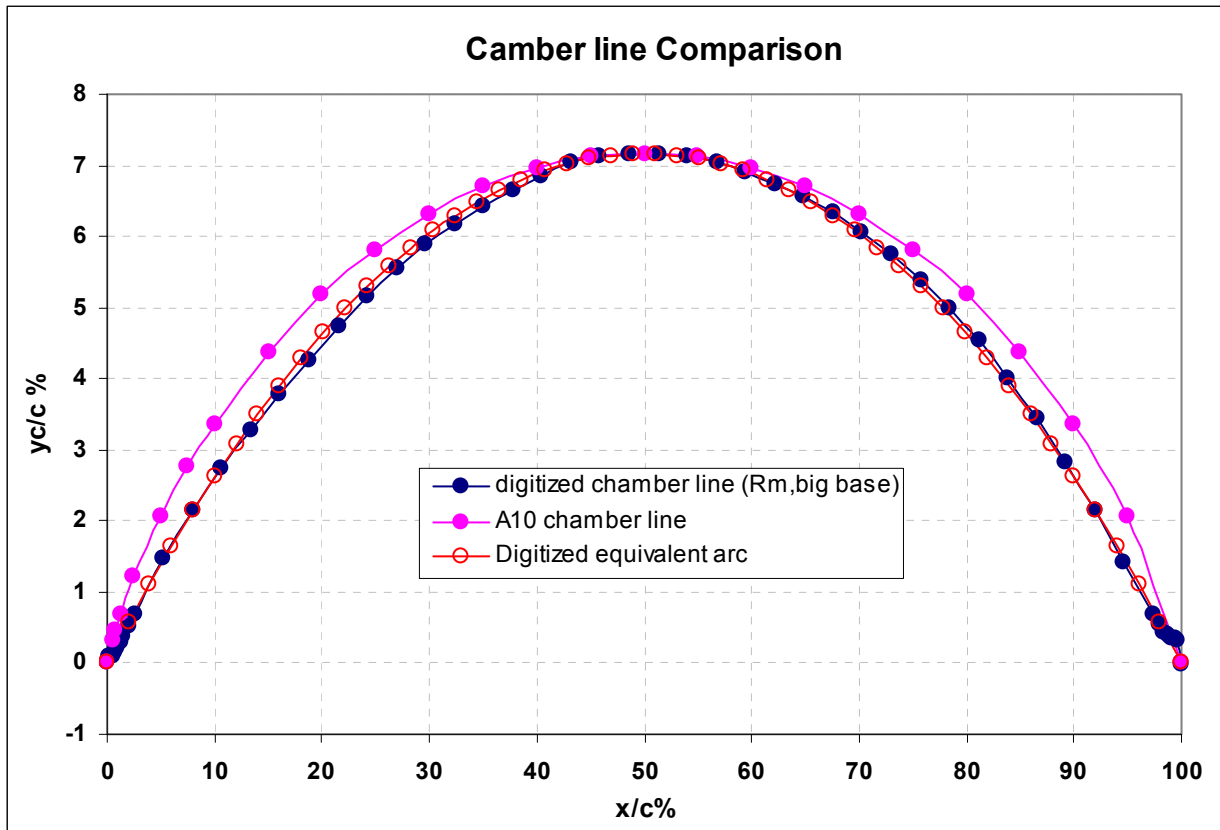
Σχήμα Π2.6: Σύγκριση διανομής πάχους ψηφιοποιημένων αεροτομών στο Hub, R_m και Tip των πτερυγίων του 2^{ου} ρότορα (μεγάλη βάση πτερυγίων).

Π2.3.4 Διερεύνηση της μέσης γραμμής κυρτότητας των αεροτομών.

Για τον υπολογισμό της διανομής της μέσης γραμμής κυρτότητας κάθε αεροτομής προσθέσαμε τη διανομή μισού πάχους στις τεταγμένες της κάτω γραμμής κάθε αεροτομής.

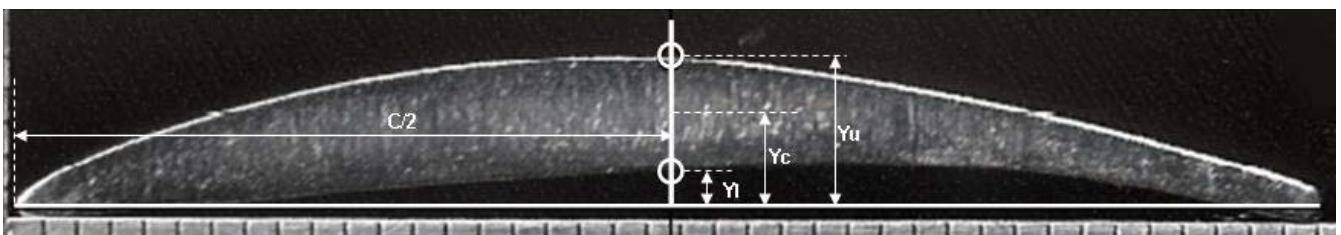
Οι πιο συνηθισμένες διανομές μέσης γραμμής κυρτότητας για αεροτομές πτερυγίων συμπίεστη ειδικά για τη χρονολογία σχεδίασης του κινητήρα J-79, είναι η κυκλικού τόξου (circular arc) και η Naca-A10, οι οποίες είναι συμμετρικές ως προς την μεσοκάθετο της χορδής.

Στο Σχήμα Π2.7 παρακάτω, συγκρίνουμε τη διανομή της μέσης γραμμής κυρτότητας της ψηφιοποιημένης αεροτομής με τη διανομή μέσης γραμμής κυρτότητας Naca-A10 (που αντλήσαμε από το [2] και το [16]) και του ισοδύναμου κυκλικού τόξου. Παρατηρούμε ότι η μέση γραμμή κυρτότητας της ψηφιοποιημένης αεροτομής ταυτίζεται με το κυκλικό τόξο. Αυτό ισχύει για όλες τις αεροτομές που ψηφιοποιήσαμε, γι' αυτό δεν παραθέτουμε επιπλέον διαγράμματα.



Σχήμα Π2.7: Σύγκριση μέσης γραμμής κυρτότητας (Camber line) της ψηφιοποιημένης αεροτομής με αυτές τύπου Naca-A10 και του ισοδύναμου κυκλικού τόξου.

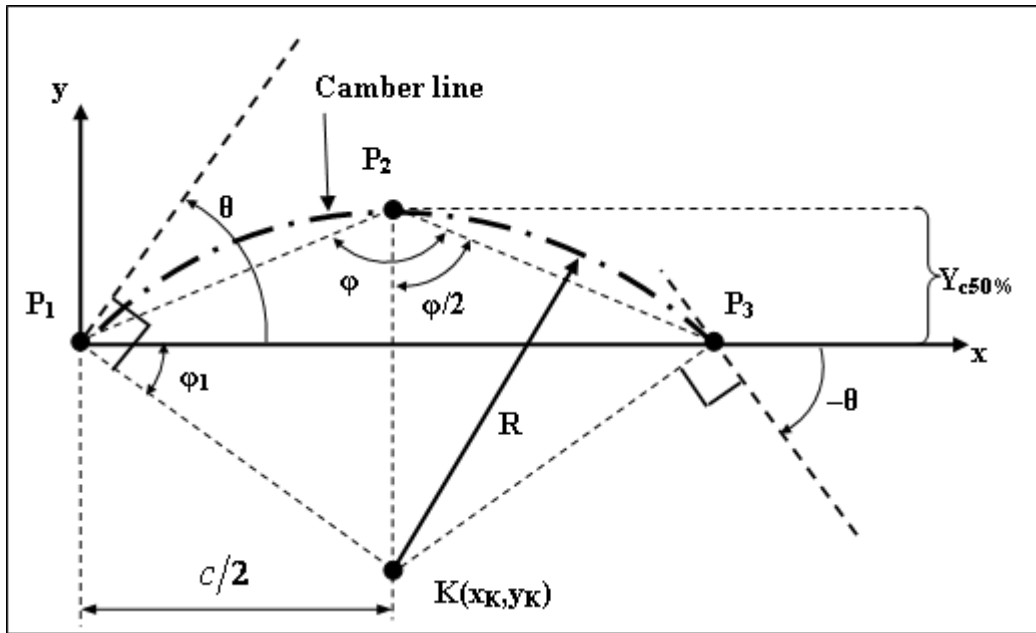
Εφ' όσον λοιπόν η μέση γραμμή κυρτότητας των αεροτομών είναι κυκλικό τόξο, τότε αρκεί σε όλες τις αεροτομές να μετρήσουμε στο 50% της χορδής την τεταγμένη Y_u της πάνω γραμμής και την τεταγμένη Y_l της κάτω γραμμής όπως φαίνεται στο Σχήμα Π2.8. Η τεταγμένη Y_c της μέσης γραμμής προκύπτει ως : $Y_c = (Y_u + Y_l)/2$.



Σχήμα Π2.8: Οι μετρήσεις επί της αεροτομής ώστε να προκύψει το Y/c στο 50% της χορδής κατά το εκπέτασμα του πτερυγίου J-79 για τη μέση γραμμή κυρτότητας, την πλευρά υπερπίεσης και την πλευρά υποπίεσης.

Π2.3.5 Υπολογισμός της καθ' ύψος διανομής των γωνιών μετάλλου των πτερυγίων.

Εφ' όσον λοιπόν για κάθε αεροτομή γνωρίζουμε το μήκος χορδής και το Y/c στο 50% της χορδής, τότε μπορούμε να βρούμε τα πλήρη γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μέσης γραμμής κυρτότητας (κυκλικό τόξο) όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα Π2.9 και στις σχέσεις (Π2.1) έως (Π2.5).



Σχήμα Π2.9: Γεωμετρία της μέσης γραμμής κυρτότητας των αεροτομών.

$$\varphi = 2 \arctan \left(\frac{c/2}{Y_{c50\%}} \right) = 2 \arctan \left(\frac{0.5}{Y_{c50\%}/c} \right) \quad (\text{Π2.1})$$

$$R = \frac{\overline{P_1 P_2}}{2 \sin \varphi} = \frac{c}{2 \sin \varphi} \Rightarrow \frac{R}{c} = \frac{0.5}{\sin \varphi} \quad (\text{Π2.2})$$

$$x_K = \frac{c}{2}, \quad y_K = -R + Y_{c50\%} \quad (\text{Π2.3})$$

$$\varphi_1 = \arctan \left(\frac{R - Y_{c50\%}}{c/2} \right) = \arctan \left(\frac{\frac{R}{c} - \frac{Y_{c50\%}}{c}}{0.5} \right) \quad (\text{Π2.4})$$

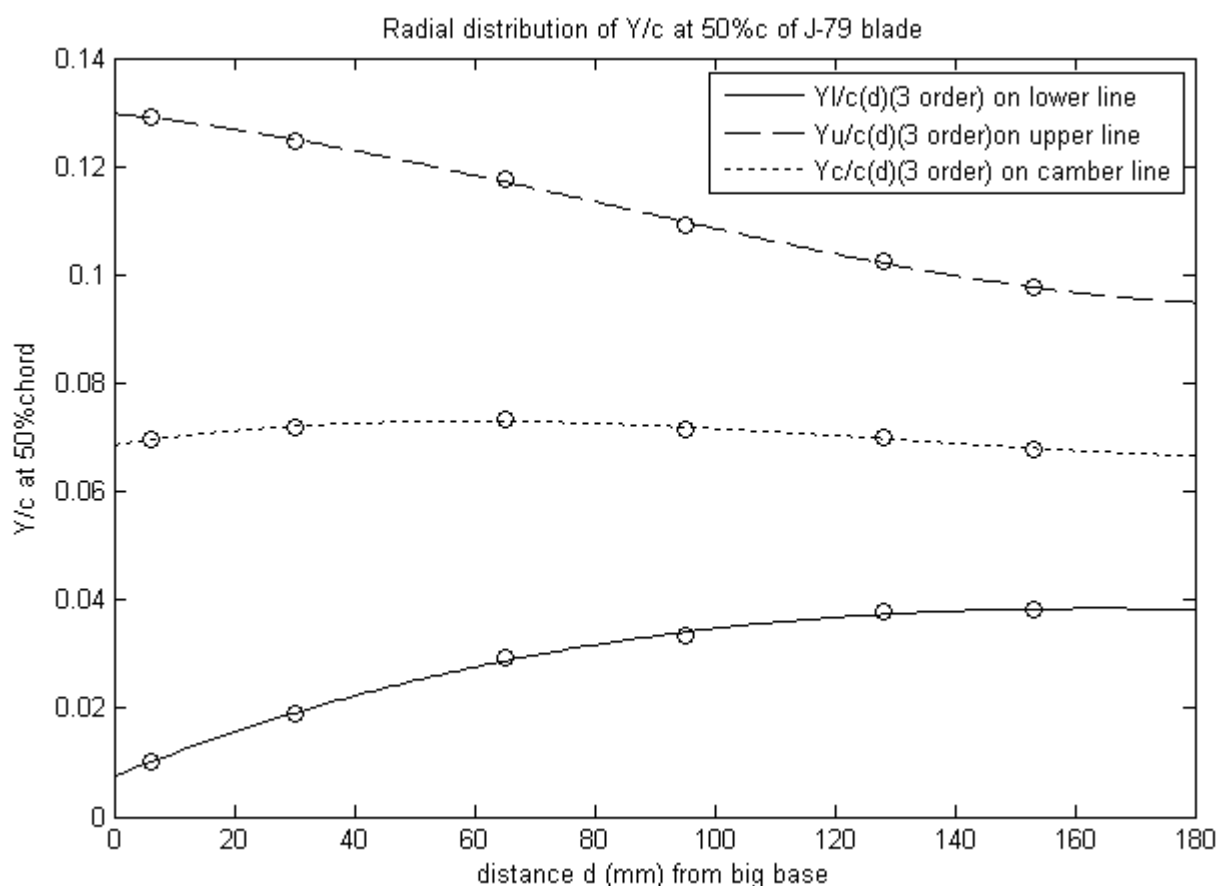
$$\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi_1 \quad (\text{Π2.5})$$

Ως γνωστόν, οι γωνίες μετάλλου είναι οι γωνίες που σχηματίζουν οι εφαπτόμενες της μέσης γραμμής κυρτότητας στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής με την άξονα συμμετρίας του συμπιεστή. Εφ' όσον η μέση γραμμή κυρτότητας όλων των αεροτομών είναι κυκλικό τόξο, τότε σύμφωνα με το Σχήμα Π2.9 παραπάνω η γωνία που σχηματίζει

η εφαπτομένη στην ακμή πρόσπτωσης με την χορδή είναι θ (σχέση (Π2.5)), ενώ για στην ακμή εκφυγής είναι $-\theta$ λόγω συμμετρίας. Έτσι, εάν η γωνία κλίσης (stagger) της αεροτομής σε κάποιο ύψος d του πτερυγίου είναι γ , τότε η γωνία μετάλλου στην ακμή πρόσπτωσης β_1' και η γωνία μετάλλου στην ακμή εκφυγής β_2' θα δίνονται από τη σχέση (Π2.6).

$$\beta_1' = \gamma + \theta, \quad \beta_2' = \gamma - \theta \quad (\text{Π2.6})$$

Η καθ' ύψος διανομή της αδιάστατης ως προς τη χορδή τεταγμένης της μέσης γραμμής κυρτότητας στο 50% της χορδής $Y_{c50\%}/c$, προσεγγίστηκε με πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού και φαίνεται στο Σχήμα Π2.10 όπου d είναι η απόσταση της αεροτομής από τη μεγάλη βάση του πτερυγίου J-79. Αντίστοιχος υπολογισμός έγινε για την επάνω και κάτω γραμμή των αεροτομών. Οι συντελεστές των πολυωνύμων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π2.1).



Σχήμα Π2.10: Διανομή του Y/c στο 50% της χορδής κατά το εκπέτασμα του πτερυγίου J-79 για τη μέση γραμμή κυρτότητας, την πλευρά υπερπίεσης και την πλευρά υποπίεσης.

$$Y_{50\%}/c = a_3 d^3 + a_2 d^2 + a_1 d + a_0$$

	a_3	a_2	a_1	a_0
$Y_{c50\%}/c$	4.54775076e009	1.791017484e006	0.000163422322	0.06865367094
$Y_{150\%}/c$	2.507737207e009	1.972575647e006	0.0004442866676	0.007560259387
$Y_{u50\%}/c$	6.587764313e009	1.609459322e006	0.0001174420237	0.1297470825

Πίνακας Π2.1: Συντελεστές πολυωνύμων για την ακτινική διανομή του $Y_{50\%}$ της πάνω, κάτω και μέσης γραμμής.

Οι διανομή της γωνίας κλίσης των αεροτομών καθ' ύψος των πτερυγίων προκύπτει από τη συστροφή του πτερυγίου, ο τρόπος υπολογισμού της οποίας έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2.4.2. Αρκεί εδώ να αναφέρουμε ότι τα πτερύγια του 1^{ου} ρότορα (μικρή βάση πτερυγίων) έχουν συστροφή 3.9° από το hub έως το tip, και τα πτερύγια του 2^{ου} ρότορα (μεγάλη βάση πτερυγίων) έχουν συστροφή 0° από το hub έως τη μέση ακτίνα R_m και 2.2° από την R_m έως το tip. Έτσι λοιπόν εάν d η ακτινική απόσταση από το hub για κάθε πτερύγιο, τότε για τις γωνίες συστροφής φ_{1twist} και φ_{2twist} των πτερυγίων του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα αντίστοιχα, έχουμε :

$$\varphi_{1twist}(d) = \frac{3.9^\circ}{R_{Tip} - R_{Hub}} d, \quad R_{Tip} - R_{Hub} = 123.5 \text{ mm} \quad (\text{Π2.7})$$

$$\varphi_{2twist}(d) = \begin{cases} 0 & 0 \leq d \leq R_m \\ 0.0355987 \cdot d - 2.19644 & R_m < d \leq R_{Tip} \end{cases} \quad (\text{Π2.8})$$

Εάν η γωνία κλίσης που έχουν ρυθμιστεί τα πτερύγια στη μέση ακτίνα είναι γ_{1Rm} και γ_{2Rm} για τον 1° και 2° ρότορα αντίστοιχα, τότε η γωνία κλίσης των αεροτομών των πτερυγίων σε κάποιο ύψος d , θα είναι :

$$\gamma_1(d) = \gamma_{1Rm} - \frac{3.9^\circ}{2} + \varphi_{1twist}(d) \quad \text{Για τον 1° ρότορα.} \quad (\text{Π2.9})$$

$$\gamma_2(d) = \gamma_{2Rm} - \varphi_{2twist}(d) \quad \text{Για τον 2° ρότορα.} \quad (\text{Π2.10})$$

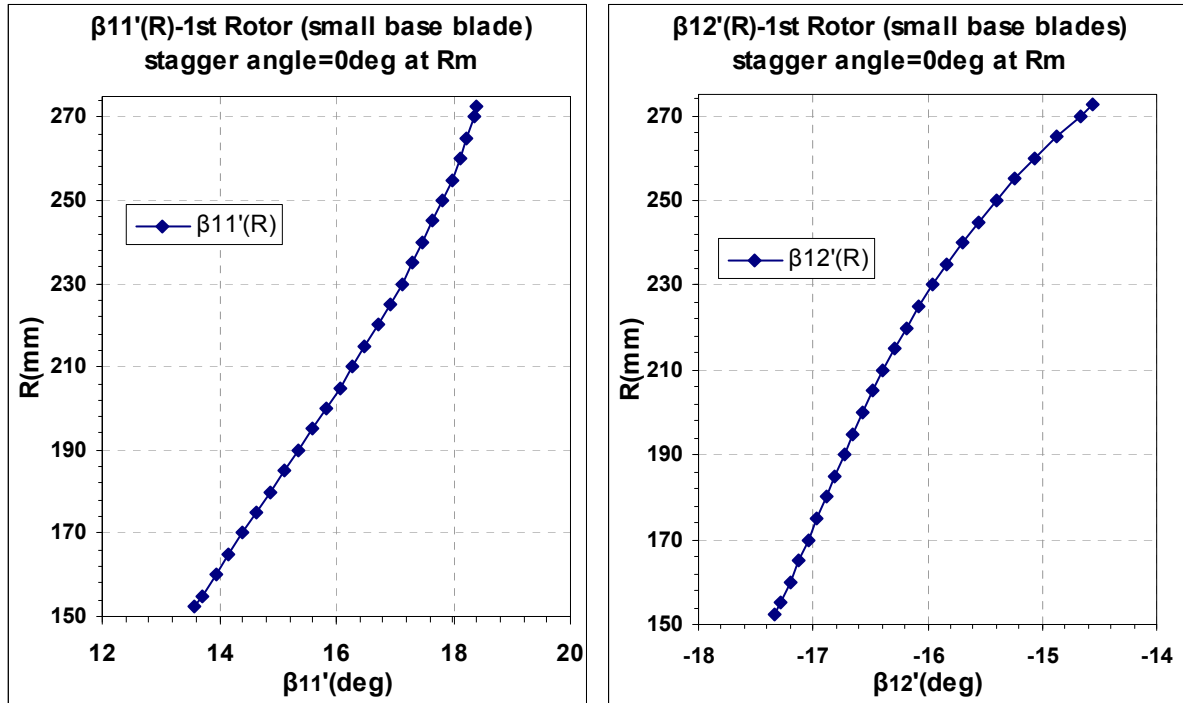
Έτσι, σύμφωνα με τη σχέση (Π2.6), οι γωνίες μετάλλου των αεροτομών καθ' ύψος των πτερυγίων για τον 1° και τον 2° ρότορα, θα είναι :

$$\beta_{11}'(d) = \gamma_1(d) + \theta(158 - d), \quad \beta_{12}'(d) = \gamma_1(d) - \theta(158 - d) \quad \mathbf{1^{ος} \text{ ρότορας.}} \quad (\text{Π2.11})$$

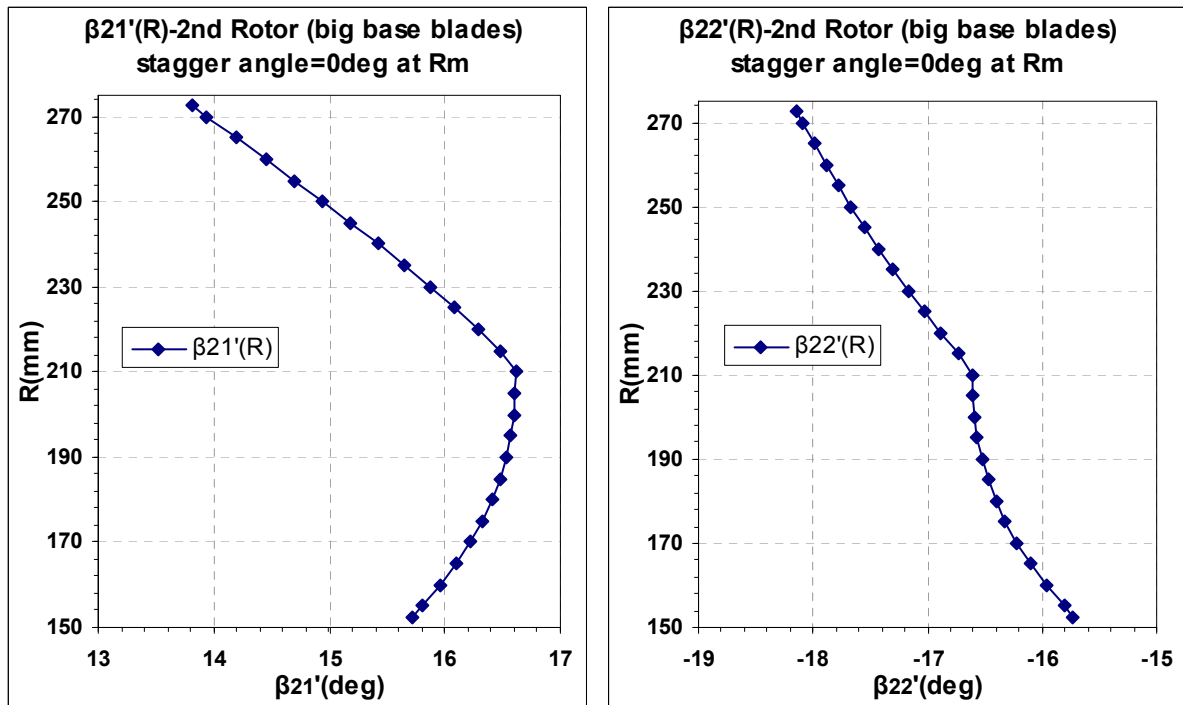
$$\beta_{21}'(d) = \gamma_2(d) + \theta(d), \quad \beta_{22}'(d) = \gamma_2(d) - \theta(d) \quad \mathbf{2^{ος} \text{ ρότορας.}} \quad (\text{Π2.12})$$

Να σημειώσουμε ότι για τα πτερύγια του 1^{ου} ρότορα (μικρή βάση πτερυγίων) χρησιμοποιούμε το $\theta(158-d)$ επειδή το hub των πτερυγίων του είναι το tip ολόκληρου του πτερυγίου J-79. Για το $Y_{c50\%}/c(d)$ ισχύει ότι $d=0 \rightarrow$ στο hub(μεγάλη βάση) του J-79.

Έτσι, οι ακτινικές διανομές των γωνιών μετάλλου των πτερυγίων του 1^{ου} και 2^{ου} ρότορα προκύπτουν από τις σχέσεις (Π2.11) και (Π2.12) και παρουσιάζονται στο Σχήμα Π2.11 και Σχήμα Π2.12 αντίστοιχα, για μηδενική γωνία κλίσης στη μέση ακτίνα R_m .



Σχήμα Π2.11: Ακτινική διανομή των γωνιών μετάλλου των πτερυγίων του 1^{ου} ρότορα (μικρή βάση πτερυγίων).



Σχήμα Π2.12: Ακτινική διανομή των γωνιών μετάλλου των πτερυγίων του 2^{ου} ρότορα (μεγάλη βάση πτερυγίων).

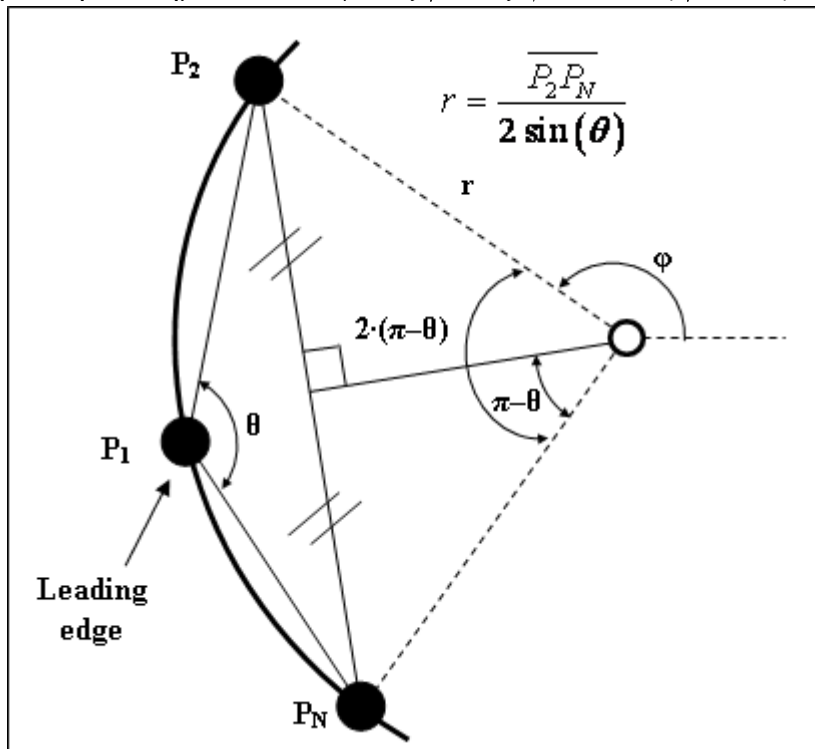
Π2.4 Ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα.

Για τη προσθήκη επιπλέον σημείων στις ψηφιοποιημένες αεροτομές, αλλά και για τη δημιουργία επιπλέον αεροτομών πέρα των ψηφιοποιημένων που θα σχηματίσουν το 3Δ περύγιο, αναπτύχθηκε κώδικας σε Fortran.

Π2.4.1 Προσθήκη επιπλέον σημείων στις ψηφιοποιημένες αεροτομές.

Για την προσθήκη επιπλέον σημείων στις ψηφιοποιημένες αεροτομές χρησιμοποιήσαμε Cubic Splines σε παραμετρική μορφή^[19] για τον καλύτερο έλεγχο των οριακών συνθηκών στην αρχή και το τέλος της καμπύλης παρεμβολής. Για την κάθε αεροτομή αντιστοιχεί μια CSpline στην πάνω πλευρά και μια στην κάτω πλευρά.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η αρχική ιδέα ήταν η προσαρμογή τόξου κύκλου στα τρία πρώτα σημεία στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής, καθώς έτσι είθισται στις τυποποιημένες αεροτομές. Στα υπόλοιπα σημεία στην πάνω και κάτω πλευρά, παρεμβάλλεται μια CSpline. Στο σημείο ένωσης του κυκλικού τόξου με την CSpline επιλέξαμε ως οριακή συνθήκη την ισότητα της πρώτης παραγώγου η οποία είναι γνωστή όταν είναι γνωστή η γεωμετρία του κυκλικού τόξου. Ο υπολογισμός του κυκλικού τόξου στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής είναι απλός όπως φαίνεται και στο Σχήμα Π2.13. Με γνωστές τις συντεταγμένες των σημείων P_1 , P_2 , P_N βρίσκουμε τη γωνία θ και το P_2P_N . Έπειτα, βρίσκουμε την ακτίνα r του κυκλικού τόξου του οποίου το κέντρο βρίσκεται επάνω στη μεσοκάθετο του P_2P_N . Τέλος, βρίσκουμε τη γωνία ϕ και συνεπώς τη κλίση στα σημεία P_1 , P_2 αφού $dy/dx = y'/x' = r \cos \phi / -r \sin \phi = -\cot \phi$.



Σχήμα Π2.13: Γεωμετρία για την προσαρμογή κυκλικού τόξου στην ακμή πρόσπτωσης.

Για την εύρεση επιπλέον σημείων στις αεροτομές χωρίζεται η κάθε γραμμή της αεροτομής σε περιοχές για τις οποίες ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των επιπλέον σημείων. Έτσι, στις περιοχές αυτές διαμερίζονται κατάλληλα τα διαμερίσματα u (από 0 έως 1 μεταξύ δύο κόμβων) και οι συντεταγμένες των επιπλέον σημείων υπολογίζονται από τις σχέσεις (Π2.20) και (Π2.21) μέσω της υπορουτίνας CSplineCoordinates.

$$x(u) = x_i + \left[(x_{i+1} - x_i) - \frac{1}{6} x_{i+1}'' - \frac{1}{3} x_i'' \right] u + \frac{1}{2} x_i'' u^2 + \frac{1}{6} (x_{i+1}'' - x_i'') u^3 \quad (\text{Π2.20})$$

$$y(u) = y_i + \left[(y_{i+1} - y_i) - \frac{1}{6} y_{i+1}'' - \frac{1}{3} y_i'' \right] u + \frac{1}{2} y_i'' u^2 + \frac{1}{6} (y_{i+1}'' - y_i'') u^3 \quad (\text{Π2.21})$$

Ο κώδικας εξάγει αρχεία με τα ζεύγη x'', y'' των Csplines κάθε αεροτομής και προφανώς και τις συντεταγμένες των επιπλέον σημείων (Fulfilled airfoils). Για όλες τις αεροτομές, η ακμή πρόσπτωσης βρίσκεται στην αρχή των αξόνων.

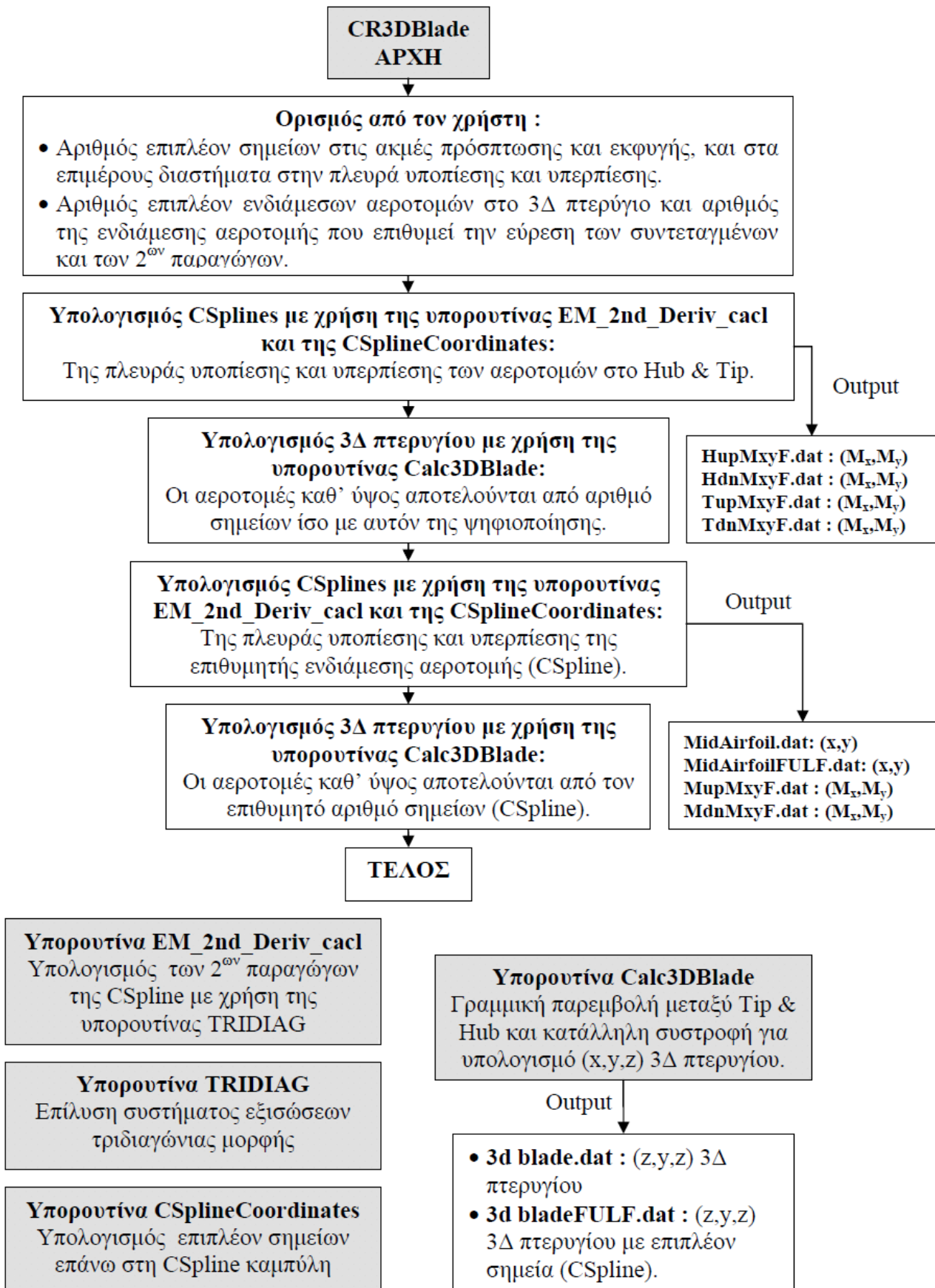
Π2.4.2 Δημιουργία επιπλέον αεροτομών (3Δ πτερύγιο).

Για τη δημιουργία επιπλέον αεροτομών ο κώδικας εκτελεί γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δοθέντων ψηφιοποιημένων αεροτομών στο hub και στο tip, ανάλογα με την ακτινική θέση της προς εύρεση αεροτομής. Η παρεμβολή γίνεται μεταξύ των αντίστοιχων σημείων (ίδια τετμημένη) των δύο αεροτομών. Είσοδος του κώδικα αποτελεί ο αριθμός των επιπλέον αεροτομών που επιθυμεί ο χρήστης και τον αύξον αριθμό αυτής για την οποία επιθυμεί αρχείο εξόδου με τις συντεταγμένες της και τις 2^{es} παραγώγους των Csplines.

Για τη δημιουργία του τρισδιάστατου πτερυγίου, ο κώδικας δέχεται σαν είσοδο 1^{ov}) τη γωνία συστροφής του πτερυγίου η οποία είναι η διαφορά της γωνίας κλίσης της αεροτομής στο tip από τη γωνία κλίσης της αεροτομής στο hub, 2^{ov}) την καθ' ύψος του πτερυγίου διανομή του $Y_{c50\%}$, και 3^{ov}) την καθ' ύψος του πτερυγίου διανομή του μήκους της χορδής. Έχοντας ήδη τις συντεταγμένες της αεροτομής στο hub και στο tip, ο κώδικας αλλάζει τις συντεταγμένες των σημείων της αεροτομής στο tip ώστε το σημείο της μέσης γραμμής κυρτότητας στο 50% της χορδής $Y_{c50\%}$, να ταυτίζεται με το $Y_{c50\%}$ της αεροτομής στο Hub. Στη συνέχεια, περιστρέφει την αεροτομή στο tip κατά γωνία ίση με τη συστροφή του πτερυγίου. Η γεωμετρία αυτή φαίνεται στο Σχήμα Π2.14 και περιγράφεται από τις σχέσεις (Π2.22) έως (Π2.27). Το σύστημα συντεταγμένων x'', y'' αντιστοιχεί στην αεροτομή στο tip, στο οποίο η ακμή πρόσπτωσης βρίσκεται στην αρχή των αξόνων. Ουσιαστικά, ο κώδικας κάνει μετασχηματισμό των συντεταγμένων της αεροτομής στο tip από το σ.σ. x'', y'' στο x, y που είναι το σ.σ. της αεροτομής στο Hub.

Ο κώδικας εξάγει και δύο αρχεία με τις συντεταγμένες (x, y, z) του τρισδιάστατου πτερυγίου που αποτελείται από τις αεροτομές στο tip και στο hub αλλά και τις ενδιάμεσες. Το ένα με αριθμό σημείων ίσο με αυτό της ψηφιοποίησης και το άλλο με επιπλέον σημεία που προκύπτουν από τις Csplines.

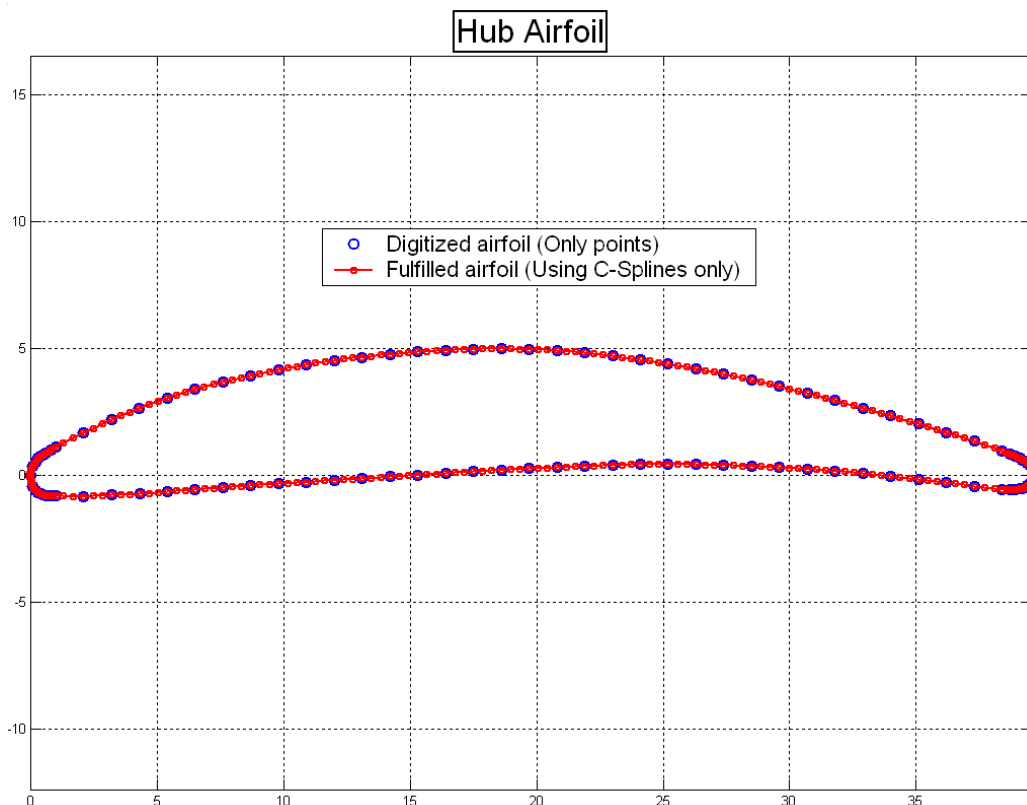
Π2.4.3 Διάγραμμα ροής υπολογιστικού κώδικα CR3DBlade.



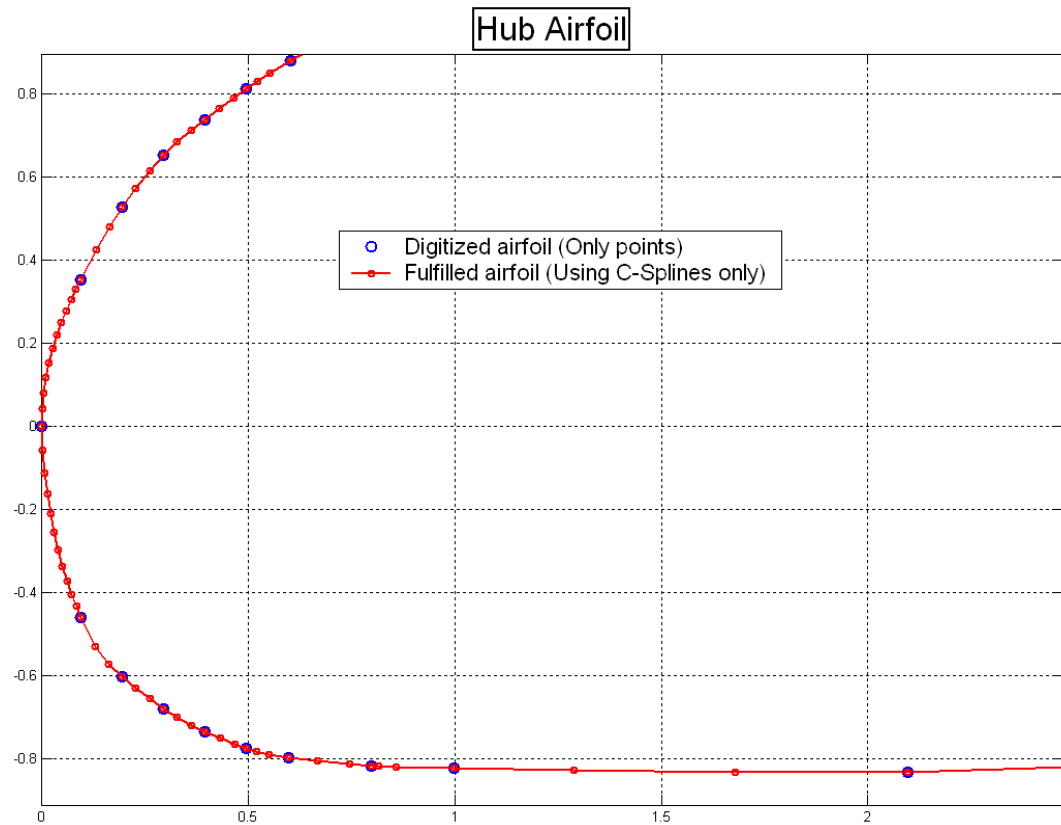
Π2.4.4 Εκτελέσεις κώδικα – Αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου ψηφιοποίησης παρουσιάζονται παρακάτω υπό μορφή διαγραμμάτων. Παρατηρούμε τα εξής :

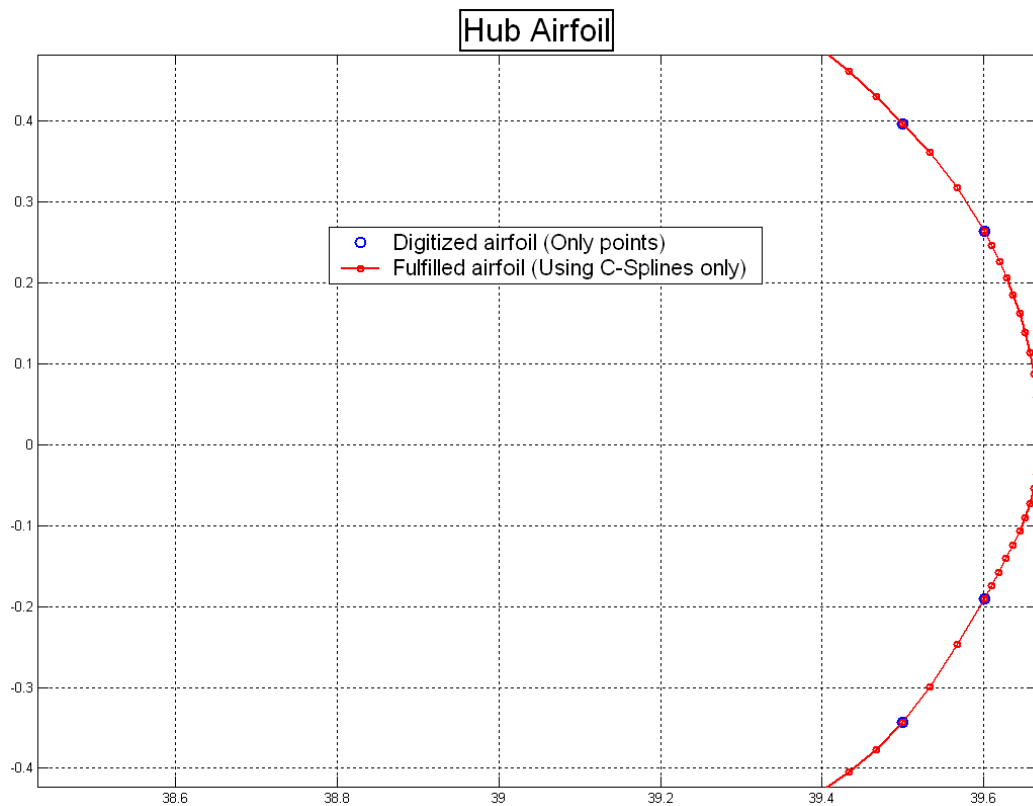
1. Οι Csplines έχουν άπειρη κλίση στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής (Σχήμα Π2.16 και Σχήμα Π2.17).
2. Στις μεγεθυμένες εικόνες των αεροτομών (Σχήμα Π2.16 και Σχήμα Π2.17) παρατηρούμε ότι χρειάζεται smoothening η γεωμετρία. Η πιθανή μετακίνηση των κόμβων (σημεία ψηφιοποίησης) για καλύτερη ομοιομορφία της καμπύλης, παρατηρούμε ότι είναι μέσα στα όρια του σφάλματος της ψηφιοποίησης ($\pm 0.04\text{mm}$).
3. Ο τρόπος που προσαρμόζεται το τόξο κύκλου στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής, δημιουργεί σε ορισμένες περιπτώσεις αρκετά ικανοποιητική γεωμετρία (Σχήμα Π2.19) , ενώ σε άλλες μη αποδεκτή (Σχήμα Π2.18). Έτσι, δικαιολογείται η προτίμηση για χρήση μόνο Csplines σε όλο το περίγραμμα της αεροτομής.
4. Η σύγκριση της ψηφιοποιημένης αεροτομής στο μέσο του πτερυγίου με αυτήν που προκύπτει από τον κώδικα με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των αεροτομών στο tip και hub του πτερυγίου (Σχήμα Π2.21), δείχνει ότι η γραμμική παρεμβολή είναι μη αποδεκτή μέθοδος για την 3Δ αποτύπωση των πτερυγίων.



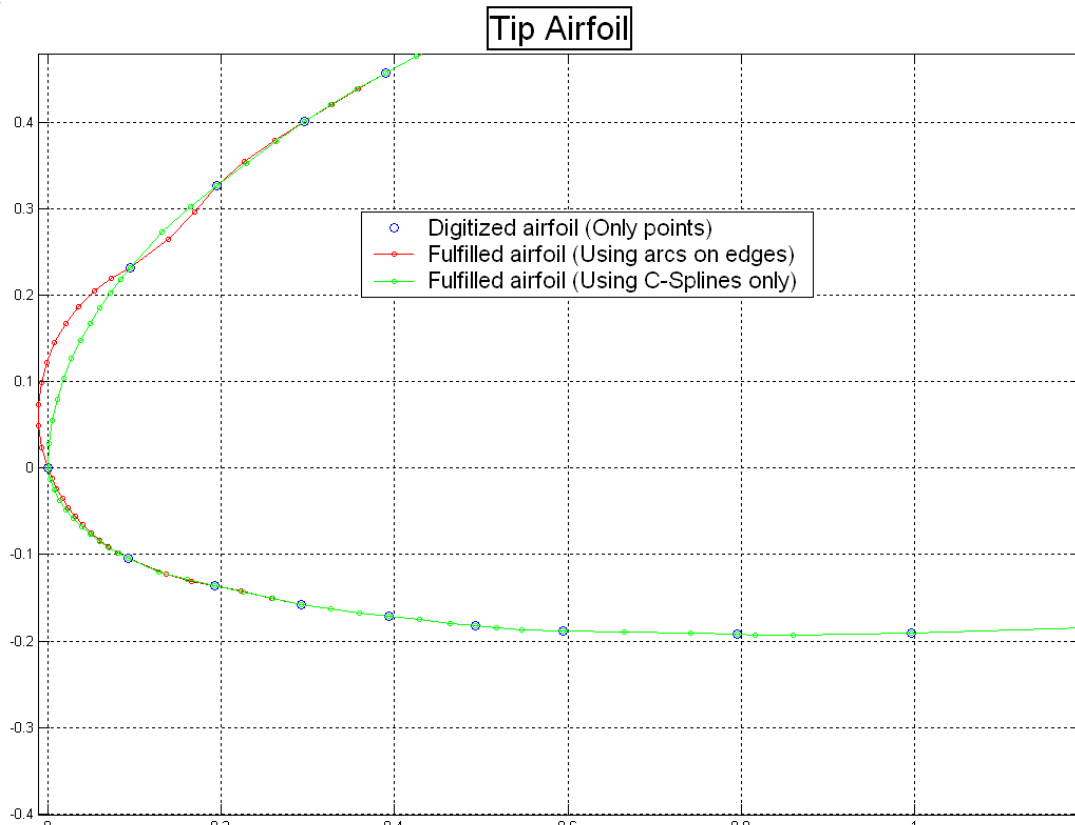
Σχήμα Π2.15: Η αεροτομή στο Hub του πτερυγίου του 2^{ου} ρότορα (μεγάλη βάση πτερυγίων) με επιπλέον σημεία που προκύπτουν από παρεμβολή με C-Splines.



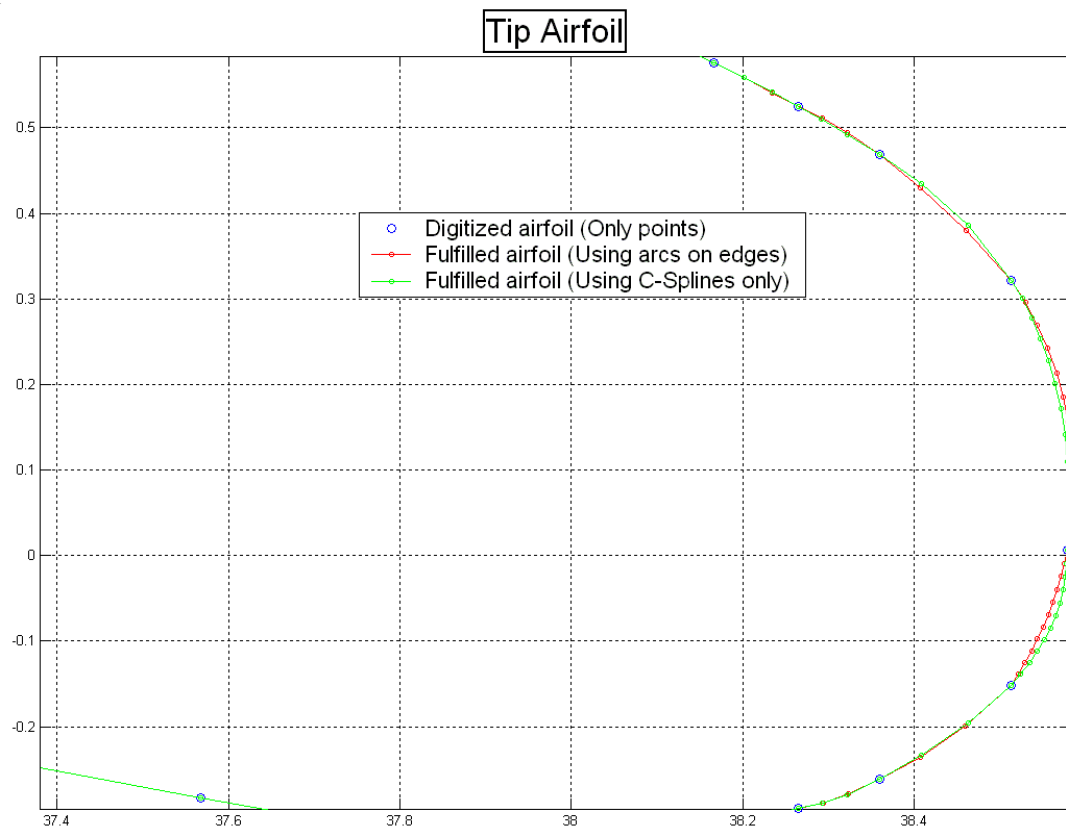
Σχήμα Π2.16: Η ακμή πρόσπτωσης της αεροτομής στο Hub του πτερυγίου του 2^{ου} ρότορα με επιπλέον σημεία που προκύπτουν από παρεμβολή με C-Splines.



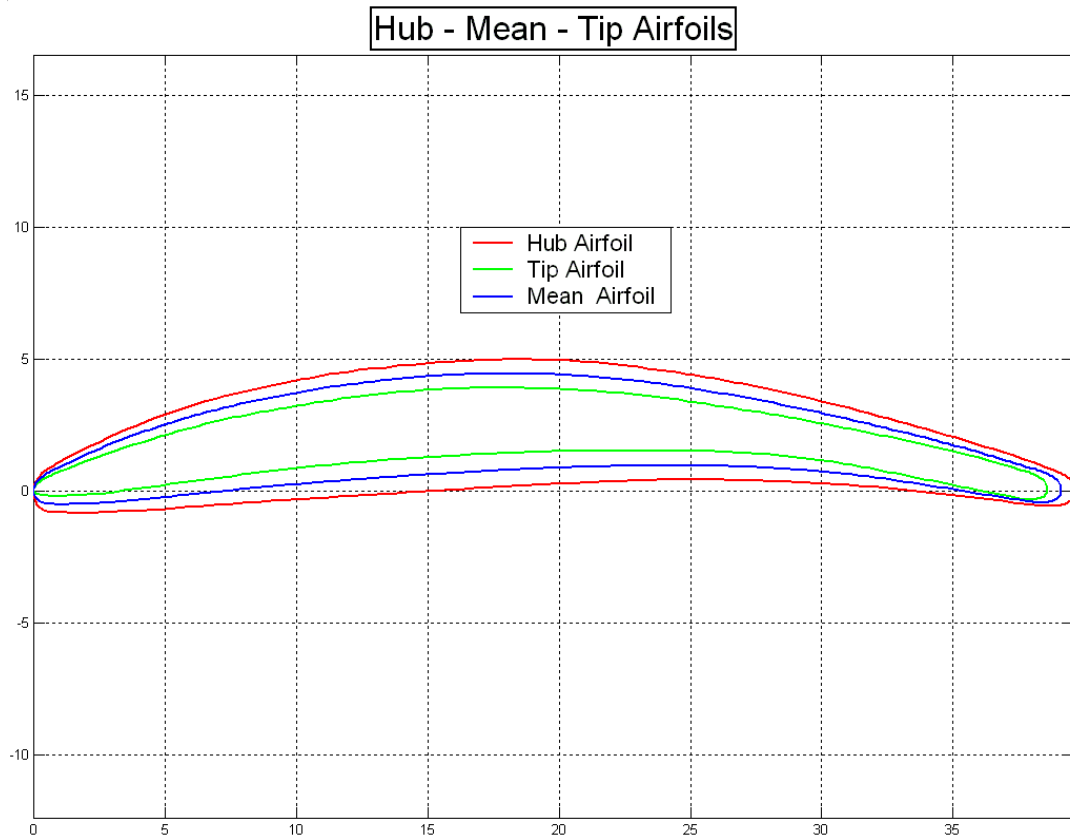
Σχήμα Π2.17: Η ακμή εκφυγής της αεροτομής στο Hub του πτερυγίου του 2^{ου} ρότορα με επιπλέον σημεία που προκύπτουν από παρεμβολή με C-Splines.



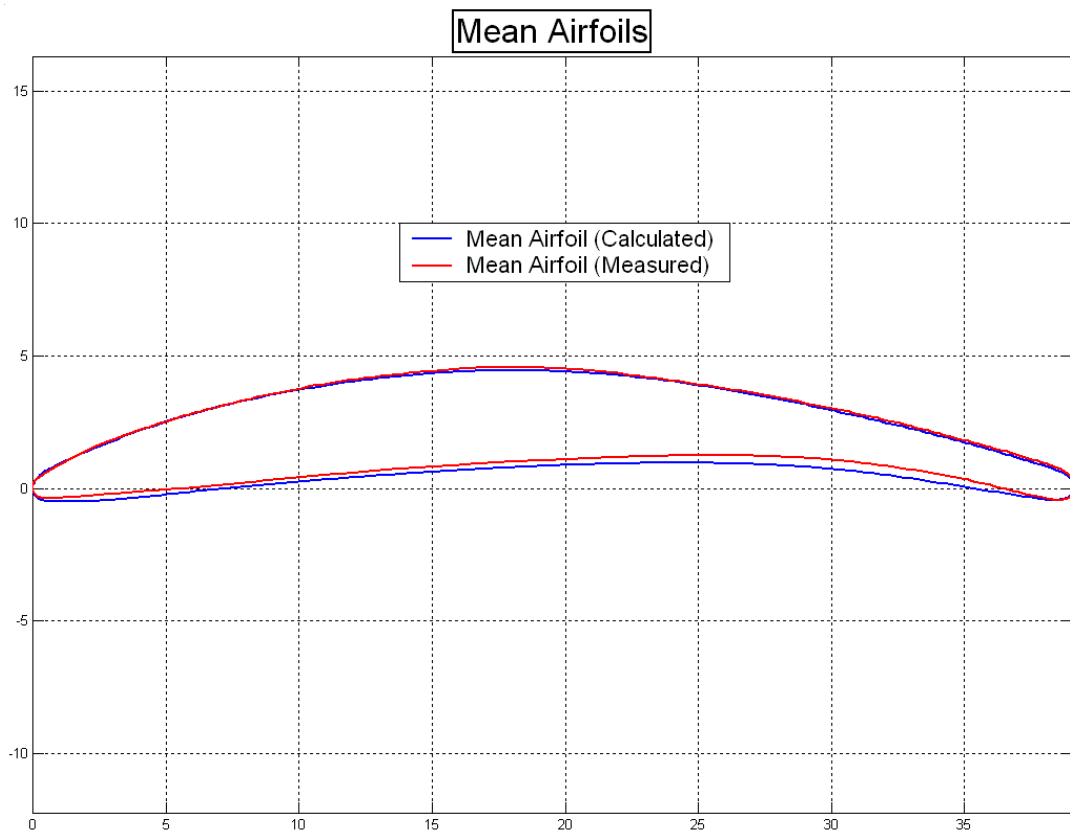
Σχήμα Π2.18: Η ακμή πρόσπτωσης της αεροτομής στο Tip του πτερυγίου του 2^{ου} ρότορα. Σύγκριση C-Splines με προσαρμογή κυκλικού τόξου στα τρία πρώτα σημεία.



Σχήμα Π2.19: Η ακμή εκφυγής της αεροτομής στο Tip του πτερυγίου του 2^{ου} ρότορα. Σύγκριση C-Splines με προσαρμογή κυκλικού τόξου στα τρία τελευταία σημεία.

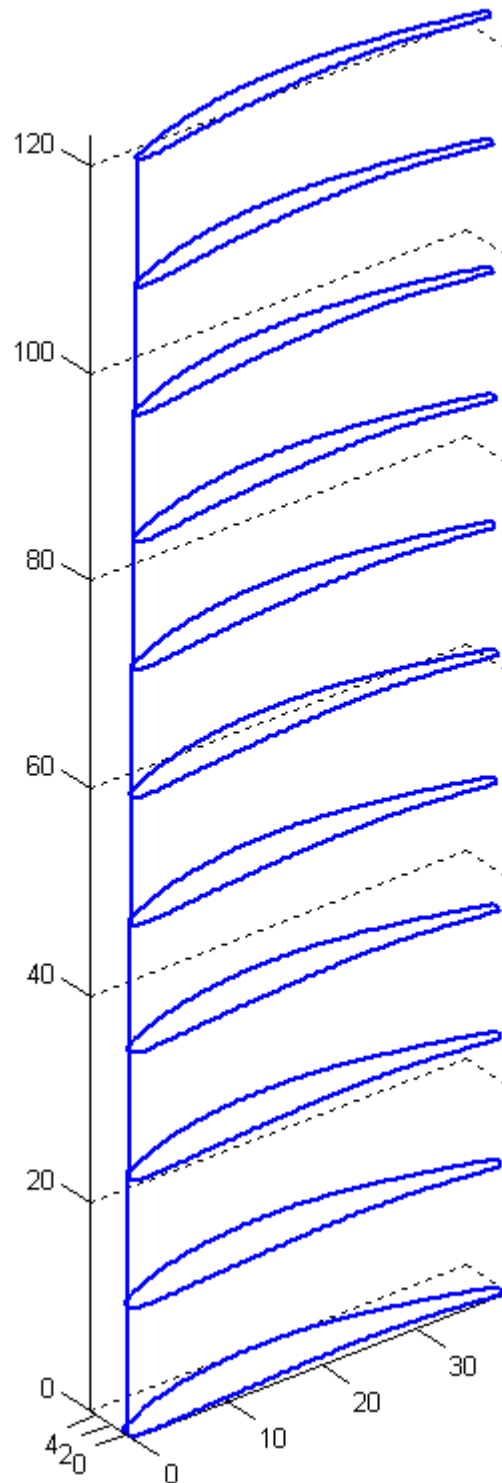


Σχήμα Π2.20: Η ψηφιοποιημένες αεροτομές στο hub και tip και η αεροτομή που προκύπτει από γραμμική παρεμβολή στο μέσο του πτερυγίου.



Σχήμα Π2.21: Η ψηφιοποιημένη αεροτομή στο μέσο του πτερυγίου και αυτή που προκύπτει από γραμμική παρεμβολή μεταξύ των αεροτομών στο hub και tip.

3D Blade/span=125mm/twist=2degrees



Σχήμα Π2.22: Το πτερύγιο του 2^{ου} ρότορα (μεγάλη βάση πτερυγίων), όπως προκύπτει από τον κώδικα. Διακρίνουμε την συστροφή του πτερυγίου.

Π2.5 Προτάσεις για βελτίωση μεθόδου αποτύπωσης γεωμετρίας πτερυγίων.

1. Χρήση παραμετρικών β-Splines για προσέγγιση πλέον και όχι παρεμβολή, ώστε να είναι πιο ομοιόμορφες (smooth) οι καμπύλες των αεροτομών.
2. Χρήση οριακών συνθηκών των Splines στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής, ώστε να μη θέτουμε $y_1=y_2$, $y_{N-1}=y_N$ αλλά να θέτουμε στο σημείο 1 και N την καμπυλότητα την οποία θα υπολογίζουμε κάθε φορά για τυποποιημένη αεροτομή Naca-65 ανάλογα με το μέγιστο πάχος, σύμφωνα με το [2] και [3].
3. Αντί για γραμμική παρεμβολή για το σχηματισμό των ενδιάμεσων αεροτομών, να γίνεται χρήση πολώνυμου 3^{ου} βαθμού μεταξύ των αντίστοιχων σημείων (ίδια τετμημένη) των ψηφιοποιημένων αεροτομών.
4. Να γίνει σάρωση των πτερυγίων με το σαρωτή 3Δ του Ε.Θ.Σ., ώστε να μπορούμε να μετρήσουμε καλύτερα τη συστροφή των πτερυγίων, αλλά και τη σχετική θέση μεταξύ των καθ' ύψος αεροτομών. Για την εύρεση των συντεταγμένων των σημείων των ενδιάμεσων-μη ψηφιοποιημένων αεροτομών, μπορεί να γίνει παρεμβολή μεταξύ των ψηφιοποιημένων αεροτομών με πολώνυμο 3^{ου} βαθμού μεταξύ αντίστοιχων σημείων (ίδια τετμημένη) κάθε φορά.

Π3

Προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων μετρήσεων και παρουσίασης αποτελεσμάτων

Π3.1 Πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων μετρήσεων CRCALC.

Η διαδικασία και ο τρόπος των υπολογισμών που εκτελεί το πρόγραμμα παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.3.

Π3.1.1 Αρχεία εισόδου – εξόδου.

Αρχείο εισόδου **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
```

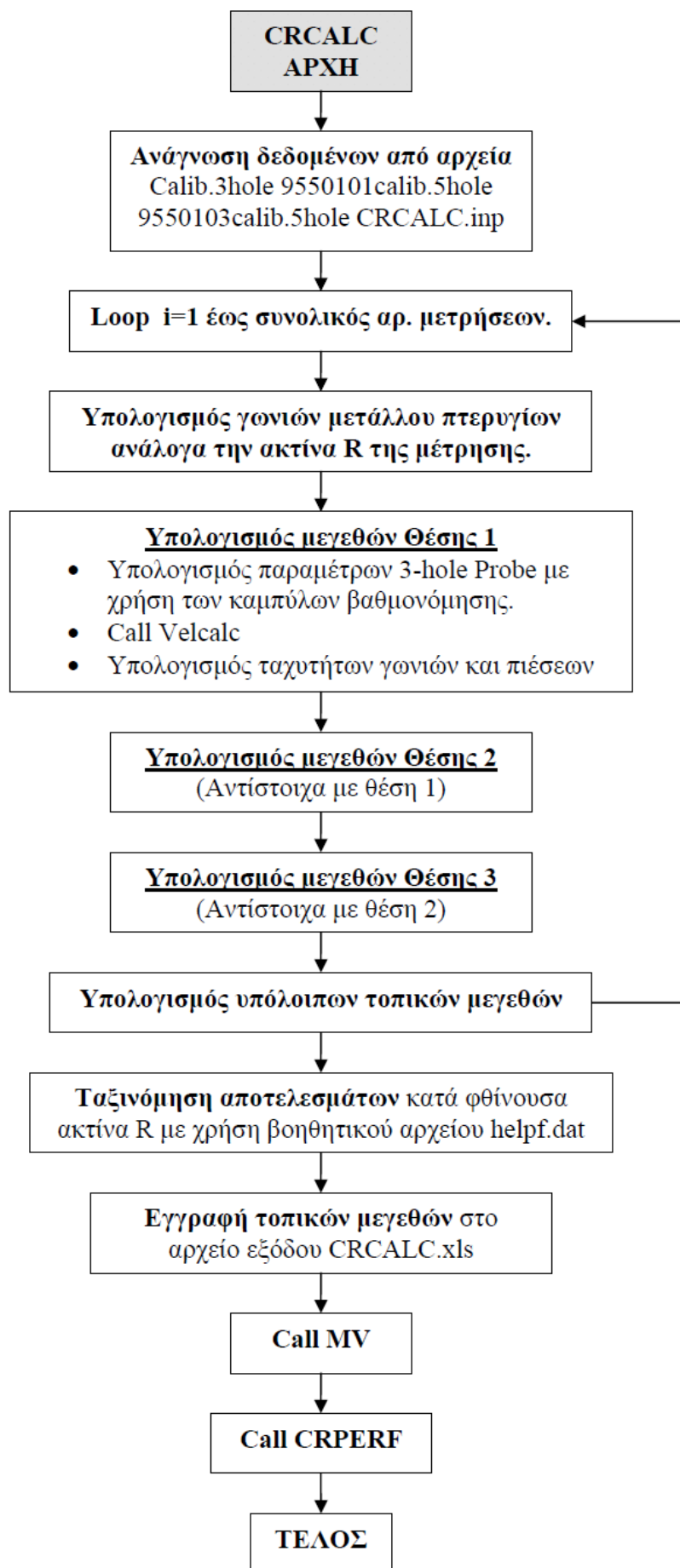
Αρχείο εξόδου **CRCALC.xls**

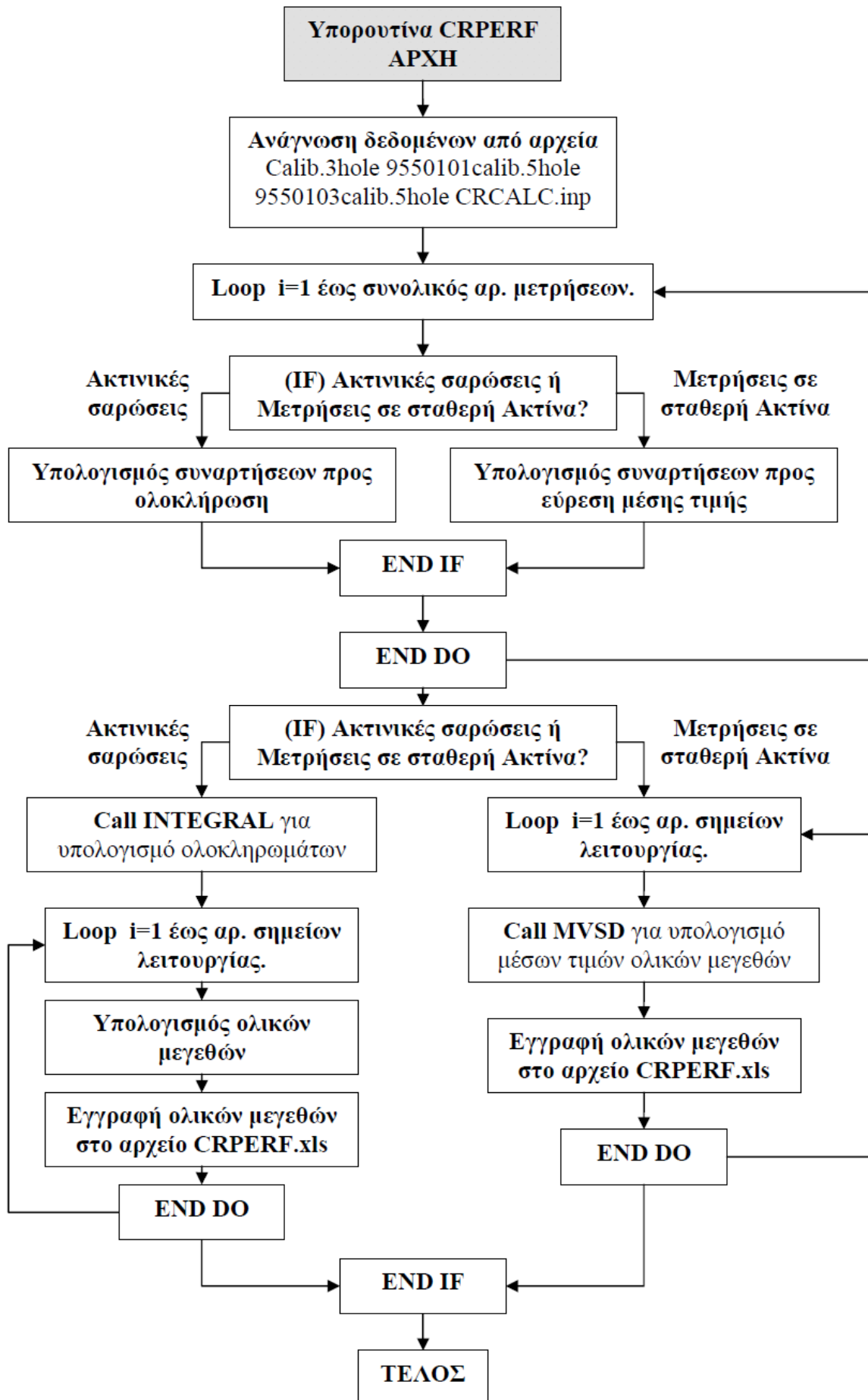
Operation_Points								
5 0								
Num_of_op_point 1 2 3 4 5								
Meas_at_each_op_point 26 26 26 26 26								
Pamb(Pa)	Tamb(C)	RH(%)	R1(mm)	bfin1(deg)	ao1(deg)	a1(deg)	afin1(deg)	Pt1(Pa)
Ps1(Pa)	dens1(kg/m ³)	q1(mbar)	Mach1	V1(m/s)	Vax1(m/s)	Vu1(m/s)	Vr1(m/s)	U1(m/s)
W1(m/s)	Wu1(m/s)	beta1(deg)	b11t(deg)	i1(deg)	R2(mm)	bfin2(deg)	ao2(deg)	a2(deg)
afin2(deg)	Pt2(Pa)	Ps2(Pa)	dens2(kg/m ³)	q2(mbar)	Mach2	V2(m/s)	Vax2(m/s)	Vu2(m/s)
Vr2(m/s)	U21(m/s)	W21(m/s)	Wu21(m/s)	beta21(deg)	b12t(deg)	dev1(deg)		U22(m/s)
W22(m/s)	Wu22(m/s)	beta22(deg)	b21t(deg)	i2(deg)	R3(mm)	bfin3(deg)	ao3(deg)	a3(deg)
afin3(deg)	Pt3(Pa)	Ps3(Pa)	dens3(kg/m ³)	q3(mbar)	Mach3	V3(m/s)	Vax3(m/s)	Vu3(m/s)
Vr3(m/s)	U3(m/s)	W3(m/s)	Wu3(m/s)	beta3(deg)	b22t(deg)	dev2(deg)	RPM1	RPM2
PatPs1wt(Pa)	Ps2Ps1wt(Pa)	Ps3Ps2wt(Pa)		Cur1(A)	Voltage1(Vol)	MFlow0(kg/s)		ReynoldsC1
ReynoldsC2	OpPoint	Ps3Ps1wt(Pa)	Pt2Pt1(Pa)	Pt3Pt2(Pa)	Pt3Pt1(Pa)	Ps2Ps1(Pa)	Ps3Ps2(Pa)	
Ps3Ps1(Pa)	PtR1(Pa)	PtR21(Pa)	PtR22(Pa)	PtR3(Pa)	omega1	omega2	htt1	htt2

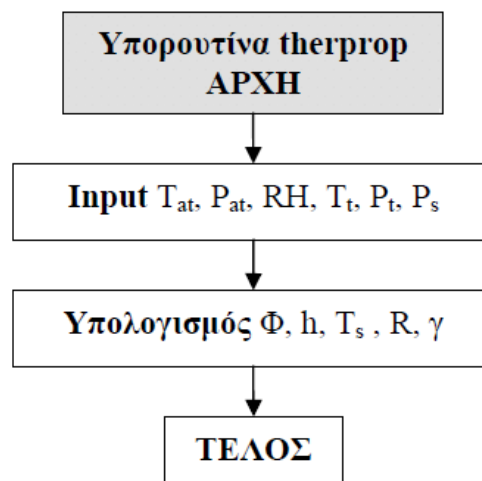
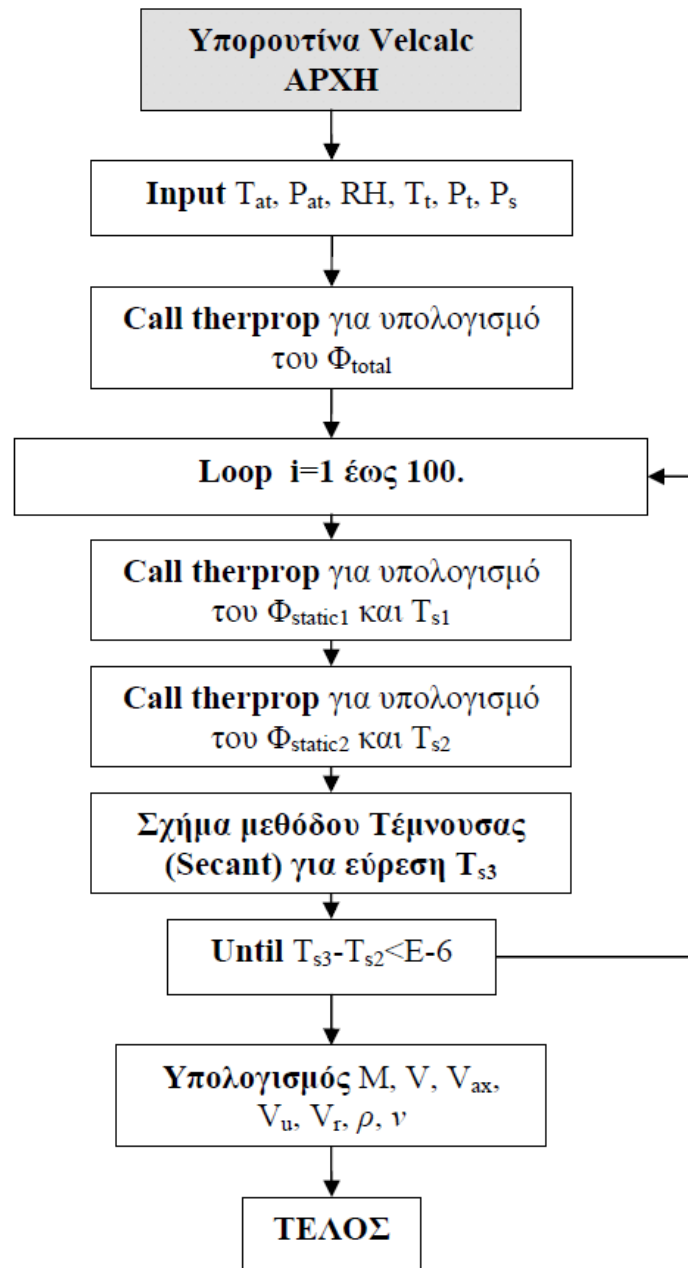
Αρχείο εξόδου **CRPERF.xls**

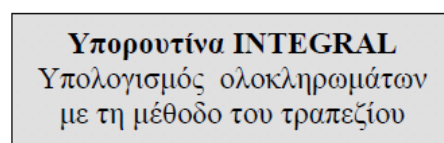
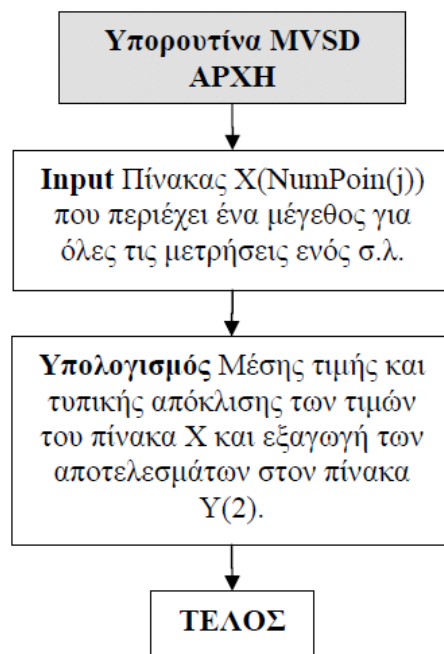
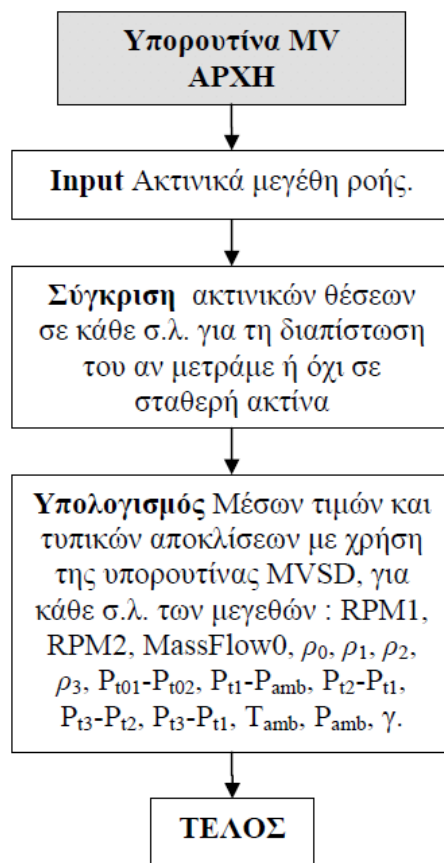
Operation_Points						
5 0						
Num_of_op_point 1 2 3 4 5						
Meas_at_each_op_point 26 26 26 26 26						
R1(mm)	R2(mm)	R3(mm)	RPM1m(rpm)	SDRPM1(rpm)	RPM2m(rpm)	
SDRPM2(rpm)	MFlow0m(kg/m ³)	SDMFlow0m(kg/m ³)	MFlow1(kg/m ³)	MFlow2(kg/m ³)		
MFlow3(kg/m ³)	dens0m(kg/m ³)	SDdens0(kg/m ³)	dens1m(kg/m ³)	SDdens1(kg/m ³)		
dens2m(kg/m ³)	SDdens2(kg/m ³)	dens3m(kg/m ³)	SDdens3(kg/m ³)	(Pt2-Pt1)m(Pa)	SD(Pt2-Pt1)(Pa)	
(Pt3-Pt2)m(Pa)	SD(Pt3-Pt2)(Pa)	(Pt3-Pt1)m(Pa)	SD(Pt3-Pt1)(Pa)	(Ps2-Ps1)m(Pa)	SD(Ps2-Ps1)(Pa)	
(Ps3-Ps2)m(Pa)	SD(Ps3-Ps2)(Pa)	(Ps3-Ps1)m(Pa)	SD(Ps3-Ps1)(Pa)	PHI1m	SDPHI1	
PHI2m	SDPHI2	PSI1ttm	SDPSI1tt	PSI2ttm	SDPSI2tt	PSI1ssm
SDPSI1ss	PSI2ssm	SDPSI2ss	PSI1tsm	SDPSI1ts	PSI2tsm	SDPSI2ts
efc1ttm	SDefc1tt	efc2ttm	SDefc2tt	Pt2m/Pt1m	SD(Pt2/Pt1)	Pt3m/Pt2m
SD(Pt3/Pt2)	Pt3m/Pt1m	SD(Pt3/Pt1)	(M0)m.sq(θ)/δ	RPM1m/sqrt(θ)	RPM2m/sqrt(θ)	
(DPin)m(mbar)	SD(DPin)(mbar)	(Pamb-P1wt)m(Pa)	SD(Pamb-P1wt)(Pa)	(P2wt-P1wt)m(Pa)	SD(P2wt-P1wt)(Pa)	
(P3wt-P2wt)m(Pa)	SD(P3wt-P2wt)(Pa)	(P3wt-P1wt)m(Pa)	SD(P3wt-P1wt)(Pa)	(Pamb)m(Pa)		
SD(Pamb)(Pa)	(Tamb)m(K)	SD(Tamb)(K)	R2-Rm	gamma0	SDgamma0	
Num.Of.Meas.	Op.Point					

Π3.1.2 Διάγραμμα ροής CRCALC









Π3.2 Πρόγραμμα παρουσίασης αποτελεσμάτων μετρήσεων CRCHART.

Ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.3.6.

Π3.2.1 Δεδομένα εισόδου CRCHART.

Τα δεδομένα εισόδου προγράμματος είναι τα αρχεία εξόδου του CRCALC.

Π3.2.2 Διάγραμμα ροής CRCHART.



Π4

Διαδικασία κατασκευής πολυεστερικών αντικειμένων διάταξης

Π4.1 Γενικά στοιχεία κατασκευής πολυεστερικών αντικειμένων.

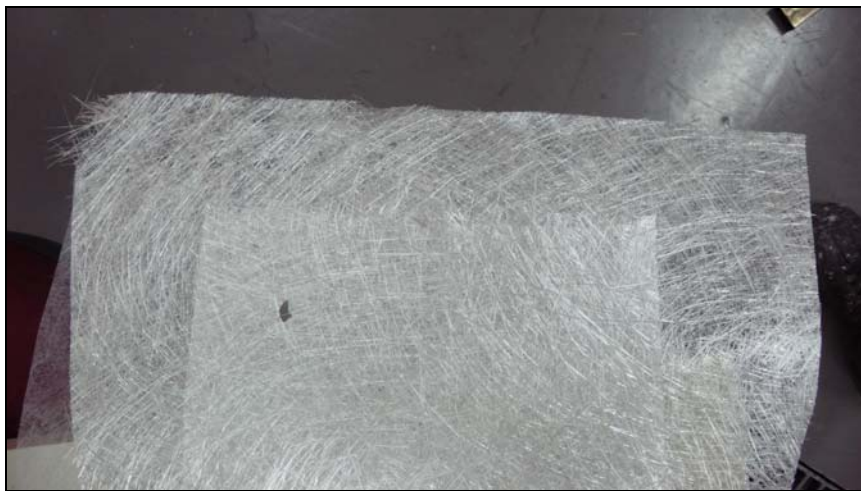
Ξεκινώντας, πρέπει να αναφέρουμε τα στοιχεία που απαρτίζουν την διαδικασία κατασκευής ενός αντικειμένου από σύνθετα υλικά. Λέγοντας σύνθετα υλικά, στην παρούσα εργασία εννοούμε τα αντικείμενα που αποτελούνται από πολυεστερική ρητίνη (κοινώς, πολυεστέρας) και ίνες γυαλιού.

Στις πειραματικές διατάξεις, συνήθως ο αγωγός εισόδου (Bellmouth) λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας του είναι δύσκολο και πολύ δαπανηρό να κατασκευαστεί από μέταλλο ή ξύλο ή πλαστικό, και για αυτόν το λόγο κατασκευάζεται από σύνθετα υλικά, αλλά και για το μεγάλο συντελεστή αντοχής προς βάρος που έχει.

Ο πολυεστέρας κατά την εφαρμογή του είναι σε ρευστή μορφή με ιξώδες μεγαλύτερο από το νερό και αρκετά μικρότερο από το μέλι. Για την στερεοποίησή του αναμειγνύεται με τον καταλύτη του, επίσης υγρό, αμέσως πριν την εφαρμογή με αναλογία 20gr καταλύτη/1kg πολυεστέρα (περίπου 140 σταγόνες ανά kg ρητίνης).

Οι ίνες γυαλιού που χρησιμοποιήσαμε λέγονται γυαλοπίλημα (Σχήμα Π4.1) και είναι σαν ένα ύφασμα με πάχη από 0.1 έως 1 χιλιοστό (50g έως 600g ανά mm²), ανάλογα την εφαρμογή, το οποίο αποτελείται από λεπτές ίνες γυαλιού με πάχος περίπου όσο μια τρίχα και μήκος από 2 μέχρι 4mm. Η πλέξη μεταξύ των ινών είναι ακανόνιστη.

Για τις κατασκευές αυτές, τα υλικά αυτά τα προμηθευτήκαμε από την εταιρεία NEOTEX.



Σχήμα Π4.1: Ύφασμα από ίνες γυαλιού (γαλοπίλημα).

Έτσι απλώνοντας τον πολυεστέρα πάνω στο γυαλοπίλημα με ένα πινέλο, εισέρχεται μεταξύ των ινών και αφού σκληρύνει έχουμε σαν αποτέλεσμα ένα σύνθετο υλικό. Εάν, πάνω από αυτό το υλικό περάσουμε άλλη μια στρώση από γυαλοπίλημα και πολυεστέρα, γίνεται το υλικό παχύτερο και ανθεκτικότερο.

Το ερώτημα όμως εδώ είναι, πως δίνουμε στο σύνθετο υλικό την επιθυμητή γεωμετρία; Αυτό γίνεται με την αντιγραφή της επιθυμητής γεωμετρίας. Ένα απλό παράδειγμα τέτοιας διαδικασίας είναι οι παγώθηκες οι οποίες έχουν κοιλότητες διαφόρων σχημάτων και τις γεωμετρίες αυτές εμείς αντιγράφουμε τοποθετώντας μέσα σε αυτές νερό με τα παγάκια να είναι το αντίγραφο. Άρα είναι απαραίτητο να έχουμε από πριν ένα αντικείμενο με την επιθυμητή γεωμετρία.

Η αντιγραφή γεωμετρίας ενός αντικειμένου γίνεται ως εξής: Έχουμε το αντικείμενο που θέλουμε να αντιγράψουμε, το οποίο μπορεί να είναι από οποιοδήποτε υλικό αρκεί να έχει επιφάνεια σχετικά σκληρή, λεία και άκαμπτη για λόγους που κατανοηθούν παρακάτω. Πάνω στη γεωμετρία που θέλουμε να αντιγράψουμε τοποθετούμε το γυαλοπίλημα πιέζοντάς το απαλά κι έτσι αυτό λόγω του μικρού του πάχους, των μικρών μεγεθών των ινών γυαλιού και της ακανόνιστης πλέξης τους ακολουθά με ευκολία τη μορφή του αντικειμένου. Τέλος, απλώνουμε την ρητίνη (πολυεστέρας) που είναι σε υγρή μορφή, πάνω στον γυαλοπίλημα και πιέζουμε με το πινέλο απαλά σε όλη την επιφάνεια ώστε να εισχωρήσει η ρητίνη ανάμεσα από τις ίνες γυαλιού και να τις υπερκαλύψει. Έτσι, ο πολυεστέρας ‘μαλακώνει’ το γυαλοπίλημα και το κάνει ευκολότερο στη διαμόρφωση με αποτέλεσμα να ακολουθά τη γεωμετρία πιστά. Έτσι, αφού σκληρύνει το σύνθετο πλέον υλικό και έχει αποκτήσει μια σχετική ακαμψία, το αφαιρούμε από την επιφάνεια που είναι τοποθετημένο με αποτέλεσμα η μία επιφάνειά του να είναι αντίγραφο της επιφάνειας του αντικειμένου που θέλαμε να αντιγράψουμε.

Για την κατασκευή ενός τέτοιου αντικειμένου από σύνθετο υλικό χρειαζόμαστε τα εξής :

- 1) **Το Πρωτότυπο.** Το Πρωτότυπο είναι ένα αντικείμενο που έχει την ίδια ακριβώς γεωμετρία στις επιφάνειες που μας ενδιαφέρει, με το αντικείμενο που θέλουμε να κατασκευάσουμε αλλά μπορεί να είναι από οποιοδήποτε υλικό, αρκεί να είναι εύκολο στη διαμόρφωσή του.
- 2) **Το Καλούπι.** Το Καλούπι είναι το αντικείμενο που έχει προέλθει από την αντιγραφή των επιφανειών ενδιαφέροντος του πρωτοτύπου και είναι συνήθως από ενισχυμένο σύνθετο υλικό.
- 3) **Το Αντίτυπο.** Το Αντίτυπο είναι το αντικείμενο που έχει προέλθει από την αντιγραφή των επιφανειών ενδιαφέροντος του καλουπιού και έχει προφανώς την ίδια γεωμετρία με το πρωτότυπο και αποτελείται από σύνθετο υλικό ρητίνης-ινών σε ποσότητες ανάλογα με την στιβαρότητα και αντοχή που θέλουμε να έχει.

Ο στόχος μας λοιπόν είναι η κατασκευή του αντιτύπου. Έτσι, κατασκευάζουμε πρώτα το πρωτότυπο, αντιγράφοντάς το κατασκευάζουμε το καλούπι και αντιγράφοντας το καλούπι κατασκευάζουμε το αντίτυπο που είναι και το επιθυμητό αντικείμενο.

Η ακολουθία αυτή των κατασκευών δεν είναι πάντοτε αναγκαία. Εξαρτάται από το τι ακριβώς θέλουμε να κάνουμε. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να κατασκευάσουμε μόνο ένα αντικείμενο από σύνθετο υλικό, τότε μπορούμε να φτιάξουμε, αν γίνεται, κατευθείαν το καλούπι από κάποιο υλικό εύκολα διαμορφώσιμο, και αντιγράφοντας το καλούπι, να πάρουμε το επιθυμητό αντικείμενο. Αν όμως θέλουμε να έχουμε ένα καλούπι το οποίο θα αντιγράψουμε πολλές φορές για να βγάλουμε πολλά αντίτυπα, τότε, αν το καλούπι δεν είναι αρκετά ανθεκτικό θα σπάσει κάποια στιγμή στην προσπάθεια να αφαιρέσουμε το αντίτυπο από το καλούπι. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου οι επιφάνειες που αντιγράφουμε είναι πολύπλοκες ή σχηματίζουν μεγάλες κοιλότητες και ο λόγος είναι ότι οι επιφάνειες επαφής καλουπιού-αντιτύπου εφαρμόζουν απόλυτα η μία πάνω στην άλλη.

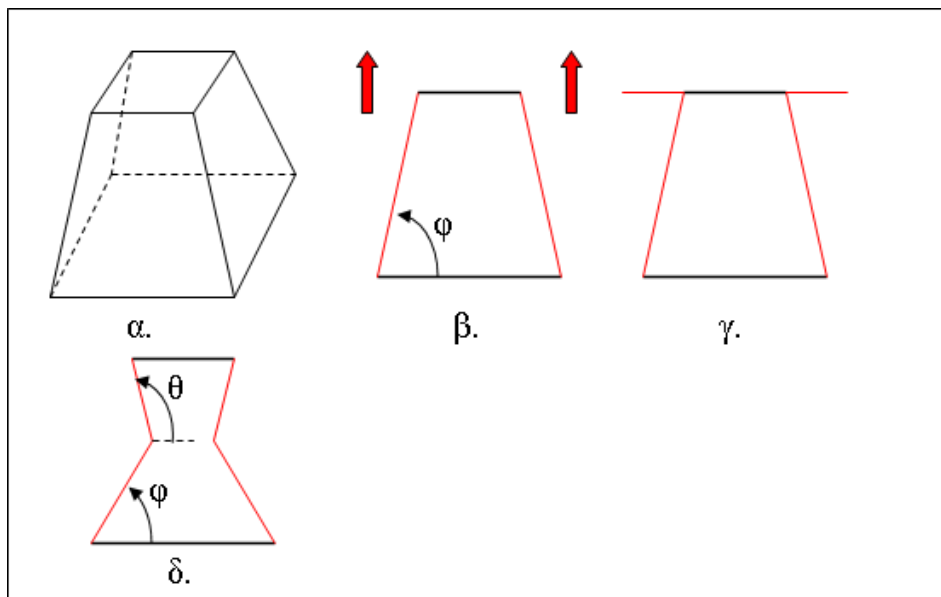
Έτσι αν θέλουμε πολλά αντίτυπα πρέπει το καλούπι να είναι πολύ ανθεκτικό. Εάν θέλουμε μόνο ένα αντίτυπο τότε μπορούμε ακόμα και να καταστρέψουμε το καλούπι για να βγάλουμε το αντίτυπο, αφού δεν θα μας είναι πλέον χρήσιμο.

Ένα άλλο ερώτημα που γεννάται εδώ, είναι αν κατά τη διάρκεια της αντιγραφής, η ρητίνη (πολυεστέρας) κολλήσει πάνω στο αντικείμενο που αντιγράφουμε με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να απομονώσουμε το αντίγραφο και η διαδικασία αντιγραφής να αποτύχει. Για να το αποφύγουμε λοιπόν πρέπει να μεταξύ των δύο επιφανειών να υπάρχει κάποιο υλικό που να τις απομονώνει. Ένα υλικό που θα έχει μικρό πάχος ώστε να αντιγραφεί η επιφάνεια πιστά, αλλά και τέτοιο που δεν θα κολλάει με κανένα από τα δύο υλικά των δύο επιφανειών, και τέτοιο ώστε να απομονώνει πλήρως (σε μικροσκοπικό επίπεδο) τις δύο επιφάνειες.

Το ρόλο του υλικού αυτού έχει ένα ειδικό κερί που προορίζεται για κατασκευές σύνθετων υλικών και μόνο. Το κερί αυτό εφαρμόζεται με την ίδια λογική περίπου που χρησιμοποιούμε για το γυάλισμα των παπουτσιών. Παίρνουμε λίγο κερί με ένα πανάκι, τρίβουμε την επιφάνεια που θα αντιγράψουμε με αυτό το πανάκι με κυκλικές κινήσεις ώστε να εισχωρήσει το κερί σε όλες τις μικροκοιλότητες της επιφάνειας και στη συνέχεια ξανατρίβουμε με τον ίδιο τρόπο με ένα καθαρό πανάκι ώστε η επιφάνεια να γυαλίσει, και οπτικά και με την αίσθηση ότι το πανάκι γλιστράει επάνω στην επιφάνεια. Εάν αφήσουμε περιοχές που δεν είναι γυαλισμένες τότε αυτές θα περάσουν προφανώς στο αντίγραφο το οποίο θα εμφανίσει θαμπάδες, που σημαίνει υψηλή τραχύτητα. Αυτή η διαδικασία πρέπει να γίνει πολλές φορές, ώστε να είμαστε σίγουροι ότι κάθε σημείο της επιφάνειας έχει καλυφθεί με κερί. Συνίσταται αυτή η διαδικασία να γίνεται 10 με 15 φορές και με προσοχή στη εφαρμογή κομμάτι-κομμάτι στην επιφάνεια (περίπου 30cm^2) διότι το κερί σκληραίνει γρήγορα και πρέπει γρήγορα να απλώνεται και γρήγορα να σκουπίζεται. Ο ελάχιστος χρόνος που πρέπει να περάσει ώστε να ξαναπεράσουμε κερί στην ίδια επιφάνεια είναι 4 ώρες. Μετά το τέλος της διαδικασίας αυτής θα έχει δημιουργηθεί ένα πολύ λεπτό φιλμ κεριού πάνω στην επιφάνεια ικανό για να αποτρέψει την επαφή της ρητίνης με το υλικό της επιφάνειας που θέλουμε να αντιγράψουμε.

Εδώ λοιπόν φαίνεται ξεκάθαρα ο ένας λόγος που πρέπει η επιφάνεια που θέλουμε να αντιγράψουμε να είναι λεία. Ωστε να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα ύπαρξης σημείων όπου λόγω τραχύτητας το κερί δεν θα μπορεί να εισχωρήσει εκεί. Επί του πρακτέου, η επιφάνεια θα πρέπει να τριφτεί τουλάχιστον μέχρι 1000άρι γυαλόχαρτο.

Τέλος, ένα ακόμα σπουδαίο ερώτημα είναι εάν μπορούμε να αντιγράψουμε οποιαδήποτε επιφάνεια. Η απάντηση είναι αρνητική αρχικά. Ο λόγος είναι ότι εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας όσον αφορά στις κλίσεις που αυτή έχει. Τη σπουδαιότητα αυτή την καταλαβαίνουμε αν αναρωτηθούμε : όταν στεγνώσει ο πολυεστέρας και τραβήξουμε το αντίγραφο να αποκολληθεί από την επιφάνεια που αντιγράφουμε, ή μήπως θα φρακάρει πουθενά λόγω γεωμετρίας και μόνο αν καταστρέψουμε το αντιγραφόμενο αντικείμενο θα καταφέρουμε να αποκολλήσουμε το αντίγραφο; Για παράδειγμα, έστω ότι θέλουμε να αντιγράψουμε με πολυεστέρα την εξωτερική επιφάνεια ενός τραπεζοειδούς (Σχήμα Π4.2) χωρίς τις βάσεις του (σχήμα α). Τότε, απλώνουμε τον πολυεστέρα στην εξωτερική επιφάνεια και όχι στις βάσεις του, και αφού στεγνώσει και έχει σκληρύνει έρχεται η ώρα που πρέπει να αποκολλήσουμε το αντίγραφο. Διαπιστώνουμε όμως πως υπάρχει μόνο μια κατεύθυνση προς την οποία μπορούμε να τραβήξουμε το αντίγραφο για να μην εμποδίζει η μια επιφάνεια την άλλη κατά την απομάκρυνση των επιφανειών μεταξύ τους (σχήμα β). Αν για παράδειγμα το τραπεζοειδές είχε φλάντζες (σχήμα γ), δεν θα μπορούσαμε να αποκολλήσουμε το αντίγραφο εκτός κι αν οι φλάντζες είναι ξεχωριστό αντικείμενο, οπότε πρώτα αφαιρούμε τις φλάντζες και μετά το αντίγραφο. Επίσης, το ίδιο πρόβλημα αδυναμίας αποκόλλησης έχουμε όταν η γεωμετρία που αντιγράφουμε έχει 'αρνητικές' κλίσεις ($\theta > 90^\circ$ σχήμα δ).



Σχήμα Π4.2: Αρνητικές κλίσεις και ικανότητα αποκόλλησης αντικειμένου.

Π4.2 Κατασκευή συγκλίνοντος αγωγού εισόδου (Bellmouth).

Στο παράρτημα αυτό θα περιγράψουμε βήμα προς βήμα τη διαδικασία που ακολουθήσαμε, ώστε από το καλούπι να βγάλουμε τα δύο ίδια αντίτυπα που αποτελούν τον αγωγό εισόδου.

1. Κατασκευή ξύλινης φλάντζας.

Το πρώτο πράγμα που έγινε είναι όταν πήραμε το καλούπι, ήταν η κατασκευή της φλάντζας του καλουπιού η οποία είναι αυτή που θα δημιουργήσει στο αντικείμενο τη φλάντζα με την οποία ο αγωγός εισόδου ενώνεται με την υπόλοιπη πειραματική διάταξη. Κατασκευάστηκε από ξύλο, μελαμίνη πάχους 15mm, λόγω της καλής επιφάνειας του ξύλου αυτού. Η φλάντζα φαίνεται στην Σχήμα Π4.3 τοποθετημένη επάνω στο καλούπι. Η σύνδεσή της με το καλούπι γίνεται με κοχλίες M8 εφ' όσων προηγουμένως έχουμε ανοίξει σπειρώματα επάνω στη ρητίνη του καλουπιού στις θέσεις που φαίνονται στην εικόνα. Να επισημάνουμε εδώ ότι η φλάντζα αυτή είναι διαιρούμενη ώστε να μπορεί να αποκολληθεί το αντικείμενο από το καλούπι.



Σχήμα Π4.3: Ξύλινη φλάντζα καλουπιού αγωγού εισόδου.

2. Προετοιμασία καλουπιού.

Όταν παραλάβουμε το καλούπι είχε τραχύτητα επιφάνειας περίπου σαν να είχε τριφτεί με 200άρι γυαλόχαρτο. Όμως, ο αγωγός εισόδου πρέπει να έχει λεία επιφάνεια για να έχει η ροή μικρότερες απώλειες και για να έχουμε καλύτερα προφίλ ταχύτητας στην έξοδο του αγωγού εισόδου. Επίσης, η λεία επιφάνεια του καλουπιού είναι απαραίτητη για την άνετη αποκόλληση του αντιτύπου από το καλούπι.

Έτσι, το καλούπι τρίφτηκε αρχικά με 400άρι γυαλόχαρτο, έπειτα με 800άρι και τέλος με 1200άρι. Μετά το τρίψιμο φυσήξαμε με το πιστόλι αέρα την επιφάνεια και την

σκουπίσαμε με καθαρό πανάκι ώστε να ναι καθαρή. Πρέπει να σημειώσουμε ότι κατά τη διάρκεια του τριψίματος εγγέαμε στην περιοχή τριβής νερό (για να μην ‘στουμπώνει’ το γυαλόχαρτο), στραγγίζοντας ένα σφουγγαράκι.

Αφού λοιπόν η επιφάνεια ήταν αρκετά λεία, περάσαμε επάνω της 15 χέρια κερί (βλέπε παραγραφή για κερί) ώστε να είναι έτοιμο το καλούπι να δεχθεί τα υλικά κατασκευής του αντιτύπου (αγωγού εισόδου). Να σημειώσουμε ότι κερώθηκε και η ξύλινη φλάντζα επίσης 15 φορές και ότι τις πρώτες 5 φορές κερώναμε το καλούπι και τη φλάντζα χωρίς να είναι τοποθετημένη η φλάντζα στο καλούπι, ενώ μετά τις 5 φορές τοποθετήσαμε τη φλάντζα στο καλούπι και τα κερώναμε μαζί για τις υπόλοιπες 10 φορές προσέχοντας σε κάθε χέρι κερί να βάζουμε μπόλικο κερί στην ένωση φλάντζας-καλουπιού ώστε να καλυφθεί το μεταξύ τους κενό. Αυτό γίνεται ώστε να μην εισχωρήσει ο πολυεστέρας ανάμεσα από τη φλάντζα και το καλούπι. Στο Σχήμα Π4.4 φαίνεται το καλούπι μετά το κέρωμα.



Σχήμα Π4.4: Το καλούπι κερωμένο και έτοιμο για χρήση.

3. Κατασκευή αντίτυπου.

A. Πέρασμα καλουπιού με gelcoat.

Αφού το καλούπι ήταν κερωμένο περάσαμε πρώτα με το πινέλο ένα χέρι **gelcoat**. Αυτό θα αποτελεί την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού εισόδου. Το υλικό αυτό είναι ουσιαστικά πολυεστέρας χρωματισμένος και υπάρχει στο εμπόριο στα βασικά χρώματα. Για την εφαρμογή του αναμιγνύεται με τον καταλύτη που αναμιγνύεται κι ο πολυεστέρας, στην ίδια αναλογία (20gr hardener/1kg gelcoat). Το gelcoat έχει επίσης κάποιες προσμίξεις ώστε η επιφάνεια να είναι ανθεκτική στην έκθεση σε εξωτερικούς χώρους και λειτουργεί ως μόνωση μεταξύ του αντικειμένου και του μέσου με το οποίο έρχεται σε επαφή, ενώ παράλληλα προσδίδει μια καλής ποιότητας επιφάνεια στο αντικείμενο. Εμείς επιλέξαμε το λευκό χρώμα επειδή το καλούπι είναι γκρι χρώματος

όπως είδαμε παραπάνω. Ο λόγος είναι ότι με αυτόν τον τρόπο υπάρχει αρκετή αντίθεση ανάμεσα στα δύο χρώματα με αποτέλεσμα όταν περνάμε με gelcoat την επιφάνεια του καλουπιού, να καταλαβαίνουμε που έχουμε περάσει και που όχι. Αυτό είναι σημαντικό γιατί πρέπει οπωσδήποτε να καλυφθεί με gelcoat όλη η επιφάνεια που θα περασθεί με πολυεστέρα αργότερα ώστε η τελική επιφάνεια να είναι ομοιόμορφη και το εσωτερικό του αντικειμένου προστατευμένο.

Αφού περάσουμε λοιπόν όλη την επιφάνεια ένα χέρι gelcoat πρέπει να το αφήσουμε ένα εικοσιτετράωρο να ολοκληρώσει τη διαδικασία σκλήρυνσής του. Μετά από 24 ώρες λοιπόν αν θέλουμε μπορούμε να περάσουμε άλλο ένα χέρι gelcoat ώστε να βεβαιωθούμε ότι είναι επαρκώς καλυμμένη η επιφάνεια. Αν δε διαπιστώσουμε ότι με το πρώτο χέρι για κάποιο λόγο έχουν αφηθεί άβαφτα σημεία, τότε είναι υποχρεωτικό να περάσουμε και δεύτερο χέρι. Εμείς στο παρόν αντικείμενο περάσαμε δύο χέρια. Να σημειώσουμε ότι το κάθε χέρι έχει πάχος από 0.5 έως 0.8 mm.



Σχήμα Π4.5: Το καλούπι περασμένο με gelcoat.

B. Πέρασμα καλουπιού με πολυεστέρα ("μπόμπα").

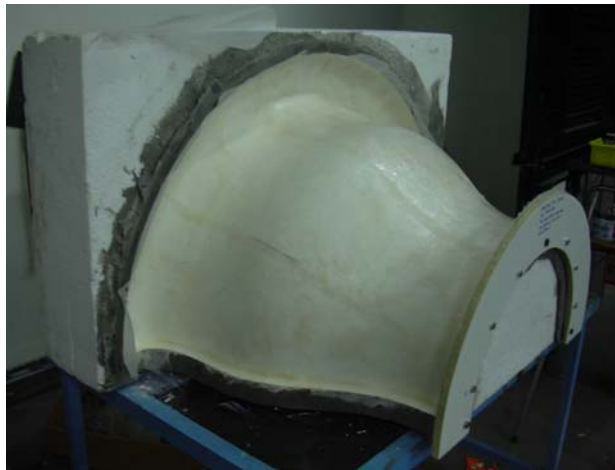
Αφού λοιπόν στέγνωσε το gelcoat, περάσαμε από πάνω ένα χέρι πολυεστέρα σκέτο, σε όλη την επιφάνεια. Αυτό λέγεται στην καθομιλουμένη των κατασκευών, 'μπόμπα', διότι ο πολυεστέρας έχει αναμιχθεί με λίγο περισσότερο καταλύτη ώστε να αρχίσει να πήζει (τζελάρει) λίγο πιο γρήγορα για να μην προλάβει να στάξει και ταυτόχρονα τα γεμίσει όλα τα μικροβαθουλώματα που υπάρχουν στην στρώση του gelcoat. Αυτό ισχυροποιεί την στρώση του gelcoat και μαζί της και την επιφάνεια του αντικειμένου, αλλά ταυτόχρονα δημιουργεί και μια πιο λεία επιφάνεια, έτοιμη να δεχτεί την πρώτη στρώση ινών γυαλιού, ώστε να μην υπάρχουν βαθουλώματα που μπορεί να εγκλωβίσουν αέρα όταν τοποθετηθεί από πάνω το πρώτο πανί. Αυτές οι περιοχές με φυσαλίδες αέρα, εάν προκύψουν κάνουν ανίσχυρο το αντικείμενο εκεί που υπάρχουν και το χειρότερο είναι ότι βρίσκονται πολύ κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του αντίτυπου με αποτέλεσμα να είναι εκεί πιθανό σημείο εκκίνησης οπής. Αν γίνει αυτό θα έχουμε προβληματική επιφάνεια και κίνδυνο αποδυνάμωσης στο εσωτερικό πλέον του αντικειμένου.

Γ. 1^η στρώση ινών γυαλιού τύπου "αράχνη".

Αφού λοιπόν τζέλαρε ο πολυεστέρας (μετά από 30 με 60 λεπτά), περάσαμε ένα τις πρώτες ίνες γυαλιού με πολυεστέρα. Για την πρώτη αυτή στρώση δεν βάλουμε υαλοπίλημα των 0.6 mm αλλά το ύφασμα τύπου 'αράχνη' και λέγεται έτσι λόγω του λεπτού πάχους του (0.1 mm περίπου) και λόγω της πυκνής πλέξης του. Αποτελείται από πολύ λεπτές ίνες γυαλιού με μη κανονική πλέξη μεταξύ τους. Η τοποθέτηση των υαλοϊνών έγινε κατά τον άξονα συμμετρίας του bellmouth και αναλυτικότερα έχει ως εξής : Κόψαμε λωρίδες πανιού σε σχήμα τραπεζίου (Σχήμα Π4.6) ώστε η μικρή πλευρά του τραπεζίου να βρίσκεται στη μεγάλη διάμετρο της ξύλινης φλάντζας, και πιέζοντας απαλά με τα χέρια το πανί ώστε να ακολουθή τη γεωμετρία του καλουπιού, η μεγάλη πλευρά του τραπεζίου να βρίσκεται στη μεγάλη διάμετρο του χείλους εισόδου του bellmouth. Έτσι συνολικά βάλουμε 5 λωρίδες για να καλύψουμε όλο το καλούπι. Οι λωρίδες βέβαια δεν μπορούσαν να είναι μεγαλύτερες γιατί θα σκίζοταν το πανί αφού η επιφάνεια του καλουπιού έχει μεγάλες κλίσεις σε δύο επίπεδα Βέβαια, πριν βάλουμε τον πολυεστέρα υπήρχαν τσακίσματα στο πανί και δεν ακολουθούσε παντού την γεωμετρία, αλλά με το που πέφτει ο πολυεστέρας οι ίνες μαλακώνουν, και πιέζοντας συνεχώς και παντού με το πινέλο τότε επικάθεται το πανί πάνω στην επιφάνεια. Στο Σχήμα Π4.7 φαίνεται το καλούπι που έχει περαστεί με 2 χέρια gelcoat και ένα χέρι 'αράχνη'.



Σχήμα Π4.6: Ύφασμα ινών γυαλιού τύπου "αράχνη".



Σχήμα Π4.7: Πρώτη στρώση ινών γυαλιού τύπου "αράχνη" στο bellmouth.

Δ. Στρώσεις ινών γυαλιού (υαλοπίληματος).

Όταν λοιπόν είχε τζελάρει ο πολυεστέρας μετά το χέρι ‘αράχνη’ που είχαμε περάσαμε νωρίτερα, περάσαμε το πρώτο χέρι **γυαλοπίλημα** των 0.6 mm με την ίδια ακριβώς λογική που περάσαμε και το χέρι ‘αράχνη’. Τελικά, περάσαμε 4 χέρια γυαλοπίλημα, το ένα μετά το άλλο και το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα Π4.8.



Σχήμα Π4.8: Στρώσεις υαλοπίληματος στο bellmouth.

Ε. Αποκόλληση αντικειμένου (ξεκαλούπωμα).

Στη συνέχεια, αφού είχε στεγνώσει ο πολυεστέρας, ήμασταν έτοιμοι να ξεκινήσουμε τη διαδικασία της **αποκόλλησης** του αντίτυπου από το καλούπι. Πρώτα ξεκινήσαμε αφαιρώντας τη φλάντζα. Στο Σχήμα Π4.9 (αριστερά) μπορούμε να δούμε τη χρησιμότητα της ξύλινης φλάντζας καθώς έχει δημιουργηθεί το αντίγραφο της στο αντίτυπο, που είναι και η φλάντζα που επιθυμούμε. Τέλος, αποκολλήσαμε το αντίτυπο από το καλούπι ξεκινώντας από τα όρια των πανιών και ανασηκώνοντας τοπικά σε αυτά τα σημεία το αντίτυπο, διοχετεύσαμε από αυτά τα ανοίγματα αέρα μεγάλης παροχής με χρήση λάστιχου το οποίο παίρνει παροχή από το κομπρεσέρ του εργαστηρίου. Η μεγάλη παροχή αέρα αυξάνει την πίεση μεταξύ του αντιτύπου και του καλουπιού στις περιοχές που είχαν αποκολληθεί, με αποτέλεσμα να τείνει να απομακρύνει το καλούπι από το αντίτυπο, κι έτσι , να αποκολληθούν και οι υπόλοιπες περιοχές και κατ’ επέκταση ολόκληρο το αντίτυπο. Στο Σχήμα Π4.9 (δεξιά) φαίνεται το αντικείμενο μετά την αποκόλληση.



Σχήμα Π4.9: Αποκόλληση (ξεκαλούπωμα) του αντικειμένου (μισό bellmouth).

ΣΤ. Επαναπροετοιμασία του καλούπιού.

Στο Σχήμα Π4.10 φαίνεται το καλούπι μετά την αποκόλληση, στο οποίο παρατηρούμε κάποια γδαρσίματα που προέρχονται από τη βίαιη και λανθασμένη προσπάθεια αποκόλλησης, με χρήση ακατάλληλων αντικειμένων (μεταλλικών, αιχμηρών πλαστικών) που σφηνώναμε ανάμεσα στο καλούπι και το αντίτυπο. Γι' αυτό, τρίψαμε ελαφρά με 1200 γυαλόχαρτο το καλούπι επειδή είχε αποκτήσει ανεπιθύμητη τραχύτητα, και το περάσαμε με 5 χέρια κερί, ώστε να είναι έτοιμο για την δεύτερη αντιγραφή στην οποία ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως αναφέραμε πριν.



Σχήμα Π4.10: Καλούπι μετά την αποκόλληση.

Σύνοψη διαδικασίας κατασκευής πολυεστερικών αντικειμένων.

- Βήμα 1. Τρίψιμο επιφάνειας καλούπιού (τουλάχιστον μέχρι No.1200 γυαλόχαρτο).
- Βήμα 2. Κέρωμα επιφάνειας καλούπιού (τουλάχιστον 10 χέρια).
- Βήμα 3. Πέρασμα 2 χέρια Gelcoat (ανά 24ωρο).
- Βήμα 4. Πέρασμα ένα χέρι πολυεστέρα χωρίς ίνες γυαλιού ('μπόμπα').
- Βήμα 5. Τοποθέτηση μιας στρώσης λεπτού υφάσματος τύπου 'αράχνη' (τουλάχιστον 3 ώρες μετά τη 'μπόμπα').
- Βήμα 6. Τοποθέτηση του επιθυμητού αριθμού στρώσεων υαλοπλήματος. Η τοποθέτηση της νέας στρώσης πρέπει να γίνεται μόλις τζελάρει η προηγούμενη στρώση, ειδικά, εάν έχει στεγνώσει τελείως πρέπει πρώτα να τρίψουμε ελαφρά τη στεγνή στρώση και έπειτα να τοποθετήσουμε νέα.
- Βήμα 7. Αποκόλληση αντικειμένου (Ξεκαλούπωμα). Γίνεται με αντικείμενα που δεν τραυματίζουν το καλούπι και το αντικείμενο. Ενδείκνυται η χρήση αέρα μεγάλης παροχής.

Π4.3 Κατασκευή χείλους εξόδου αποκλίνοντος αγωγού εξόδου.

Για την κατασκευή του χείλους εξόδου ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με αυτήν του bellmouth. Για το λόγο αυτό θα παρουσιάσουμε μόνο φωτογραφίες από τα στάδια κατασκευής του καλούπι και του αντικειμένου με σύντομη περιγραφή.



Σχήμα Π4.11: Το καλούπι στο πρώιμο στάδιο. Αριστερά : Οι δίσκοι φελιζόλ πριν τη διαμόρφωση. Δεξιά : Μετά τη διαμόρφωση του κυκλικού τόξου στο καλούπι με τη χρήση του βραχίονα διαμόρφωσης φελιζόλ.



Σχήμα Π4.12: Η διαμόρφωση στο καλούπι για την υποδοχή του ξύλινου δακτυλίου συγκράτησης της φλάντζας του καλουπιού.



Σχήμα Π4.13: Αριστερά : Πέρασμα με πινέλο της εποξειδικής ρητίνης στο καλούπι για την προστασία του φελιζόλ από τον πολυεστέρα. Δεξιά : το καλούπι μετά τα τρία χέρια βαφής του με πολυεστερικό στόκο πιστολιού .



Σχήμα Π4.14: Το καλούπι μετά το τρίψιμο του πολυεστερικού στόκου και του στοκαρίσματος. Έχει περαστεί και η φλάντζα περιμετρικά που αποτελείται από λωρίδα πλεξιγκλάς και αλουμινοταινία.



Σχήμα Π4.15: Το καλούπι με τοποθετημένη τη φλάντζα και περασμένο με τα δύο χέρια gelcoat.



Σχήμα Π4.16: Πρώτη στρώση με ίνες γυαλιού τύπου αράχνη. Σε αυτό το στάδιο διαμορφώσαμε ένα ράδιο στην ακμή της φλάντζας (αριστερά) με πολυεστέρα και πανί.



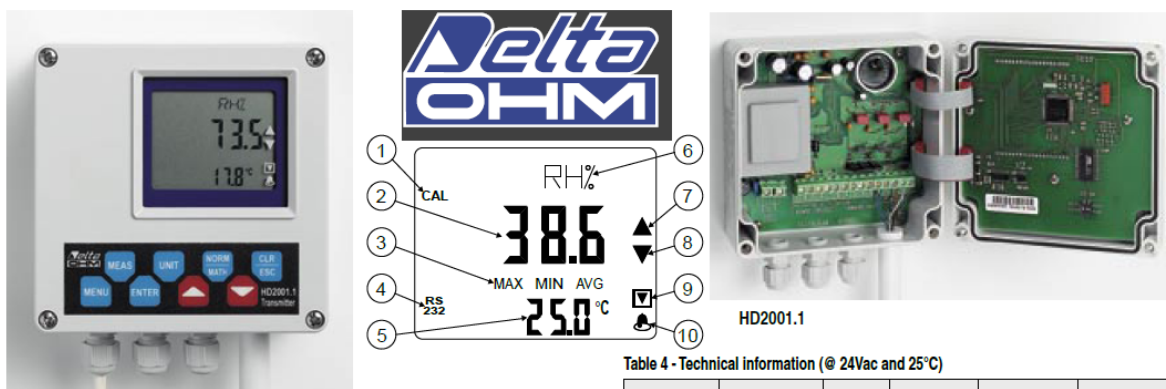
Σχήμα Π4.17: Αριστερά : Μετά τις τρεις στρώσεις υαλοπλήματος. Δεξιά : Η προσπάθεια ξεκαλούπωματος του αντικειμένου με χρήση ματσόλας στο ξύλινο δακτύλιο.



Σχήμα Π4.18: Το χείλος εξόδου μετά το ξεκαλούπωμα.

Π5

**Τεχνικά χαρακτηριστικά μετρητικών
οργάνων – μηχανολογικού –
ηλεκτρονικού εξοπλισμού**



HD2001.1: Temperature, humidity, pressure, serial and analogue output.

Current and voltage analog outputs for the HD2001.1 and HD2001.3 models

The models are provided with current or voltage analog outputs, one for each value, each associated with a physical value measured by the instrument. The available outputs are 0...20mA, 4...20mA, 0...10Vdc and 2...10Vdc. The relation between output range (current and voltage) and input range is fixed: the output minimum and maximum values are associated with the minimum and maximum values of the input variables.

HD2001.1 and HD2001.3 Inputs / analog outputs ratio				
Inputs		Analog outputs		
-20 ... +80°C 0...100%RH 600...1100mbar		4...20mA 0...20mA 0...10Vdc 2 ... 10Vdc		
Dip-switch no. 2	0mA	0mA	4mA	4mA
Position of the jumper	I	V	I	V
Output selected	0 ... 20mA	0 ... 10Vdc	4 ... 20mA	2 ... 10Vdc

Calibration of the relative humidity sensor HD2001 - HD2001.1 - HD2001.3

ATTENTION: to calibrate the relative humidity sensor correctly it is fundamental to know and abide by the physical phenomena on which the measurement is based: this is the reason we recommend evaluating a new calibration carefully before intervening and, in case it is to be performed, we recommend following

Calibration of the humidity sensor offset:

all that is reported below rigorously.

1. Enter the probe in the container with the saturated solution at 75% relative humidity at about 20°C. Wait at least 30 minutes.
2. Using the MENU button select the item "ENaBLE CALibration", press the UP arrow until reaching #51: the calibration procedure is started automatically.
3. The display indicates "CAL RH". Using the arrows, adjust the relative humidity value indicated on the display according to the temperature of the calibration salts: the value to be set is shown on the container's label of the saturated salt used.
4. Wait a few minutes to ensure the reading is stable.
5. Press ENTER to confirm this value. The instrument returns to normal measurement.
6. Remove the probe from the container and close it immediately using its lid.

Calibration of the humidity sensor slope:

1. Enter the probe in the container with the saturated solution at 33% of relative humidity. Wait at least 30 minutes.
2. Using the MENU button select the item "ENaBLE CALibration", press the UP arrow until reaching #51: the calibration procedure is started automatically.
3. The display indicates "CAL RH". Using the arrows, adjust the relative humidity value indicated on the display according to the temperature of the calibration salts: the value to be set is shown on the container's label of the saturated salt used.
4. Wait a few minutes to ensure the reading is stable.
5. Press ENTER to confirm this value. The instrument returns to normal measurement.
6. Remove the probe from the container and close it immediately using its lid.

Table 4 - Technical information (@ 24Vac and 25°C)

		HD2001	HD2001.1	HD2001.2	HD2001.3
Inputs					
Temperature	Sensor	NTC 10kΩ			
	Working range	-20 ... +80°C			
	Accuracy	±0.3°C in the range 0...+70°C ±0.4°C outside this range			
Humidity	Sensor capacity	300pF			
	%RH working range	5...98%RH			
	TD working range	-20 ... +80°C			
	Accuracy	±2.5%RH			
Pressure	Working range	600...1100mbar - 600...1100hPa - 60.0...110.0kPa	---		
	Accuracy	±0.5mbar @25°C			
	Fluid contacting the membrane	Air - Non corrosive gas - No liquids			
Wind speed	Type of sensor	---	---	Hot-wire	---
	Working range	---	---	0...5m/s	---
	°C working range	---	---	-20 ... +80°C	---
	Accuracy	---	---	±0.1m/s @25°C	---
Outputs					
Communications	Type	RS232C and Multidrop RS485			
	Maximum Baud Rate	9600 baud			
Alarm	Type of output	Open collector (low-activated)			
	Maximum voltage	30Vdc			
	Maximum power	200mW			
Variables		Temperature, %RH, dew point TD, barometric pressure, pressure drop.		Temperature, %RH, dew point TD, barometric pressure, pressure drop and wind speed	Temperature, %RH, dew point TD
Analog	Type of outputs	---	4...20mA 0...20mA 0...10Vdc 2 ... 10Vdc	---	4...20mA 0...20mA 0...10Vdc 2 ... 10Vdc
	Load resistance	---	Current output: 500Ω max Voltage output: 100kΩ min	---	Current output: 500Ω max Voltage output: 100kΩ min
	Resolution	---	16bit	---	16bit
Power		24Vac ±10% 50...60Hz (230Vac ±10% on request)			
Software		DeltaMet8			
Environmental conditions	Temperature range	-20 ... +80°C			
	Humidity range	0...90%RH - (without condensation)			
	Protection degree	Electronic IP67			

Σχήμα Π5.1: Αισθητήρας μέτρησης συνθηκών περιβάλλοντος (Βαρομετρική πίεση, Θερμοκρασία, Σχετική υγρασία) (TRA116).

Furness Controls

Pressure and Flow Measurements MICROMANOMETERS

MODELS

FCO12	10%	100%	metres/sec
Model 1	±1.999 Pascals	±19.99 Pascals	0-5.6 m/s
Model 2	±19.99 Pascals	±199.9 Pascals	0-18 m/s
Model 3	±199.9 Pascals	±1999 Pascals	0-56 m/s
Model 4	±1.999 kPascals	±19.99 kPascals	0-180 m/s

FCO14	1%	10%	100%	metres/sec
Model 1	±0.1 Pascals	±1 Pascals	±10 Pascals	0-4 m/s
Model 2	±1 Pascals	±10 Pascals	±100 Pascals	0-12 m/s
Model 3	±10 Pascals	±100 Pascals	±1000 Pascals	0-40 m/s
Model 4	±100 Pascals	±1000 Pascals	±10000 Pascals	0-120 m/s
Model 5	±200 Pascals	±2000 Pascals	±20000 Pascals	0-180 m/s

GENERAL SPECIFICATION

Accuracy	±0.5% FS (±1 digit FCO12), (FCO14 display 1% FSD)
Resolution FCO12	1 part in 2,000 each range
Resolution FCO14	1 part in 100 each range
Temperature effect on range	±0.5% per 10°C
Temperature effect on zero (manual setting)	±0.04%, 100% range per 10°C
Zero stability on automatic	Drift is less than the readout resolution
Response	Variable damping 20 ms to 10 seconds
Overload	10 x max DP
Static	±1 bar gauge pressure
Output	±5 V each pressure range; 0-5 V flow range
Supply	Four 'D' size cells, Ni-Cad fitted give 14 hours use on 40 hours on FCO14, 200-240 ac or 100-120 ac power unit supplied recharges internal cells in 15 hours.



FCO12

Furness Controls Limited

Beeching Road, Bexhill, East Sussex, UK. TN39 3LJ
Tel: +44 1424 730316 Fax: +44 1424 730317
E-mail: sales@furness-controls.com
Web site: <http://www.furness-controls.com>

Σχήμα Π5.2: Μικρομανόμετρο Furness Control FCO12 για βαθμονόμηση μεταλλακτών πίεσης (ELTEM007).



Description

The FCO16/18 series of digital pressure indicators are panel-mounted, mains operated, electronic manometers for the measurement of differential air pressures. They cover low ranges in four basic models from $\pm 19.99\text{Pa}$ to $\pm 1999.9\text{Pa}$ or equivalent units. The display is by a clear bright $3\frac{1}{2}$ -digit LED. An adjustable response control is fitted to provide a clear steady reading under turbulent conditions. Instruments have a $\pm 2\text{V d.c.}$ analogue output signal. Input is mains a.c. 110 or 240 volts. Options include trip level cards with one or two adjustable contact changeover points according to model chosen. Red LED indicators show the level set. A lockable perspex front cover is also available if required. The FCO16/18 pressure indicators are designed to monitor and display air pressures or flows, generally being built into ancillary equipment, panels etc. They offer a practical solution to the problem of measuring low static or differential pressures without using a water column.

Models available

Model	FCO16	FCO18S	FCO18D
Model 1	$\pm 19.99\text{Pa}$	With single trip	With double trip
Model 2	$\pm 1999.9\text{Pa}$	With single trip	With double trip
Model 3	$\pm 1999\text{Pa}$	With single trip	With double trip
Model 4	$\pm 19.99\text{kPa}$	With single trip	With double trip

Options

Each measuring range is available as shown above with adjustable single or double trip levels by contact changeover rated at 250V 1 amp. Other scaleable measuring units are available at no extra cost. Lockable perspex front cover available for secure applications. Casing then rated at IP55.

Controls and connections

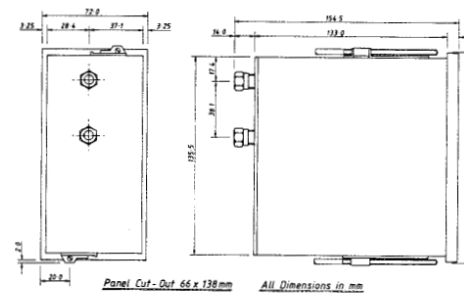
ZERO AND DAMPING CONTROLS by front panel trim pots. Trip level settings by push-button display plus front panel trim pots with individual hysteresis control.
MAINS CONNECTION by plug and socket at rear. Analogue output by jack plug at rear. Relay outputs by "D" socket at rear.
PNEUMATIC COUPLINGS BY $\frac{1}{8}$ " ID fishtails and/or $\frac{1}{4}$ " OD compression fittings at rear.

Specification

Accuracy of calibration	$\pm 1\%$ of reading
Resolution	$\pm 0.05\%$, ± 1 digit
Compatibility	Air and non-corrosive gases
Hysteresis	Less than 0.1%
Temperature co-efficient	$\pm 0.5\%$ FSD per 10°C
Static pressure rating	± 1 bar
Overload	$100 \times \text{DP range}$ (10,000%), max. 1 bar
Supply voltage	110 to 120 or 220 to 240V a.c.
Output signal	$\pm 2\text{V d.c.}$ analogue
Housing material	Glass reinforced fibre (Noryl)
Housing rating	IP55 with optional front cover only
Dimensions	144W \times 72H \times 150D mm
Weight	1.2Kg
Relay contact rating	250V 1amp (FCO18 only)

Dimensions

FCO16/18



Σχήμα Π5.3: Μεταλλάκτες πίεσης Furness Control FCO16 (TRA040, TRA041, TRA043, TRA044).



TRANSMITTER FOR LOW

PRESSURES MOD. GM-100 D

TRA 081

Description:

The transmitters of pressure piezoresistive of the series GM is suitable for the measure of low pressure (relative, differential or vacuum).

Their applications can embrace from:

- The proportional control of level in liquids with you lower or high densities (system hidroneumática).
- The control of drops pressures in gasses.
- Control in filters.
- Etc.

Supply models:

GM 100-R (for relative pressure) The alone apparatus Has the entrance A.

GM 100-D (for differential pressure) The apparatus has two entrances: the A it corresponds the superior pressure and B to the inferior one.

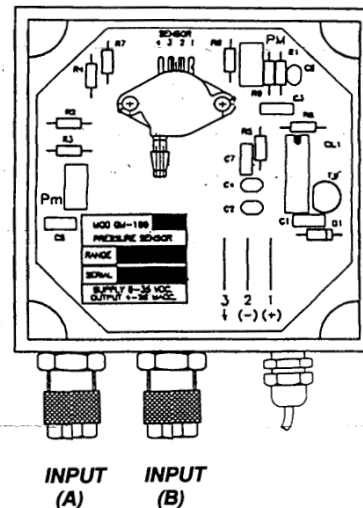
GM 100-V (for vacuum). The entrance is made por A.

Normalized work scales (mBar.):

Ranges	25	40	60	100	250	400
Burst pressure	750	750	750	750	1.500	1.500

General characteristics:

- Pneumatic connection to the medium by 4-6 mm. pneumatic piping.
- Presentation in aluminum box painted (80-80-60 mm.)
- Assembly position: any
- Electric connection through a three way conductor.
- Max. conductor cross-section: 1,5 mm
- Max. Section of the driver 1,5 mm²
- Delivered with calibration certificate
- Supply voltage: 8 - 35 Vdc.
- Intensity output 4-20 mA dc.
- Máx. resistance: typical 600 Ω to 24 Vdc.
- Linear response
- Possibility of zero and span adjustments
- Compensated pressure sensor at temperature from 0 and +85 degrees C.
- Response time 1 msec.
- Typical linearity between +/- 15 %FE



Σχήμα Π5.4: Μεταλλάκτες πίεσης Messtech GM100-D (TRA114-1:5, TRA115-1:5, TRA112, TRA113, TRA081).

efector100

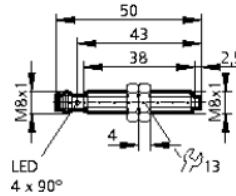


Inductive sensors

IE5282

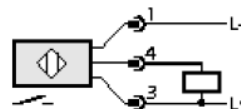
IEB3002-BPKG/V4A/AS
Metal thread M8 x 1
Plug and socket

Sensing range 2mm [nf]
non-flush mountable



Electrical design	DC PNP
Output	normally open
Operating voltage [V]	10...36 DC (PELV)
Current rating [mA]	200
Short-circuit protection	pulsed
Reverse polarity protection	yes
Overload protection	yes
Voltage drop [V]	< 2.5
Current consumption [mA]	< 15 (24 V)
Real sensing range [mm]	2 ± 10 %
Operating distance [mm]	0...1.6
Switch-point drift [% / Sr]	-10...10
Hysteresis [% / Sr]	1...15
Switching frequency [Hz]	2000
Correction factors	mild steel = 1 / stainless steel approx. 0.7 / brass approx. 0.5 / Al approx. 0.4 / Cu approx. 0.3
Operating temperature [°C]	-25...80
Protection	IP 67, III
EMC	EN 60947-5-2; EN 55011 class B
Housing material	high-grade stainless steel; LCP
Function display	
Switching status LED	yellow (4 x 90°)
Connection	M8 connector

Wiring



Remarks

IP 65 / III if pushed on, IP 67 / III if screwed on

Accessories (included)

2 lock nuts

ifm electronic gmbh · Teichstraße 4 · D-45127 Essen

— We reserve the right to make technical alterations without prior notice. — GB - IE5282 - / — 06.03.2003

Σχήμα Π5.5: Αισθητήρας προσέγγισης (Proximity Sensor) ifm IE5282 2^{ης} Πιπερωτής (Proxy003b) .

Signal Converters & Isolators
 Frequency To Analogue Converter PXF-20



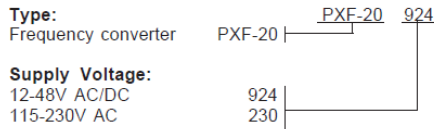
DESCRIPTION

Frequency converter for converting frequency to an analogue process signal. The frequency converter has NPN/PNP/NAMUR input in 5 ranges from 0-5kHz. The frequency range for input are selected by a rotary switch and type of analogue output are selected via choice of terminal - see connection diagram.

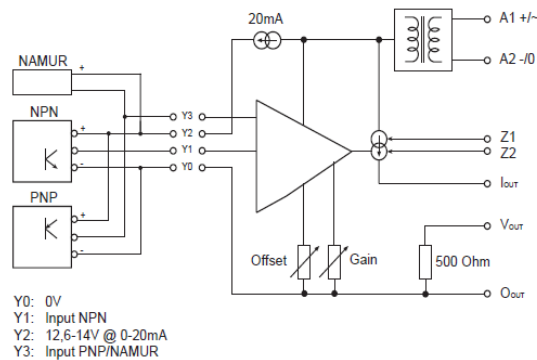
Features

- NPN/PNP/namur input in 5 ranges.
- Output 0-10VDC/2-10VDC/0-20/4-20mA - selected via terminals.
- Output offset and gain adjustable $\pm 5\%$.
- Yellow LED indication of input less than 5%.
- Galvanically isolated supply/output.
- Internal sensor supply 12,6V to 14V @ 0-20mA.
- Operating voltage 24-48V AC/DC, 115-230V AC.

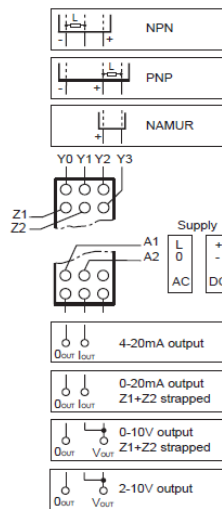
VERSIONS/ORDERING CODES



BLOCK DIAGRAM



WIRING DIAGRAM

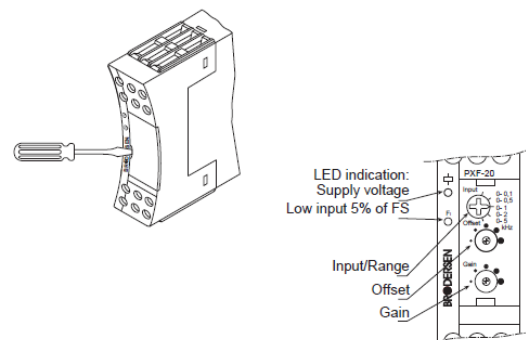


ADJUSTMENT

PXF-20 is delivered adjusted to offset = 0% and gain = 100%. To compensate for any loss in cables, etc. is it possible to adjust the output signal.

Remove the front cover. The offset (zero) and gain (span) on the output signal can be adjusted $\pm 5\%$ of max. signal. Put the cover back on to avoid any accidental adjustment of the relay. See fig. 1.

Fig. 1



BRODERSEN

Export:
 Tel: +45 46 74 00 00
 Fax: +45 46 75 73 36
 E-mail: bc@brodersencontrols.com

United Kingdom:
 Tel: +44 020 8546 4283
 Fax: +44 020 8547 3628
 E-mail: bcs@brodersen.co.uk

Germany:
 Tel: +49 208 46954-0
 Fax: +49 208 46954-50
 E-mail: ba@brodersen.de

Σχήμα Π5.6: Μετατροπέας συχνότητας (Frequency Converter) Brodersen PXF20-230 (ELTEM044, ELTEM044-2).

Signal Converters & Isolators
Frequency To Analogue Converter PXF-20

TECHNICAL DATA**Input signal:**

NPN/PNP frequency input
Frequency ranges/selected by rotary switch.
0-100Hz
0-500Hz
0-1000Hz
0-2000Hz
0-5000Hz
Internal supply for sensor max. 20mA. Sensors with higher current consumption require external supply.

Output:

Output signal	R_{MAX}
4-20mA DC	500 Ohm
0-20mA DC	500 Ohm
0-10V DC	via internal 500 Ohm shunt.

Selected via terminals.

Offset (zero) and gain (span) are adjustable $\pm 5\%$. see. fig. 1.

Accuracy: <1%, without adjustment.
Linearity: <0,05% of full scale.
Temp. coefficient 0,02%/°C.
Ripple (RMS): <0,1% at range >1kHz.
<1% at range <1kHz.

Supply voltage:

Supply voltage	Consumption
12-48V AC/DC (10,5-60)V AC/DC	2W
115-230V AC (90-264)V AC	2W

All galvanically isolated 3,75kV AC 1 min. to input and output.

General data:

Ambient temperature:-20 to 55°C.
Storage temperature:-40 to 80°C.
Mounting: 35mm DIN-rail (EN50022).
Terminals: Screw terminals with dual compartment.
Terminal screws are combined crosshead/slotted. Up to 2 x 2,5mm² wire (2 x 1,5mm² inc. ferrule).
Recommended torque, 0,5Nm., Max. 0,7 Nm. (VDE0609-2)

Indicators: Green LED = operating voltage.
Yellow LED = input less than 5-10% of FS.

Protection: IP20.
Electric isolation: 3,75kVAC (1 min.) between supply, INPUT and supply (EN60950).
Note: No galvanic isolation between input and analogue output.

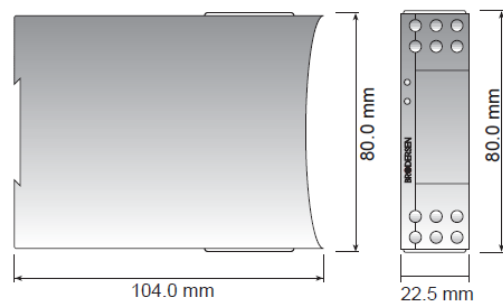
Housing: Noryl (GE), UL94V1.
Terminal block: Noryl (GE), UL94V0.
Weight: 170 g.

SPECIFICATIONS:

PXF-20 is designed and developed with regard to relevant specifications:

- EN60204-1 / VDE0113 electrical material on machines.
- VDE0110 / IEC664 Isolation specifications/creeepage and clearance distances.
- Electrical safety in accordance with EN61010.
- IEC414 Safety regulations for control and monitoring equipment.
- EMC: Emission EN50081-1
Immunity EN50082-2
- Humidity in accordance with IEC68-2-3; RH=95%, 40°C.
- Vibration in accordance with IEC68-2-6.
- Shock when mounted, in accordance with IEC68-2-27.

PXF-20 is CE-marked in accordance with EMC and the Low Voltage Directive.

MECHANICAL DIMENSIONS

(Συνέχεια) Μετατροπέας συχνότητας (Frequency Converter) Brodersen PXF20-230 (ELTEM044, ELTEM044-2).

Piezoelectric Accelerometer Monitoring DeltaTron[®] Accelerometer — Types 8341

USES

- In-flight measurements
- Industrial applications

FEATURES

- Insulated case
- Hermetically sealed
- High resolution
- Low-impedance output



Description

Type 8341 is a piezoelectric Shear design accelerometer with integral electronics initially developed for in-flight active vibration control on rotor and fixed wing aircraft. The transducer features case insulation and is hermetically sealed to enclosure protection IP 67. The housing material is stainless steel.

Type 8341 has a top connector and is mounted on the object by means of a 1/4"–28 UNF threaded stud.

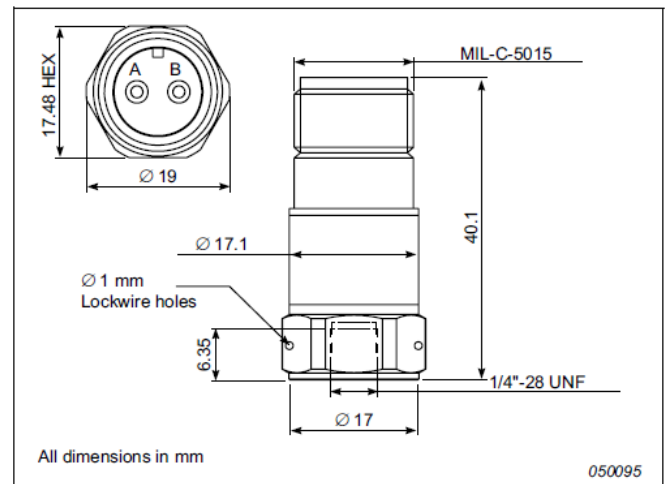
Characteristics

The piezoelectric accelerometer features a built-in preamplifiers. The sensitivity is expressed in terms of voltage per unit acceleration (mV/g).

The Shear design gives a high degree of linearity, and excellent immunity to base bending and temperature fluctuations. The signal is collected and amplified in the built-in amplifier.

Calibration

The sensitivity given on the calibration chart has been measured at 159.2 Hz with a 95% confidence level, using a coverage factor $k = 2$.



Specifications – Monitoring DeltaTron Accelerometer Type 8341

	Units	8341	
Dynamic Characteristics			
Voltage Sensitivity (@ 160Hz)	mV/g	100 ±10%	
Measuring Range	g	± 50	
Mounted Resonance Frequency	kHz	27	
Amplitude Response ±10%	Hz	0.5 to 10000	
Residual Noise	mg	0.04	
Transverse Sensitivity	%	<5	
Electrical Characteristics			
Output Impedance	Ω	<100	
DC Output	At room temperature	V	12 ±1
Bias Voltage	In specified temp. range	V	8 to 16
Power Supply		mA	2 to 20
Start-up Time		s	3
Grounding			Case insulated
Environmental Characteristics			
Temperature Range	°C (°F)		-50 to +100 (-60 to +212)
Humidity			Hermetically sealed
Max. Operational Shock (peak)	g pk		5000
Base Strain Sensitivity	Equiv. g/μ strain		<0.012
Thermal Sensitivity	Equiv. %/°C (%/°F)		0.11 (0.06)
Physical Characteristics			
Dimensions			See outline drawing
Weight	gram (oz.)		41 (1.45)
Case Material			Stainless steel
Connector			MIL-C-5015
Mounting			¼"-28 UNF thread
Mounting Torque	Nm (lb. in.)		1.8 (15)

All values are typical at 25°C (77°F) unless measurement uncertainty is specified

COMPLIANCE WITH STANDARDS



Compliance with EMC Directive and Low Voltage Directive of the EU



Compliance with the EMC requirements of Australia and New Zealand

Ordering Information

Type 8341 includes the following accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- ¼"-28 UNF mounting stud, length 8.7 mm (0.34")

OPTIONAL ACCESSORIES*

- AO 0614: Tefzel® Double-shielded Cable, MIL-C-5015 to Open End, 15 m (49 ft.), -40 to +125°C (-40 to +257°F)
- AO 0610: Tefzel Double-shielded Cable, MIL-C-5015 to BNC, 15 m (49 ft.), -40 to +125°C (-40 to +257°F)
- UA 2056: ¼"-28 UNF mounting stud, length 8.7 mm, (0.34"), set of 10

SERVICE

- 8341-CAF: Industrial IEPE Accelerometer, Accredited Calibration
- 8341-CAI: Industrial IEPE Accelerometer, Accredited Calibration Performed as initial
- 8341-CTF: Industrial IEPE Accelerometer, Traceable Calibration
- 8341-CTI: Industrial IEPE Accelerometer, Traceable Calibration Performed as initial
- 8341-EW1: Industrial IEPE Accelerometer, Extended Warranty, one year extension

* Additional accessories and cables are available (see www.bksv.com)

(Συνέχεια) Επιταχυνσιόμετρα (Accelerometers) Brüel & Kjær 8341 (VIB026, VIB027).



4-Channel DeltaTron Conditioning Amplifier

2693 A 054

Specifications 2690, 2691, 2692 and 2693

Charge Input

CONNECTOR: TNC
(TNC to 10–32 UNF adaptor JP0162 included)
GROUNDING: Single-ended or floating
MAX. INPUT:
Differential Charge: 10 nC (peak)
Common Mode Voltage: 4.2 V (peak)
at gain ≥ 0.316 mV/pC (-10 dB gain with 1 nF transducer capacitance)
INPUT PROTECTION:
Differential Charge: ≤ 300 nC (peak)
Common Mode Voltage: ≤ 15 V (peak)
COMMON MODE REJECTION RATIO: > 50 dB (typical) (50 to 60 Hz with 1 nF transducer capacitance)
AMPLIFIER GAIN:
0.1 mV/pC to 10 V/pC (-20 to $+80$ dB gain with 1 nF transducer capacity)
TRANSDUCER SENSITIVITY RANGE:
 10^{-19} to 10^{-6} C/MU
(MU = mechanical units: m/s^2 , g, N, lb., Pa)
CALIBRATED OUTPUT:
Selectable in 10 dB steps. 100 dB attenuator range, 10^{-15} to 10^7 V/MU
 $\pm 1\%$ for $0^\circ\text{C} \leq T_a \leq +40^\circ\text{C}$ and $\pm 2\%$ for $-10^\circ\text{C} \leq T_a \leq +55^\circ\text{C}$
Frequency range from $5 \times f_l$ to $0.2 \times f_u$
 f_l = lower freq. limit: 0.1, 1.0 or 10 Hz
 f_u = upper freq. limit: 0.1, 1, 3, 10, 30 or 100 kHz
FREQUENCY RANGE (-10%):
Acceleration: 0.1 Hz to 100 kHz (transducer cable length < 10 m)
Velocity (optional): 1.0 Hz to 10 kHz
Displacement (optional): 1.0 Hz to 1 kHz
LOW-PASS FILTER (-10%):
0.1, 1, 3, 10, 22.4, 30 or 100 kHz, attenuation slope 40 dB/decade
HIGH-PASS FILTER (-10%):
Acceleration: 0.1, 1.0 or 10 Hz
Velocity (optional): 1.0 or 10 Hz
Displacement (optional): 1.0 or 10 Hz
INHERENT NOISE (2 Hz to 22.4 kHz):
 < 5 fC referred to input, $-10^\circ\text{C} \leq T_a \leq +40^\circ\text{C}$
 < 10 fC referred to input, $40^\circ\text{C} \leq T_a \leq +55^\circ\text{C}$
(amplifier sensitivity > 20 dB) with 1 nF transducer capacitance)
HARMONIC DISTORTION AND NOISE (2 Hz to 22.4 kHz, $Q_{in} \leq 2$ nC peak, $V_{out} \leq 3.16$ V peak):
 $< 0.003\%$ for amplifier gain ≤ 0.1 V/pC (< 40 dB gain with 1 nF transducer capacitance)
ENVIRONMENTAL SUSCEPTIBILITY (referred to input):
Magnetic Field: < 0.2 fC/(A/m)
Electromagnetic Field: < 20 fC/(V/m) or < 4 fC/V
Vibration (10 to 500 Hz): < 30 fC/(m/s^2)
MOUNTED RESONANCE TESTING:
EP Patent 715.722, US Patent 5.753.793
Mounted resonance testing of the accelerometer and cable interconnection, controllable from front panel and RS–232 interface
TEST TONE OSCILLATOR:
 $\omega = 1000$ rad/s (159.2 Hz), sinusoidal
Test Level: 1 mV to 10 V ($\pm 1\%$). Controllable from front panel and RS–232 interface
Reference Tone: 1 V (RMS), ($\pm 1\%$), 159.2 Hz
RISE TIME: > 7.5 V/ μs (100 kHz bandwidth)
CHANNEL TO CHANNEL PHASE-MATCH:
 $2.1^\circ - 0.1^\circ \times (f/f_l)$ from f_l to $20 \times f_l$
 0.1° from $20 \times f_l$ to $0.1 \times f_u$

* Brüel & Kjær patent

 $(f/f_u)^\circ$ from $0.1(f_u)$ to f_u f_l : lower freq. limit: 10 Hz f_u : upper freq. limit: 0.1, 1, 3, 10, 30 or 100 kHz**OPTIONAL FILTERS:**

Integration: single and double

Microphone Input

CONNECTOR: 7-pin LEMO
GROUNDING:
Outer shield grounded to chassis
INPUT IMPEDANCE:
1 M Ω || 300 pF (AC coupled)
MAX. INPUT: 31.6 V (peak)
INPUT PROTECTION: ≤ 50 V (peak)
AMPLIFIER GAIN:
 -20 to $+60$ dB (80 dB with reduced specs.)
TRANSDUCER SENSITIVITY RANGE:
 10^{-12} to 10^3 V/MU
(MU = mechanical units: Pa, mm)
CALIBRATED OUTPUT:
Selectable in 10 dB steps. 100 dB attenuator range, 10^{-15} to 10^7 V/MU
 $(\pm 0.1$ dB for $0^\circ\text{C} \leq T_a \leq +40^\circ\text{C}$ and ± 0.2 dB for $-10^\circ\text{C} \leq T_a \leq +55^\circ\text{C}$)
Frequency range from $5 \times f_l$ to $0.2 \times f_u$
 f_l = lower freq. limit: 0.1 or 20 Hz
 f_u = upper freq. limit: 0.1, 1, 3, 10, 22.4, 30 or 100 kHz)
POLARIZATION VOLTAGE (± 0.5 V or $\pm 0.25\%$):
0 or 200 V (all channels simultaneously selected, short-circuit protected)
PREAMPLIFIER SUPPLY:
Fixed ± 14 V, ± 40 V or controlled automatically in accordance with input range (short-circuit protected)
FREQUENCY RANGE (-1 dB):
0.1 Hz to 100 kHz (gain ≤ 60 dB) (complies with IEC 1260 Class 0 and ANSI S1.11 Type 0–AA for $f_l = 0.1$ Hz and $f_u = 100$ kHz)
HIGH-PASS FILTER (-1 dB):
0.1 Hz, attenuation slope 40 dB/decade or 20 Hz, attenuation slope 80 dB/decade
LOW-PASS FILTER (-1 dB):
0.1, 1, 3, 10, 22.4, 30 or 100 kHz, attenuation slope 40 dB/decade
A-WEIGHTING FILTER:
Complies with IEC 651 Type 0
INHERENT NOISE (referred to input, gain > 20 dB):
 < 2 μV A-weighted
HARMONIC DISTORTION AND NOISE (2 Hz to 22.4 kHz, $V_{in} \leq 20$ V peak, $V_{out} \leq 3.16$ V peak):
 $< 0.003\%$ for amplifier gain ≤ 40 dB
ENVIRONMENTAL SUSCEPTIBILITY (referred to input):
Magnetic Field: < 0.2 $\mu\text{V}/(\text{A/m})$
Electromagnetic Field: < 10 $\mu\text{V}/(\text{V/m})$ or < 10 $\mu\text{V}/\text{V}$
Vibration (10 to 500 Hz): < 2 $\mu\text{V}/(\text{m/s}^2)$
CHARGE INJECTION CALIBRATION:
Verification of the entire measurement set-up including the microphone, preamplifier and connecting cable. Controllable from front panel and RS–232 interface
Reference Tone: 1 V (RMS) $\pm 1\%$, 1 kHz
OVERLOAD DETECTION:
Microphone preamplifier overload detection with respect to cable length (3 to 1000 meter)
RISE TIME:
 > 7.5 V/ μs (100 kHz bandwidth)

CHANNEL TO CHANNEL PHASE-MATCH: $5.1^\circ - 0.1^\circ \times (f/f_l)$ from f_l to $50 \times f_l$ ($f_l = 0.1$ Hz) $2.1^\circ - 0.1^\circ \times (f/f_l)$ from f_l to $20 \times f_l$ ($f_l = 20$ Hz) 0.1° from $50 \times f_l$ to $0.1 \times f_u$ ($f_l = 0.1$ Hz) 0.1° from $20 \times f_l$ to $0.1 \times f_u$ ($f_l = 20$ Hz) $(f/f_u)^\circ$ from $0.1(f_u)$ to f_u

Where:

 f_u = upper frequency limit: 0.1, 1, 3, 10, 22.4, 30 or 100 kHz**OPTIONAL FILTERS:**

A-, B-, C- and D-weighting (one module) (complies with IEC 651 Type 0)

Intensity Input

Specifications as for microphone input, except when using the "Intensity" filter.

CONNECTOR:

7-pin LEMO (two connectors on two input modules – adaptor required)

CHANNEL TO CHANNEL PHASE-MATCH AND FREQUENCY RESPONSE with "Intensity" filter (20 Hz HP/22.4 kHz LP, 40 dB/decade):

Complies with IEC 1043 standard Class 1 and ANSI S1.12–1995 Class 1, with Brüel & Kjær sound intensity probes.

(Conditions: output sensitivity for the two channels must be equal. Transducer sensitivity must be equal within 0.5 dB)

DeltaTron® Input

CONNECTOR: BNT**GROUNDING:** Single-ended or floating**INPUT IMPEDANCE:**1 M Ω || 100 pF (AC coupled)**MAX. INPUT:**Differential Voltage: ≤ 31.6 V (peak)

Common Mode Voltage: 4.2 V (peak)

INPUT PROTECTION:Differential Voltage: ≤ 50 V (peak)Common Mode Voltage: ≤ 15 V (peak)**COMMON MODE REJECTION RATIO:**

50 dB (50 to 60 Hz) (typical)

AMPLIFIER GAIN: -20 to $+60$ dB gain (80 dB with reduced specs.)**TRANSDUCER SENSITIVITY RANGE:** 10^{-12} to 10^3 V/MU(MU = mechanical units: m/s^2 , m/s, g, N, lb., Pa)**CALIBRATED OUTPUT**Selectable in 10 dB steps. 100 dB attenuator range, 10^{-16} to 10^7 V/MU. $(\pm 0.1$ dB for $0^\circ\text{C} \leq T_a \leq +40^\circ\text{C}$ and ± 0.2 dB for $-10^\circ\text{C} \leq T_a \leq +55^\circ\text{C}$)Frequency range from $5 \times f_l$ to $0.2 \times f_u$ f_l = lower frequency limit: 0.1, 1.0 or 10 Hz f_u = upper frequency limit: 0.1, 1, 3, 10, 22.4, 30 or 100 kHz)**CONSTANT CURRENT SUPPLY ($\pm 15\%$):** $+4$ mA or $+10$ mA with a $+28$ V voltage source**Tacho Probe Supply:** $+8$ V DC at BNT inner shield (short-circuit protected)**FREQUENCY RANGE (-10%):**0.1 Hz to 100 kHz (gain < 60 dB)

attenuation slope 40 dB

HIGH-PASS FILTER (-10%):

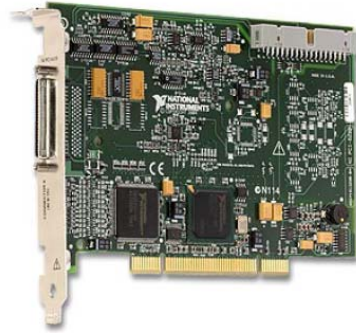
0.1 Hz or 1.0 Hz (with attenuation slope 40 dB) or 10 Hz (with attenuation slope 60 dB/decade)

Σχήμα Π5.8: Ενισχυτής επιταχυνσιόμετρον Brüel & Kjær NEXUS 2693-0S4 (VIB029).

Specifications 2690, 2691, 2692 and 2693 (cont.)

<p>LOW-PASS FILTER (–10%): 0.1, 1, 3, 10, 22.4, 30 or 100 kHz</p> <p>INHERENT NOISE (referred to input, gain >20 dB): <2.4 μV A-weighted <3.3 μV lin. 2 Hz to 22.4 kHz</p> <p>HARMONIC DISTORTION AND NOISE (2 Hz to 22.4 kHz, $V_{in} \leq 20$ V peak, $V_{out} \leq 3.16$ V peak): <0.003% for amplifier gain ≤ 40 dB</p> <p>RISE TIME: >7.5 V/μs (100 kHz bandwidth)</p> <p>ENVIRONMENTAL SUSCEPTIBILITY (referred to input): Magnetic Field: <0.2 μV/(A/m) Electromagnetic Field: <3 μV/(V/m) or <3 μV/V Vibration (10 to 500 Hz): <2 μV/(m/s²)</p> <p>OVERLOAD DETECTION: Preamplifier overload detection with respect to cable length (3 to 1000 meter)</p> <p>CHANNEL TO CHANNEL PHASE-MATCH: 5.1° – 0.1° × (f/f_i) from f_i to 50 × f_i (f_i = 0.1 or 1 Hz) 2.1° – 0.1° × (f/f_i) from f_i to 20 × f_i (f_i = 10 Hz) 0.1° from 50 × f_i to 0.1 × f_u for f_i = 0.1, 1 Hz 0.1° from 20 × f_i to 0.1 × f_u for f_i = 10 Hz (f/f_u)⁰ from 0.1(f_i) to f_u Where: f_i: upper freq. limit: 1, 3, 10, 22.4, 30 or 100 kHz Reference Tone: 1 V (peak) ±1% (0.1 dB), 1 kHz</p> <p>OPTIONAL FILTERS: A-, B-, C- and D-weighting (one module) (complies with IEC 651 Type 0) Integration: single and double (one module) Other filters available upon request</p> <p>General Specifications</p> <p>Power Supply</p> <p>INTERNAL BATTERY (not included): Nickel-Metal Hydride rechargeable battery supporting SMBus and on-battery charge level meter. Provides typically 15 hours of continuous use with a single channel and 4 hours with four channels without backlighting and without optional filters. With backlighting on, and with optional filters, battery provides typically 3 hours of continuous use. If NEXUS is not used for more than a month, please remove the battery to prevent discharging. Charging time is approximately 4 hours</p> <p>EXTERNAL DC POWER INPUT: Complies with ISO 7637–1 (12V) and 7637–2 (24V) Input Range: 10 to 33 VDC</p> <p>MAINS SUPPLY: Supported via supplied Mains Adaptor ZG 0400 (included), 90–264 VAC, 40–65 Hz</p> <p>Digital Control Interface</p> <p>SERIAL INTERFACE: Conforms to EIA/TIA-574 (RS–232) Baud rate: 2400, 4800, 9600 Parity: None Data Bits: 8 Stop Bits: 1 Handshake: X-on/X-off "Plug and play" interface coupling Communication speed for a baud rate of 9600: Transmission time for one command of 5 characters is ~ 4 ms.</p>	<p>Transmission time for one command of 5 characters and to receive an echo after each character is ~ 8 ms. Execution time for one command is 100 ms to several seconds. Time to configure a complete 4-channel NEXUS using short form set-up with approx. 600 characters requires transmission time of 2 to 3 s (4 to 6 s with echo after each character). Execution time in NEXUS is from 40 to 60 s. For set-ups with over 1000 characters, the transmission time will be increased by at least 30 s due to delay in emptying receiver buffer. Response time after requesting a status of one load: <0.5 s Response time after requesting a peak meter reading: <0.5 s</p> <p>Display Interface</p> <p>DISPLAY: 64 × 128 pixel graphical display with back-lighting on/off</p> <p>OVERLOAD DETECTION: On both common-mode and differential signals applied before filters. LED overload indication at the front panel and overload indication via RS–232 control interface</p> <p>Peak Meter</p> <p>DYNAMIC RANGE: –30 to +10 dBV (peak) RESOLUTION: 1 dB</p> <p>Analogue Output</p> <p>CONNECTOR: BNC GROUNDING: Single-ended or floating OUTPUT IMPEDANCE: = 50 Ω//500 pF MAX. OUTPUT (differential voltage): 3.16 V peak (6.32 V peak to peak) MAX. DC OFFSET: ±25 mV, typically <2 mV OUTPUT PROTECTION: Differential Voltage: ≤50 V (peak) Common Mode Voltage: ≤15 (peak) Common Mode Rejection: >50 dB (50 to 60 Hz) for Common Mode Voltage ≤2 V peak (voltage injected into instrument) OUTPUT DRIVE CAPACITY: 100 m of cable length (100 pF/m) to 20 kHz 1000 m of cable length (100 pF/m) to 2 kHz CHANNEL SEPARATION: better than –100 dB at 1 kHz</p> <p>Dimensions and Weight</p> <p>Height: 90 mm (3.5") Width: 144 mm (5.7") Depth: 230 mm (9.1") Weight: Approx. 3 kg (6.6 lb.), for a 4-channel unit including battery</p> <p>Includes</p> <p>Type 2690-93 Conditioning Amplifiers include the following accessories: ZG 0400: Mains Adaptor, 90–264 VAC LK 0013: Ferrite Cable Clamp</p>	<p>Note: All values are typical at 25°C (77°F), unless measurement uncertainty is specified. All uncertainty values are specified at 2σ (i.e. expanded uncertainty using a coverage factor of 2)</p> <p>Calibration</p> <p>NEXUS amplifiers are supplied with a Manufacturer's Certificate of Conformance. An initial calibration can be supplied as an option. The calibration services in the table below are based on one channel. There is an extra charge for each additional channel:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>Initial Calibration</th> <th>Recalibration</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2690 A</td> <td>2690 A–CAI</td> <td>2690 A–CAF</td> </tr> <tr> <td>2691 A</td> <td>2691 A–CAI</td> <td>2691 A–CAF</td> </tr> <tr> <td>2692 A</td> <td>2692 A–CAI</td> <td>2692 A–CAF</td> </tr> <tr> <td>2693 A</td> <td>2693 A–CAI</td> <td>2693 A–CAF</td> </tr> </tbody> </table> <p>All other accessories are listed in the associated ordering information sheet (BA 0287).</p>	Type	Initial Calibration	Recalibration	2690 A	2690 A–CAI	2690 A–CAF	2691 A	2691 A–CAI	2691 A–CAF	2692 A	2692 A–CAI	2692 A–CAF	2693 A	2693 A–CAI	2693 A–CAF
Type	Initial Calibration	Recalibration															
2690 A	2690 A–CAI	2690 A–CAF															
2691 A	2691 A–CAI	2691 A–CAF															
2692 A	2692 A–CAI	2692 A–CAF															
2693 A	2693 A–CAI	2693 A–CAF															

(Συνέχεια) Ενισχυτής επιταχυνσιόμετρων Brüel & Kjaer NEXUS 2693-0S4 (VIB029).



NI 622x Specifications



Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted. Refer to the *M Series User Manual* for more information about NI 622x devices.

Analog Input

Number of channels		Input impedance	
NI 6220/6221	8 differential or 16 single ended	Device on	
NI 6224/6229	16 differential or 32 single ended	AI+ to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
NI 6225	40 differential or 80 single ended	AI- to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
ADC resolution	16 bits	Device off	
DNL	No missing codes guaranteed	AI+ to AI GND	820 Ω
INL	Refer to the <i>AI Absolute Accuracy Table</i>	AI- to AI GND	820 Ω
Sampling rate		Input bias current	±100 pA
Maximum	250 kS/s single channel, 250 kS/s multi-channel (aggregate)	Crosstalk (at 100 kHz)	
Minimum	No minimum	Adjacent channels	-75 dB
Timing accuracy	50 ppm of sample rate	Non-adjacent channels	-90 dB ¹
Timing resolution	50 ns	Small signal bandwidth (-3 dB)	700 kHz
Input coupling	DC	Input FIFO size	4,095 samples
Input range	±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0.2 V	Scan list memory	4,095 entries
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)	±11 V of AI GND	Data transfers	
CMRR (DC to 60 Hz)	92 dB	PCI/PXI devices	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
		USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O

¹ For USB-6225 devices, channel AI <0..15> crosstalk to channel AI <64..79> is -71 dB; applies to channels with 64-channel separation, for example, AI (x) and AI (x + 64).

Σχήμα Π5.9: Κάρτα πρόσκτησης δεδομένων με ενσωματωμένο ADC. NI PCI-6224E (ELTEM129).

Overvoltage protection (AI <0..79>, AI SENSE, AI SENSE 2)

Device on	±25 V for up to two AI pins
Device off	±15 V for up to two AI pins

Input current during overvoltage condition ±20 mA max/AI pin

Settling Time for Multichannel Measurements

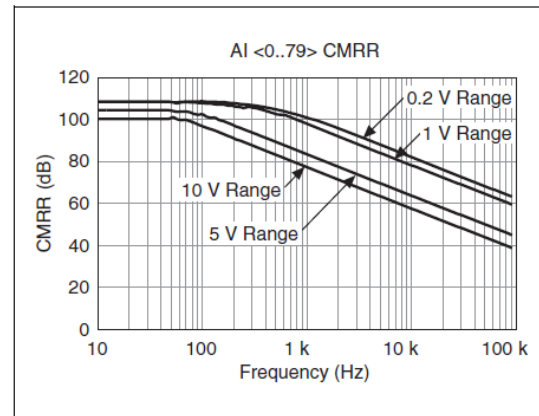
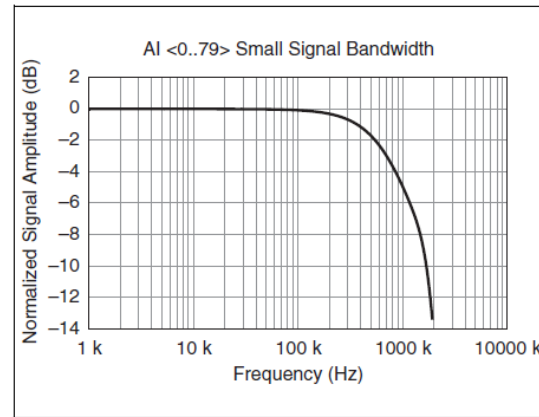
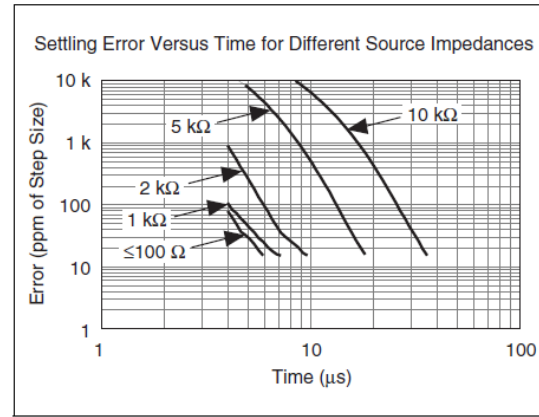
Accuracy, full scale step, all ranges

±90 ppm of step (±6 LSB)	4 μs convert interval
±30 ppm of step (±2 LSB)	5 μs convert interval
±15 ppm of step (±1 LSB)	7 μs convert interval

Analog Output

Number of channels	
NI 6220/6224	0
NI 6221/6225	2
NI 6229	4
DAC resolution	16 bits
DNL	±1 LSB
Monotonicity	16 bit guaranteed
Maximum update rate	
1 channel	833 kS/s
2 channels	740 kS/s per channel
3 channels	666 kS/s per channel
4 channels	625 kS/s per channel
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Output range	±10 V
Output coupling	DC
Output impedance	0.2 Ω
Output current drive	±5 mA
Overdrive protection	±25 V
Overdrive current	10 mA
Power-on state	±20 mV ¹
Power-off glitch	400 mV for 200 ms
Output FIFO size	8,191 samples shared among channels used
Data transfers	
PCI/PXI devices	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
USB devices	USB Signal Stream, programmed I/O
AO waveform modes:	
• Non-periodic waveform	
• Periodic waveform regeneration mode from onboard FIFO	
• Periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update	

Typical Performance Graphs



Settling time, full scale step	
15 ppm (1 LSB)	6 μs
Slew rate	15 V/μs
Glitch energy	
Magnitude	100 mV
Duration	2.6 μs

Calibration (AI and AO)

Recommended warm-up time	15 minutes
Calibration interval	1 year

(Συνέχεια) Κάρτα πρόσκτησης δεδομένων με ενσωματωμένο ADC. NI PCI-6224E (ELTEM129).

AI Absolute Accuracy Table

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Random Noise, σ (μ Vrms)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μ V)	Sensitivity ² (μ V)
Positive Full Scale	Negative Full Scale									
10	-10	75	2.5	5	20	57	76	244	3,100	97.6
5	-5	85	2.5	5	20	60	76	122	1,620	48.8
1	-1	95	2.5	5	2.5	79	76	30	360	12.0
0.2	-0.2	135	2.5	5	80	175	76	13	112	5.2

AbsoluteAccuracy = Reading · (GainError) + Range · (OffsetError) + NoiseUncertainty

GainError = ResidualGainError + GainTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco · (TempChangeFromLastExternalCal)

OffsetError = ResidualOffsetError + OffsetTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error

NoiseUncertainty = $\frac{\text{RandomNoise} \cdot 3}{\sqrt{100}}$ For a coverage factor of 3 σ and averaging 100 points.

¹ Absolute accuracy at full scale on the analog input channels is determined using the following assumptions:

TempChangeFromLastExternalCal = 10 °C

TempChangeFromLastInternalCal = 1 °C

number_of_readings = 100

CoverageFactor = 3 σ

For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:

GainError = 75 ppm + 25 ppm · 1 + 5 ppm · 10 GainError = 150 ppm

OffsetError = 20 ppm + 57 ppm · 1 + 76 ppm OffsetError = 153 ppm

NoiseUncertainty = $\frac{244 \mu\text{V} \cdot 3}{\sqrt{100}}$ NoiseUncertainty = 73 μ V

AbsoluteAccuracy = 10 V · (GainError) + 10 V · (OffsetError) + NoiseUncertainty AbsoluteAccuracy = 3,100 μ V

² Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.

Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

AO Absolute Accuracy Table

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μ V)
Positive Full Scale	Negative Full Scale							
10	-10	90	10	5	40	5	128	3,230

¹ Absolute Accuracy at full scale numbers is valid immediately following internal calibration and assumes the device is operating within 10 °C of the last external calibration. Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

AbsoluteAccuracy = OutputValue · (GainError) + Range · (OffsetError)

GainError = ResidualGainError + GainTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco · (TempChangeFromLastExternalCal)

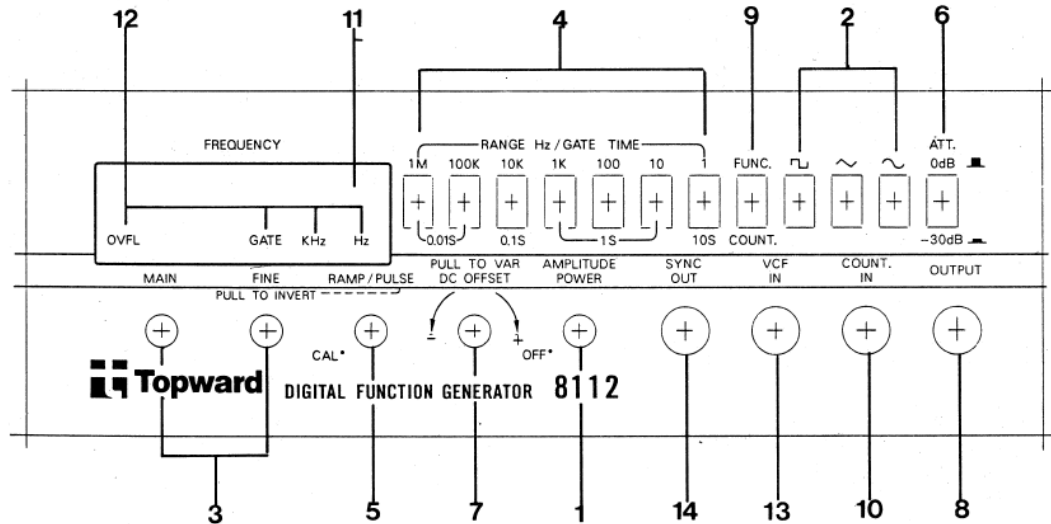
OffsetError = ResidualOffsetError + AOffsetTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error

(Συνέχεια) Κάρτα πρόσκτησης δεδομένων με ενσωματωμένο ADC. NI PCI-6224E (ELTEM129).

Digital Function Generator Model 8112

FRONT PANEL of the MODEL 8112

Figure - 1



SPECIFICATIONS

GENERATOR

Waveforms: Sine, Square, Triangle, Pulse, Ramp
 Frequency: 0.1 Hz - 2MHz, 7 Ranges
 Display: 6 Digits with Hz, KHz, Gate, OVFL
 Freq. Error: Counter Accuracy
 Output Impedance: $50\Omega \pm 10\%$
 Output Level: 5mVpp (min) to 20Vpp Continuously Variable (open circuit)
 Attenuator: 0dB, -30dB
 DC Offsets: ± 10 Volts Continuously Variable (open circuit)
 Duty Cycles: 5% ~ 95% Continuously Variable with 50% Calibrated Switch
 Distortion: <1%, 1Hz ~ 100KHz
 Triangle Linearity: <1%, 1Hz ~ 100KHz
 Rise/Fall Time: <100nS
 Sync Out: 3Vpp (open circuit), Tr < 25nS
 VCF in: 0 - 5 Vdc Control Frequency to 1000:1

COUNTER

Range: 10Hz ~ 100MHz
 Gate Time: 0.015, 0.1 S, 1S, 10S Controlled by Range switch
 Accuracy: $\pm (1 \text{ Count} + \text{Time Base Accuracy})$
 Sensitivity: 25mVrms(10Hz - 10MHz), 50mVrms(10Hz - 100mHz)
 Attenuator: 0dB, -30dB
 Max. Allowable Input: 150Vrms(DC + Peak AC)
 Impedance: $1m\Omega // 100pF$
 Time Base: 10mHz, $\pm 10ppm (0^\circ C - 40^\circ C)$
 Display: 6 digits 7 segment LED display. LED Indicators for Gate, Overflow, Hz, KHz

GENERAL

Dimension: 251 (W) x 92(H) x 288(D) mm
 Weight: 1.6Kg
 Power: 115V/230V $\pm 10\%$, 50/60Hz, 12VA
 Accessory: Test Lead - ACS-003 BNC to Alligator Clip Cable 1 pcs

Σχήμα Π5.10: Παλμογεννήτρια (Digital Function Generator) Topward 8112 (ELTEM006).



Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Σειράς iP5A

Τύπος		SV055 iP5A-4	SV075 iP5A -4	SV110 iP5A -4	SV150 iP5A -4	SV185 iS5-4	SV220 iS5-4	SV300 iS5-4	SV370 iS5-4	
Ισχύς Κινητήρα	HP	7.5	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	40	50	
	kW	5.5	7.5	11	15	18.5	22	30	37	
Εξοδος	Ρεύμα [A]	12	16	24	30	39	45	61	75	
	Καλώδιο	4 mm ²		6 mm ²	10 mm ²		16 mm ²	25 mm ²		
	Συχνότητα	0.5 - 120 Hz								
	Τάση	3 Ø 0 – Τάση εισόδου								
Είσοδος	Συχνότητα	50 - 60 (±5%) Hz								
	Τάση	3 Ø 380 - 440 (±10%) Volt								
	Ασφάλεια	20 Amp	30 Amp	40 Amp		60 Amp	80 Amp	100 Amp		
	Καλώδιο	4 mm ²		6 mm ²	10 mm ²		16 mm ²	25 mm ²		
Μέθοδος Ελέγχου		Διανυσματικός έλεγχος με PWM (Sensorless Vector Control)								
Ανάλυση Ρύθμισης		0.01 Hz								
Ακρίβεια Συχνότητας Εξόδου		±0.01% της μέγιστης ορισθείσας συχνότητας (με ψηφιακή ρύθμιση) ±0.1% της μέγιστης ορισθείσας συχνότητας (με αναλογική ρύθμιση)								
Δυνατότητα Υπερφόρτισης		120% για 1 λεπτό								
Ρύθμιση Συχνότητας		Αναλογική: 0 - 10 V / 4 - 20 mA / ποτενσιόμετρο / είσοδος παλμών Ψηφιακή: Ψηφιακό χειριστήριο								
Χρόνος Επιτάχυνσης & Επιβράδυνσης		0.1 - 6000 Δευτερόλεπτα								
Ροπή Πεδήσεως		Έως 100 % (απαιτείται πρόσθετη μονάδα πεδήσεως)								
Προστασίες		Υπέρταση, Υπόταση, Υπερένταση, Υπερθέρμανση Ρυθμιστή στροφών, Υπερθέρμανση Κινητήρα, Διαρροή ρεύματος προς τη γη, Κάψιμο ασφάλειας και Σφάλμα κάρτας ελέγχου								
Προστασία Κελύφους		IP20								
Συνθήκες Λειτουργίας	Θερμοκρ. Περιβάλ.	-10 °C ÷ +40 °C (Fs≥5kHz) -10 °C ÷ +45 °C (Fs≤4kHz)								
	Υγρασία	Έως 90 %								
	Υψόμετρο	Έως 1000 m								
	Ψύξη	Με ενσωματωμένο ανεμιστήρα								

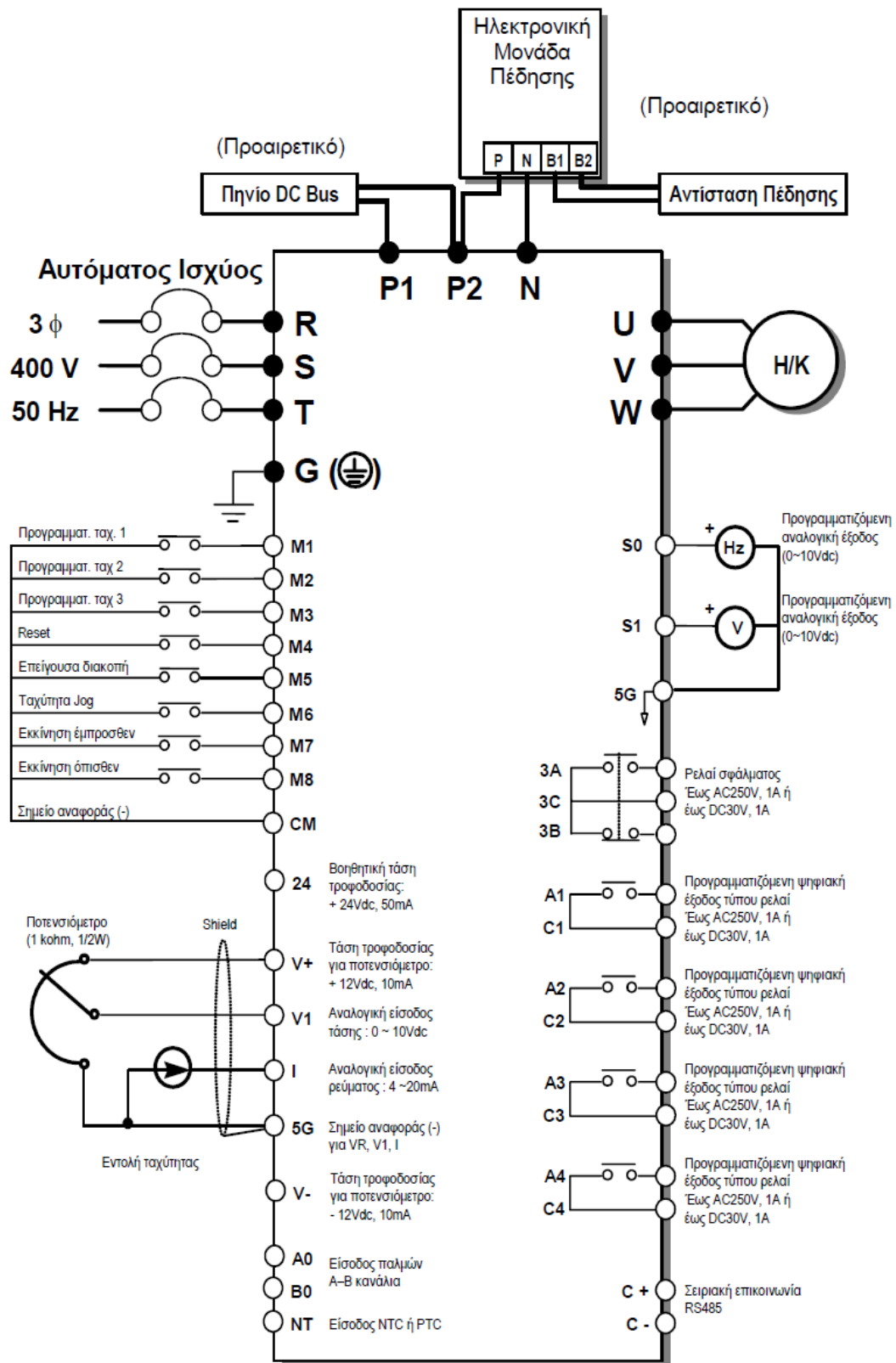
Σχήμα Π5.11: Ρυθμιστής στροφών (Inverter) του 3Φ AC κινητήρα της 1^{ης} περλωτής LG iP5A.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Σειράς iP5A

Τύπος		SV450 iP5A-4	SV550 iP5A -4	SV750 iP5A -4	SV900 iP5A -4	SV1100 iP5A -4	SV1320 iP5A -4	SV1600 iP5A -4
Ισχύς Κινητήρα	HP	60	75	100	125	150	180	220
	kW	45	55	75	150	180	220	270
Έξοδος	Ρεύμα [A]	91	110	152	183 A	223 A	264 A	325 A
	Καλώδιο	35 mm ²		50 mm ²	70 mm ²	95 mm ²	120 mm ²	150 mm ²
	Συχνότητα	0.5 - 120 Hz						
	Τάση	3 Ø 0 – Τάση εισόδου						
Είσοδος	Συχνότητα	50 - 60 (±5%) Hz						
	Τάση	3 Ø 380 - 440 (±10%) Volt						
	Ασφάλεια	100 Amp	160 Amp		250 Amp		400 Amp	
	Καλώδιο	35 mm ²		50 mm ²	70 mm ²	95 mm ²	120 mm ²	150 mm ²
Μέθοδος Ελέγχου		Διανυσματικός έλεγχος με PWM (Sensorless Vector Control)						
Ανάλυση Ρύθμισης		0.01 Hz						
Ακρίβεια Συχνότητας Εξόδου		±0.01% της μέγιστης ορισθείσας συχνότητας (με ψηφιακή ρύθμιση) ±0.1% της μέγιστης ορισθείσας συχνότητας (με αναλογική ρύθμιση)						
Δυνατότητα Υπερφόρτισης		120% για 1 λεπτό						
Ρύθμιση Συχνότητας		Αναλογική: 0 - 10 V / 4 - 20 mA / ποτενσιόμετρο /είσοδος παλμών Ψηφιακή: Ψηφιακό χειριστήριο						
Χρόνος Επιτάχυνσης & Επιβράδυνσης		0.1 - 6000 Δευτερόλεπτα						
Ροπή Πεδήσεως		Έως 100 % (απαιτείται πρόσθετη μονάδα πεδήσεως)						
Προστασίες		Υπέρταση, Υπόταση, Υπερένταση, Υπερθέρμανση Ρυθμιστή στροφών, Υπερθέρμανση Κινητήρα, Διαρροή ρεύματος προς τη γη, Κάψιμο ασφάλειας και Σφάλμα κάρτας ελέγχου						
Προστασία Κελύφους		IP20						
Συνθήκες Λειτουργίας	Θερμοκρ. Περιβάλ.	-10 °C ÷ +40 °C (Fs≥4kHz) -10 °C ÷ +45 °C (Fs≤3kHz)						
	Υγρασία	Έως 90 %						
	Υψόμετρο	Έως 1000 m						
	Ψύξη	Με ενσωματωμένο ανεμιστήρα						

(Συνέχεια) Ρυθμιστής στροφών (Inverter) του 3Φ AC κινητήρα της 1^{ης} πτερωτής, LG iP5A.

Σχέδιο Καλωδιώσεων της Σειράς iP5A



(Συνέχεια) Ρυθμιστής στροφών (Inverter) του 3Φ AC κινητήρα της 1^{ης} πτερωτής, LG iP5A.

Περιγραφή Ακροδεκτών της Σειράς iP5A

	Συμβολισμός	Λειτουργία
<i>Ακροδέκτες Ισχύος</i>	R, S, T	Τριφασικοί ακροδέκτες εισόδου (σύνδεση με το δίκτυο)
	U, V, W	Τριφασικοί ακροδέκτες εξόδου (σύνδεση με τον κινητήρα)
	P1, P2	Ακροδέκτες σύνδεσης εξωτερικού πηνίου εξομάλυνσης
	P2, N	Ακροδέκτες σύνδεσης ηλεκτρονικής μονάδας πέδησης
	G	Ακροδέκτης γειώσεως (σύνδεση με γείωση δικτύου Δ.Ε.Η.)
<i>Ακροδέκτες Ελέγχου</i>	V+	Τάση τροφοδοσίας ποτενσιόμετρου ρύθμισης ταχύτητας +12Vdc
	V-	Τάση τροφοδοσίας ποτενσιόμετρου ρύθμισης ταχύτητας -12Vdc
	V1	Είσοδος για ρύθμιση ταχύτητας μέσω πηγής τάσης -10/0-10Vdc
	I	Είσοδος για ρύθμιση ταχύτητας μέσω πηγής ρεύματος (4-20mA)
	A0	Είσοδος παλμών για ρύθμιση ταχύτητας (κανάλι A, 0-100kHz)
	B0	Είσοδος παλμών για ρύθμιση ταχύτητας (κανάλι B, 0-100kHz)
	NT	Είσοδος NTC ή PTC
	S0	Αναλογική έξοδος 0-10Vdc για τη μέτρηση της ταχύτητας
	S1	Αναλογική έξοδος 0-10Vdc για τη μέτρηση της τάσης
	5G	Σημείο αναφοράς (-) MONO για τα παραπάνω 9 σήματα
	M1, M2, M3	Είσοδοι ενεργοποίησης προκαθορισμένων ταχυτήτων
	M4	Είσοδος επανεκκίνησης κατόπιν διακοπής λόγω σφάλματος
	M5	Είσοδος επείγουσας εντολής σταματήματος του κινητήρα
	M6	Είσοδος για την ενεργοποίηση της ταχύτητας «JOG»
	M7	Είσοδος για εκκίνηση με ορθή φορά περιστροφής
	M8	Είσοδος για εκκίνηση με ανάστροφη φορά περιστροφής
	C+ / C-	Ακροδέκτες σειριακής επικοινωνίας RS485
	24	Βοηθητική τροφοδοσία 24Vdc/50mA
	CM	Σημείο αναφοράς (-) MONO για τα παραπάνω 11 σήματα
	30A-30C	Ψηφιακή έξοδος σφάλματος τύπου ρελαί (N.O.)
30B-30C	Ψηφιακή έξοδος σφάλματος τύπου ρελαί (N.C.)	
A1-C1	Προγραμματιζόμενη ψηφιακή έξοδος τύπου ρελαί	
A2-C2	Προγραμματιζόμενη ψηφιακή έξοδος τύπου ρελαί	
A3-C3	Προγραμματιζόμενη ψηφιακή έξοδος τύπου ρελαί	
A4-C4	Προγραμματιζόμενη ψηφιακή έξοδος τύπου ρελαί	

(Συνέχεια) Ρυθμιστής στροφών (Inverter) του 3Φ AC κινητήρα της 1^{ης} περλωτής, LG iP5A.



Lenze

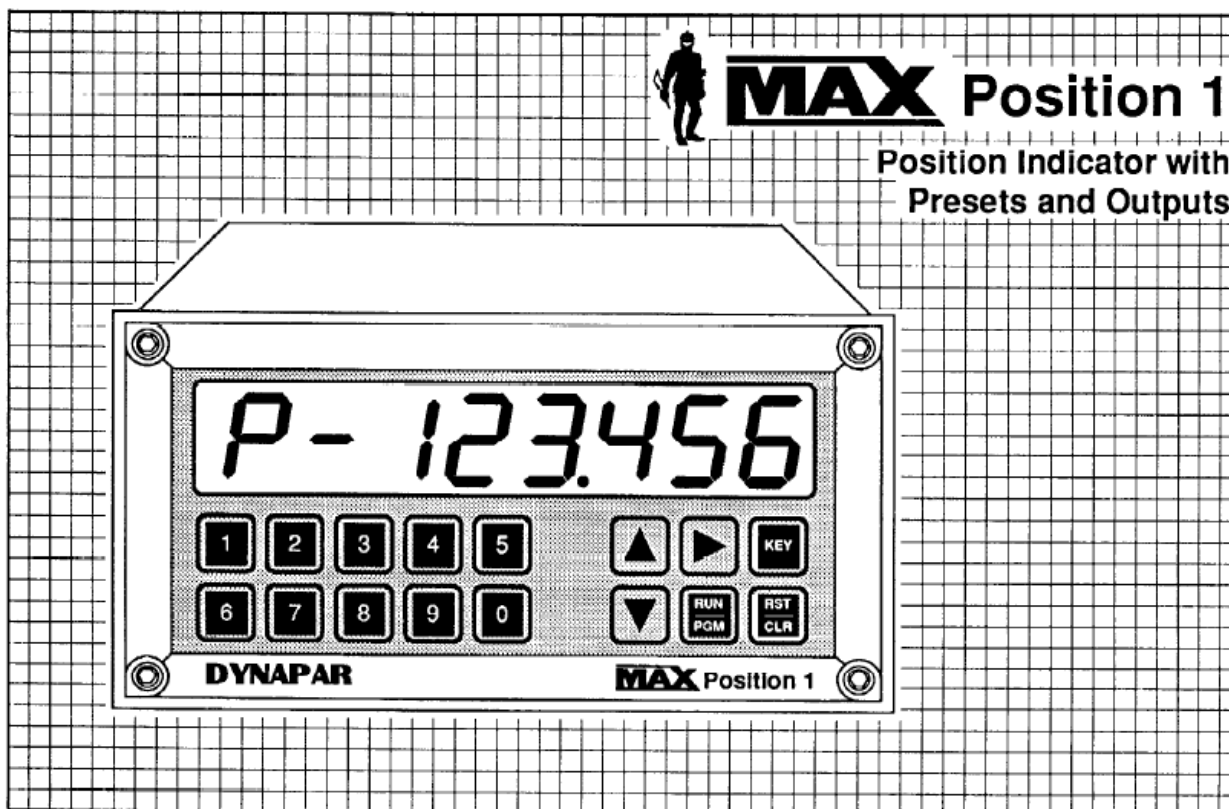
AC Tech

SCF SPECIFICATIONS

Storage Temperature	-20° to 70° C
Ambient Operating Temperature	0° to 50° C (derate 2.5% per °C above 50°)
Ambient Humidity	< 95% (non-condensing)
Maximum Altitude	3300 ft (1000 m) above sea level (derate 5% per additional 3300 ft)
Input Line Voltages	208/240 Vac, 400/480 Vac, 480/590 Vac
Input Voltage Tolerance	+10%, -15%
Input Frequency Tolerance	48 to 62 Hz
Output Wave Form	Sine Coded PWM
Output Frequency	0 - 240 Hz (consult factory for higher output frequencies)
Carrier Frequency	4 kHz to 10 kHz (over 6 kHz requires derating; see parameter P02)
Service Factor	1.00 (up to 6 kHz carrier; derate above 6 kHz; see parameter P02)
Efficiency	Up to 98%
Power Factor (displacement)	0.96 or better
Overload Current Capacity	150% for 60 seconds, 180% for 30 seconds
Speed Reference Follower	0-10 VDC, 4-20 mA
Control Voltage	15 VDC
Power Supply for Auxiliary Relays	50 mA at 12 VDC
Analog Output	0 - 10 VDC or 2 - 10 VDC: Proportional to frequency and load
Digital Outputs	Open-collector outputs: 50 mA at 30 VDC

MODEL NUMBER (NOTE 1)	FOR MOTORS RATED		INPUT (50-60 Hz)			OUTPUT	HEAT LOSS (WATTS) (NOTE 5)	
	HP	KW	INPUT PHASE	CURRENT (AMPS)	POWER (kVA)	CURRENT (AMPS)	STD	THRU
SF400 SERIES (NOTE 3)			400 / 480 Vac			0 - 400 / 460 Vac	STD	THRU
SF420	2	1.5	3	4.6 / 4.0	3.3	3.9 / 3.4	67	14

Σχήμα Π5.12: Ρυθμιστής στροφών (Inverter) του 3Φ AC κινητήρα της διάταξης στραγγαλισμού παροχής (Throttling). AC Tech SF420 (DRIVE06).



MAX Position 1 is a programmable position indicator and preset counter with a Reference input and setpoint, four position presets and eight complimentary outputs. Go through zero counting, plus/minus operation, non-volatile counter and 'on the fly' programming features satisfy many process applications. A six decade calibrator is provided for increased display resolution.

FEATURES

- Bidirectional (go thru zero) Counter
- Non-Volatile Counter Operation
- Four User Programmable Preset Setpoints
- Programmable Reference Setpoint
- Programmable Operation; A-B, A+B, Quad
- Programmable 6 Decade Correction Constant
- Selectable Input Logic; x1, x2, x4
- STOP/HOLD, REFERENCE ENABLE, OUTPUT DISABLE and REFERENCE Control Inputs
- Full Duplex RS-422A/485 Serial Communications for Remote Data Collection and Programming
- Non-Volatile RAM Memory for Setpoint Storage
- Self Diagnostics

KEY SPECIFICATIONS

- Bipolar Six Decade Counter (± 999999)
- Six Decade Input Calibrator
- DC to 40 kHz Count Rate
- DC to 20 kHz Quadrature Input Rate
- Programmable x1, x2, x4 Input Logic
- Four Programmable Bipolar Preset Limits
- Eight Solid State Preset Outputs
- Counter Presetting with Reference Input
- 12 VDC @ 175 mA Output Power
- 115/230 VAC Operation Selectable (12 VDC optional)

INDEX TO CONTENTS

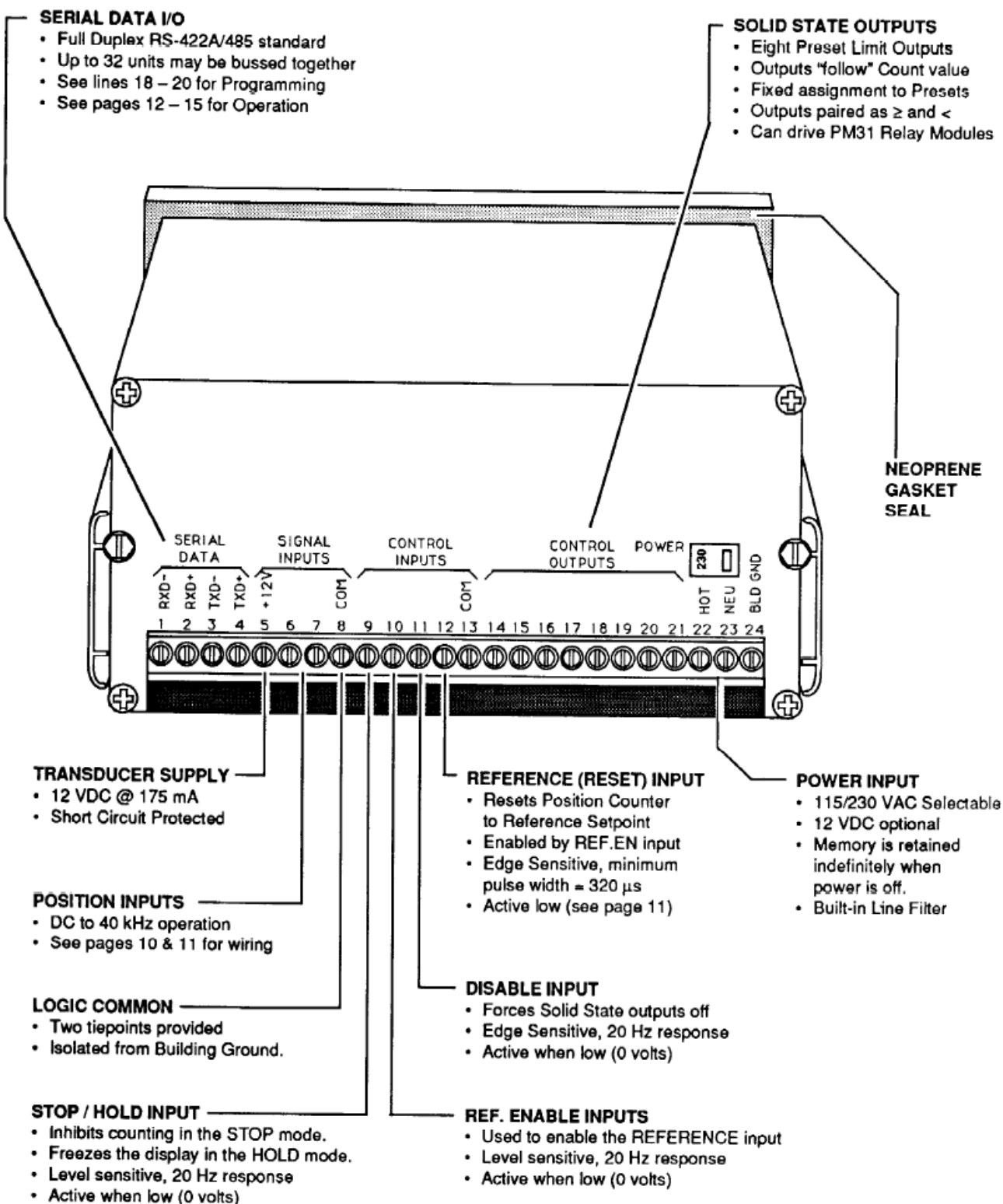
Overview	p. 2, 3
Specifications	p. 4
Front Panel Controls	p. 5
Programming & Diagnostics	p. 6, 7
Operation	p. 8
Applications	p. 9
Installation	p. 10 – 11
Serial Interface	p. 12 – 15
Ordering Information	p. 16

DYNAPAR CORP.

Σχήμα Π5.13: Ελεγκτής (Controller) των σερβομηχανισμών ρύθμισης ακτινικής θέσης και γωνίας των σωλήνων πίεσης στα φορεία (Probe Carriages) PRO001, PRO002. Φίρμα : DYNAPAR, τύπος : MAX Position 1.

OVERVIEW...

Page 3



(Συνέχεια) Ελεγκτής (Controller) των σερβομηχανισμών ρύθμισης ακτινικής θέσης και γωνίας των σωλήνων πίεσης στα φορεία (Probe Carriages) PRO001, PRO002. Φίρμα : DYNAPAR, τύπος : MAX Position 1.

SPECIFICATIONS...

Input Power:	100 to 130 VAC, 50/60 Hz, 20VA (200 to 260 VAC selectable) (12 VDC @ 0.3 A. optional)	Control Outputs:	8 Solid State, 100 mA sink max. 24 VDC max.
Accessory Supply:	12 VDC @ 175 mA.	Type:	Output 'FOLLOW' counter value
Position Counter:		Logic:	Outputs have fixed assignments
Range:	± 6 Decades	Assignment:	OUT 1 (14) Position ≥ 'A' Preset OUT 2 (15) Position < 'A' Preset OUT 3 (16) Position ≥ 'B' Preset OUT 4 (17) Position < 'B' Preset OUT 5 (18) Position ≥ 'C' Preset OUT 6 (19) Position < 'C' Preset OUT 7 (20) Position ≥ 'D' Preset OUT 8 (21) Position < 'D' Preset where '≥' means greater than or equal and '<' means less than
Presets:	4 Individual; A, b, C, d		
Operation:	Non-Volatile Unidirectional or Bidirectional with the following modes; A-b, A+b, Quadrature		
Count Rate:	40 kHz x1, 20 kHz x2, 10 kHz x4 (see restrictions on page 8)		
Outputs:	Fixed assignment Solid State outputs for '≥' and '<' comparisons		
Calibrator:		Serial Interface:	
Range:	6 Decade, 0.00001 to 9.99999	Type:	RS-422A/485 compatible
Position Input:		Baud Rate:	Selectable; 300, 600, 1200, 2400
Input Frequency:	40 kHz x1, 20 kHz x2, 10 kHz x4	Parity:	Selectable; None, Odd, Even
Input Type:	Single ended, Current Source	Data:	ASCII
Input Logic:	Programmable x1, x2, x4	Format:	Start bit, 7 bit ASCII data, Parity bit, Stop bit
Input High Level:	3.25 VDC min.	I.D. Number:	Programmable 0 to 98: Allows multidrop systems.
Input Low Level:	1.75 VDC max.		
Input Impedance:	1.0 kΩ to common	Diagnostics:	
Input Current:	3.25 mA steady state	Test 0:	Keyboard Test
Input Response:	10 μs. min high and low time	Test 1:	Non-Volatile RAM Test
Control Inputs:		Test 2:	Input Test
Input Frequency:	DC to 20 Hz typ (320μs pulse width for REFERENCE input)	Test 3:	Output Test
Input Type:	Single ended, current sinking	Test 4:	Display Test
Input Logic:	Both Edge and Level sensitive as defined by input use	Test 5:	Program Memory Test
Input High Level:	10 VDC min. to 20 VDC max.	Test 6:	Date Code Test
Input Low Level:	0 VDC min. to 2 VDC max.	Test 7:	Serial I/O Test
Input Impedance:	4.7 kΩ pullup to +12 VDC	Test 8:	Return to Factory Programming
Input Current:	2.5 mA. steady state	Mechanical:	
Input Response:	25 ms <i>make</i> and <i>break</i> time (310 μs. pulse width for REFERENCE input)	Enclosure:	Aluminum extrusion with molded VALOX bezel. 2.91" high x 5.67" wide x 6.03" deep overall
Display:		Cutout:	5.43" ± 0.04" x 2.68" ± 0.03"
Decades:	8 Decade, 0.6" red LED	Panel Thickness:	1/16" to 1/4"
Decimal Point:	Programmable Range; XX.XXXX to XXXXXX	Panel Depth:	5.68" minimum
Keyboard:	Sealed tactile feel, 16 positions	Weight:	2.5 lbs.
Program Security:	System LOCK on lines 7 thru 29	Environmental:	
		Operating Temp.:	0° to +50° C. (32° to 122° F.)
		Storage Temp.:	-18° to 85° C (0° to 186° F)
		Ambient Humidity:	90% and noncondensing

Error Codes:

1. Power Fail Error
2. Brown Out Error
3. Input Frequency Too High
4. Processor Time Fully Utilized

Press



to clear error code.

(Συνέχεια) Ελεγκτής (Controller) των σερβομηχανισμών ρύθμισης ακτινικής θέσης και γωνίας των σωλήνων πίεσης στα φορεία (Probe Carriages) PRO001, PRO002. Φίρμα : DYNAPAR, τύπος : MAX Position 1.

FRONT PANEL CONTROLS...

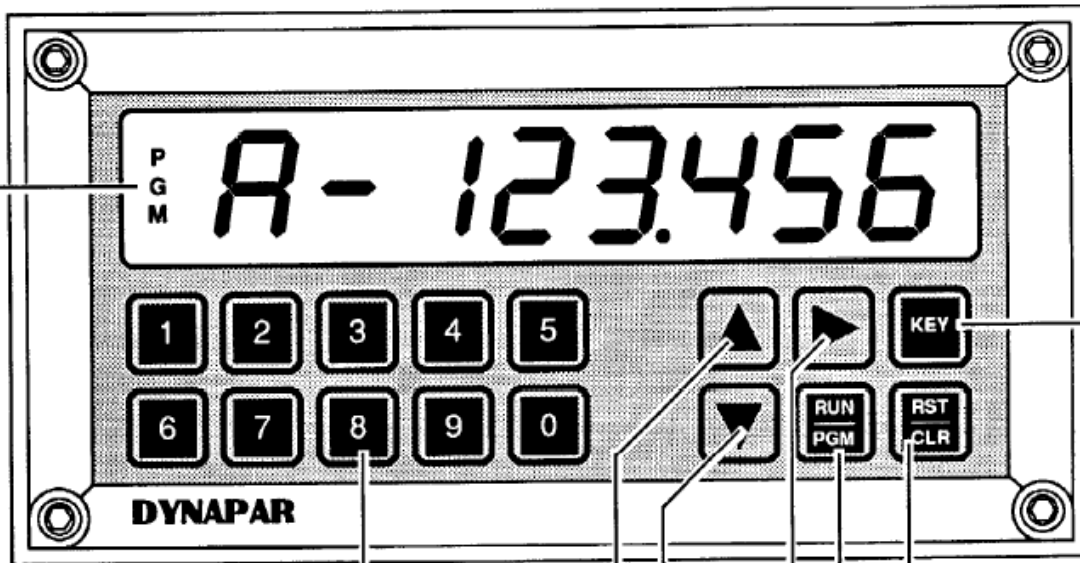
Pag

PROGRAM and SETUP MODE INDICATOR

- Constantly illuminated in the PROGRAM mode
- Flashing in the SETUP mode

KEY

- Used to enter SETUP mode from the RUN mode
Press again to exit SETUP and go to RUN.
- Allows the unit to be programmed "on the fly".
- Used to direct address lines 7 – 29 while in the PROGRAM mode.

Press **KEY** , Line Number, ▼**NUMERIC KEYS**

- Used to enter data in the SETUP and PROGRAM modes

UP CURSOR

- Selects RUN mode display (lines 1 – 6)
- Moves display toward top of programming menu in the PROGRAM mode

DOWN CURSOR

- Selects RUN mode display (lines 1 – 6)
- Moves display toward bottom of programming menu in the PROGRAM mode

RIGHT CURSOR

- Moves display to the right on the same line of the programming menu in the PROGRAM mode.
- Used to change the sign for lines 2 – 6 and for lines 8 – 12. Toggles between '-' and no sign (+)

RESET / CLEAR

- Presets Position Counter to Reference Setpoint in the RUN mode if enabled (On)
- Clears display in the SETUP and PROGRAM modes

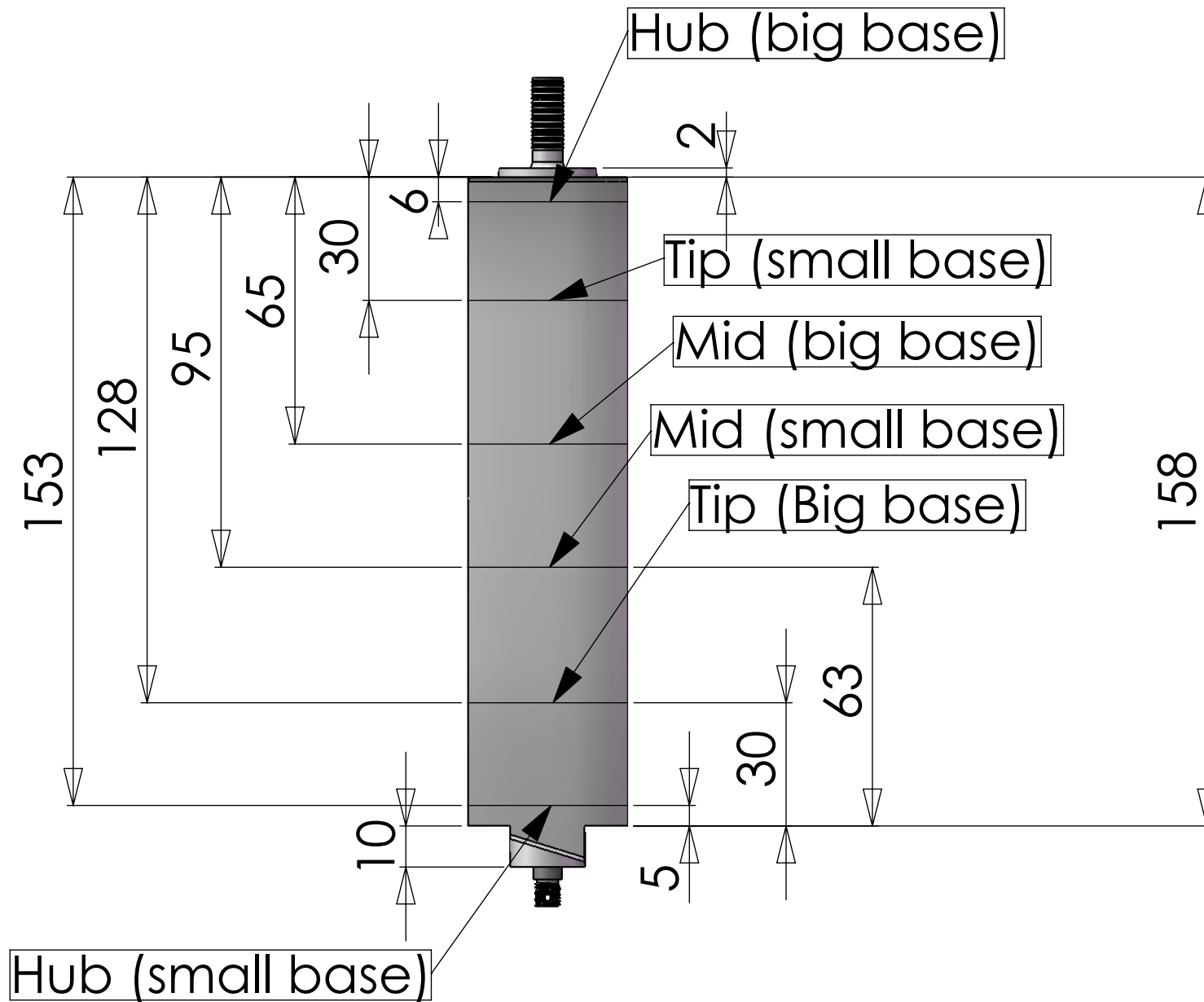
RUN / PROGRAM

- Used to switch between the RUN and PROGRAM modes. Acts as an alternate action switch.

(Συνέχεια) Ελεγκτής (Controller) των σερβομηχανισμών ρύθμισης ακτινικής θέσης και γωνίας των σωλήνων πίεσης στα φορεία (Probe Carriages) PRO001, PRO002. Φίρμα : DYNAPAR, τύπος : MAX Position 1.

Π6

Μηχανολογικά – Ηλεκτρολογικά
Σχέδια συνιστωσών της διάταξης

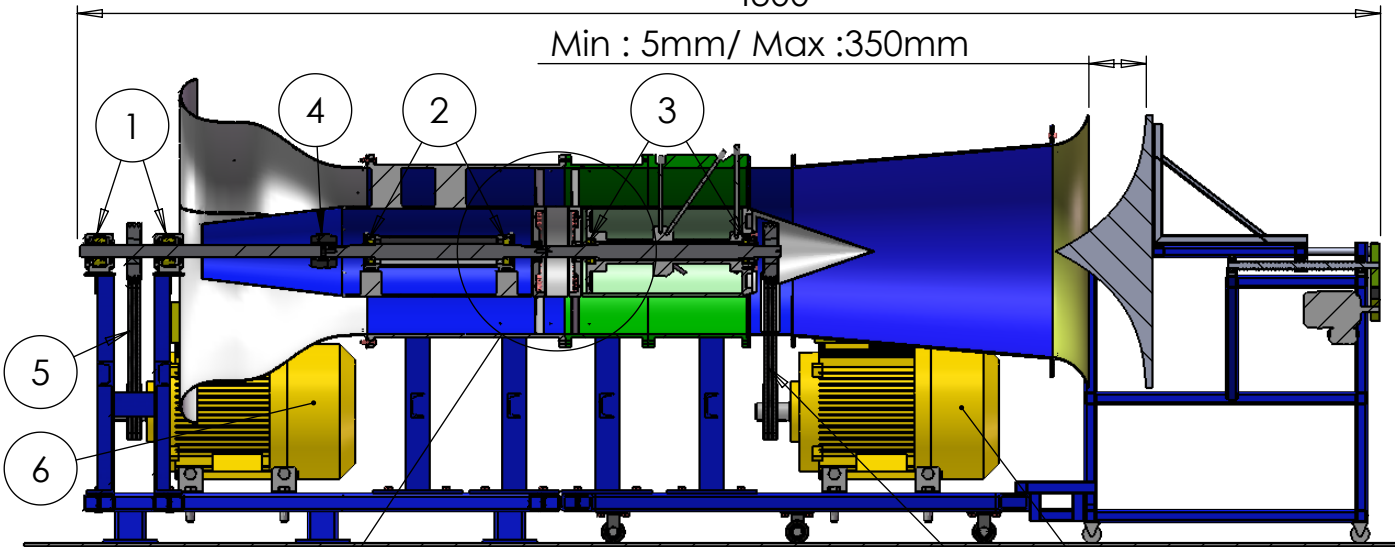


<p>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ</p>	<p>ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ J-79 ΚΑΙ ΘΕΣΕΙΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ</p>	<p>ΥΛΙΚΟ: -</p>	<p>ΒΑΡΟΣ: ~150g</p>	<p>ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 22/12/09</p>
<p>ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ</p>	<p>ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ</p>	<p>ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΠΤΕ-01</p>		

SECTION A-A
SCALE 1 : 25

~4300

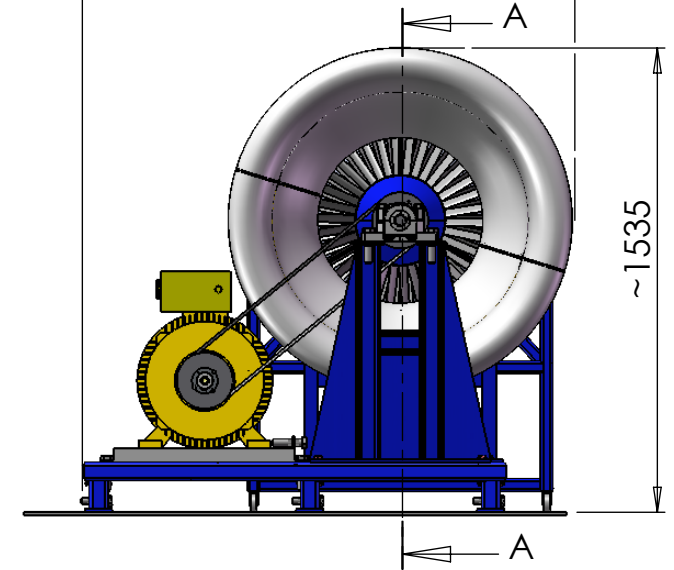
Min : 5mm/ Max : 350mm



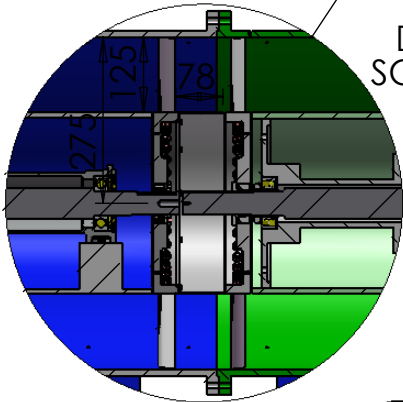
ΔΙΑ-02

1/2

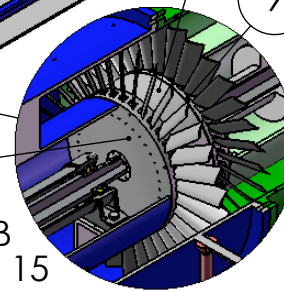
~1634



DETAIL A
SCALE 2 : 25



DETAIL B
SCALE 1 : 15



α/α	Βασικά εξαρτήματα για εποπτεία και συντήρηση
1	Έδρανο skf SNL511-609 και Ρουλεμάν skf 2309 EKTN9
2	Διπλό μπλοκ έδρασης CAP (Capredoni CAP 40L MEC)
3	Αριστερά :Ρουλεμάν skf 2209 E-2RS1 KTN9 + H309C Δεξιά : Ρουλεμάν skf 62209-2RS1
4	Ελαστικός σύνδεσμος Coupling Challenge HRC TYPE F No 110 + HRC 110 standard insert
5	3 + 3 μάντες Fenner SPA2240 PowerPlus Wedge
6	Η/Κ 1ης Πτερωτής 45KW 2-πολικός 3Φ βραχ/νου δρομέα (Valiadis K225M-2)
7	Η/Κ 2ης Πτερωτής 42KW DC
8	1η Πτερωτή (Μικρή βάση πτερυγίων)
9	2η Πτερωτή (Μεγάλη βάση πτερυγίων)
10	Αποστάτης πτερωτών μήκους L=76mm (Βιδωμένος με την 1η πτερωτή)

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΚΙΜΩΝ
ΑΝΤΙΠΡΟΠΑ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΠΤΕΡΩΤΩΝ

ΥΛΙΚΟ:
-

ΒΑΡΟΣ
-

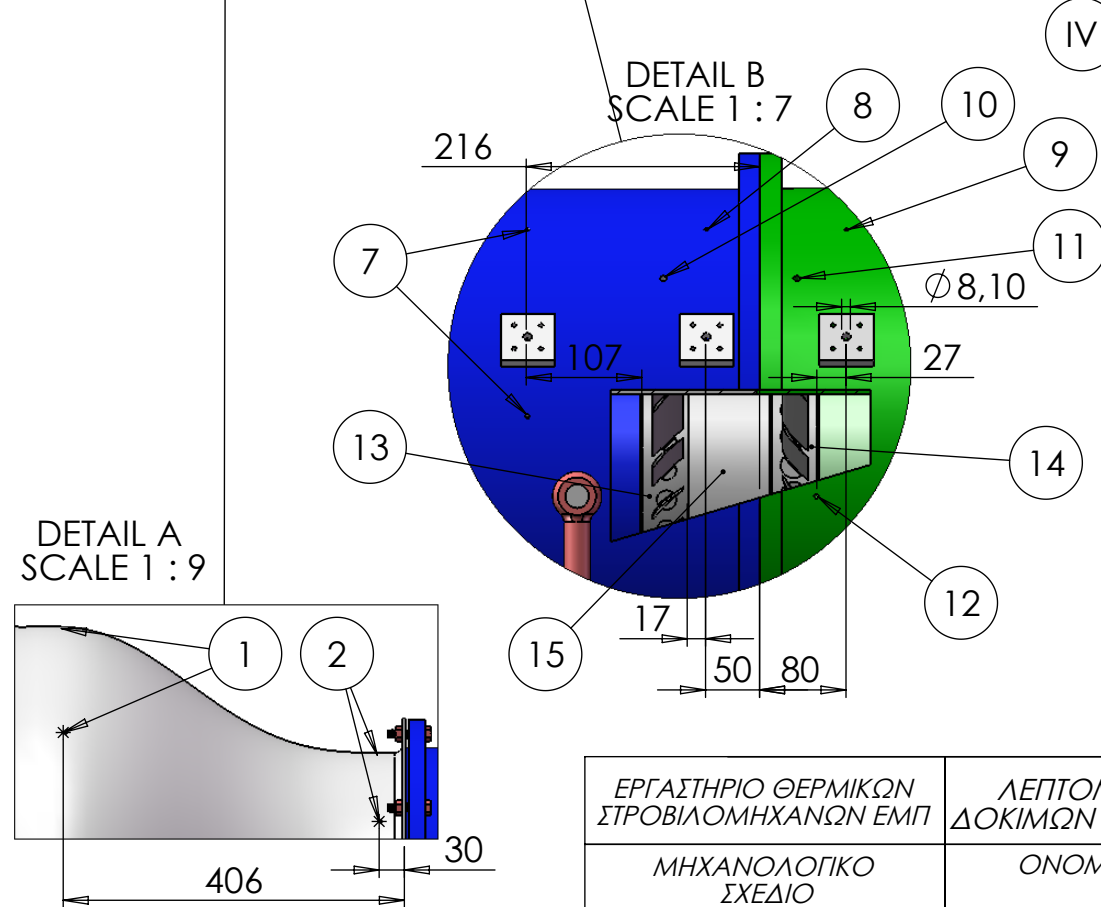
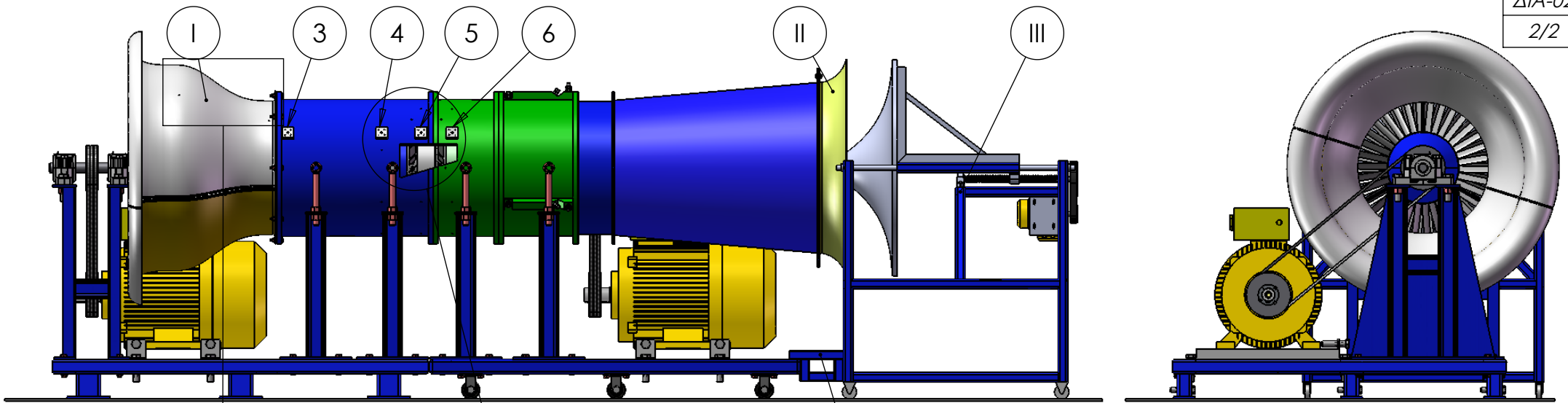
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
05/03/10

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΟΝΟΜΑ:

ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΔΙΑ-02



ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΟΣΤΕΘΗΚΑΝ	
I	Συγκλίνων αγωγός εισόδου (Bellmouth) (Σχ. ΑΓΩ-01)
II	Χείλος εξόδου αγωγού εξόδου (Σχ. ΑΓΩ-02)
III	Διάταξη στραγγαλισμού παροχής (Σχ. ΣΤΡ-01)
IV	Αποστάτης διάταξης στραγγαλισμού παροχής (Σχ. ΑΠΟ-01)
ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ	
1	3 οπές (M5) ανά 45deg για μέτρηση Pst. R=425mm. Θέση 01
2	3 οπές (M5) ανά 45deg για μέτρηση Pst. R=275mm. Θέση 02
3	Μεταλλικό πλακάκι για τοποθέτηση 3-hole Probe. Θέση 02
4	Μεταλλικό πλακάκι για τοποθέτηση 3-hole Probe. Θέση 1
5	Μεταλλικό πλακάκι για τοποθέτηση 5-hole Probe. Θέση 2
6	Μεταλλικό πλακάκι για τοποθέτηση 5-hole Probe. Θέση 3
7	8 οπές (M5) περιφερειακά ανά 45deg για μέτρηση Pst. Θέση 1
8	8 οπές (M5) περιφερειακά ανά 45deg για μέτρηση Pst. Θέση 2
9	8 οπές (M5) περιφερειακά ανά 45deg για μέτρηση Pst. Θέση 3
10	Οπή (M8) για τοποθέτηση αισθητήρα προσέγγισης. 1ος Ρότορας.
11	Οπή (M8) για τοποθέτηση αισθητήρα προσέγγισης. 2ος Ρότορας.
12	2 οπές (M5) οριζόντια και κατακόρυφα για τοποθέτηση επιταχ/τρών.
13	1ος Ρότορας. Μικρή βάση πτερυγίων.
14	2ος Ρότορας. Μεγάλη βάση πτερυγίων.
15	Αποστάτης πτερωτών. Ο προϋπάρχων αλλά με μήκος 76mm.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ
ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΝΤΙΡΡΟΠΑ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΠΤΕΡΩΤΩΝ

ΥΛΙΚΟ:
-

ΒΑΡΟΣ:
-

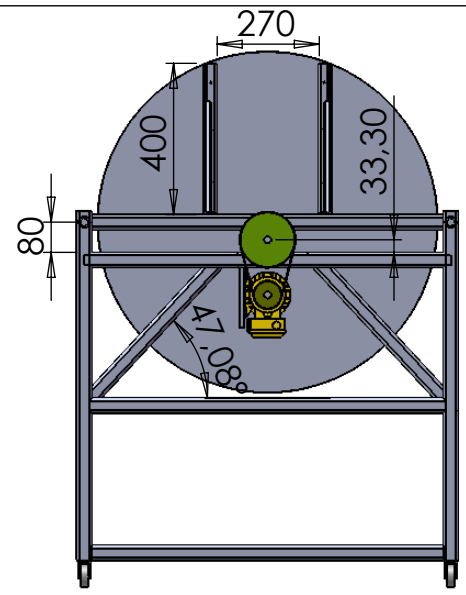
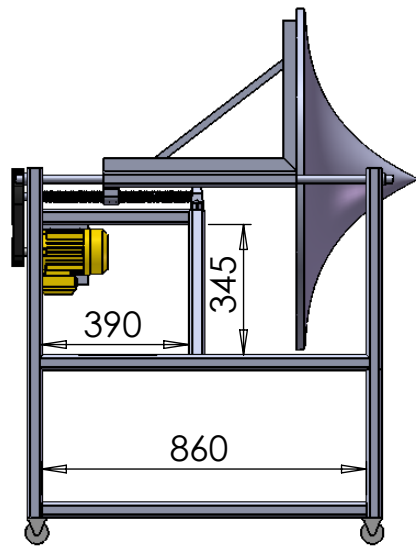
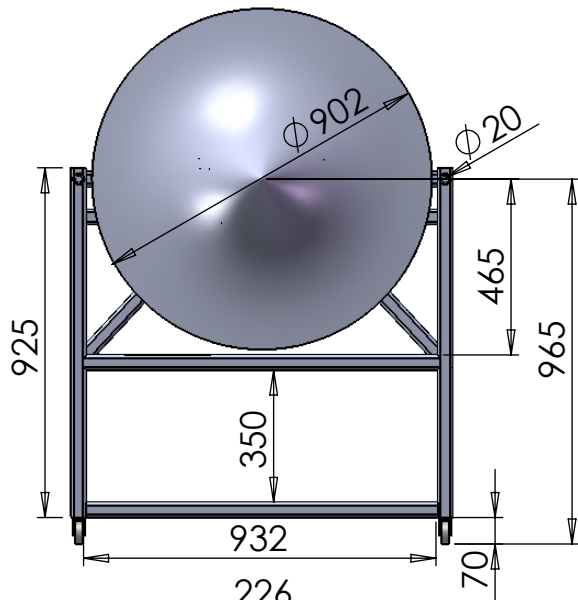
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
05/03/10

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

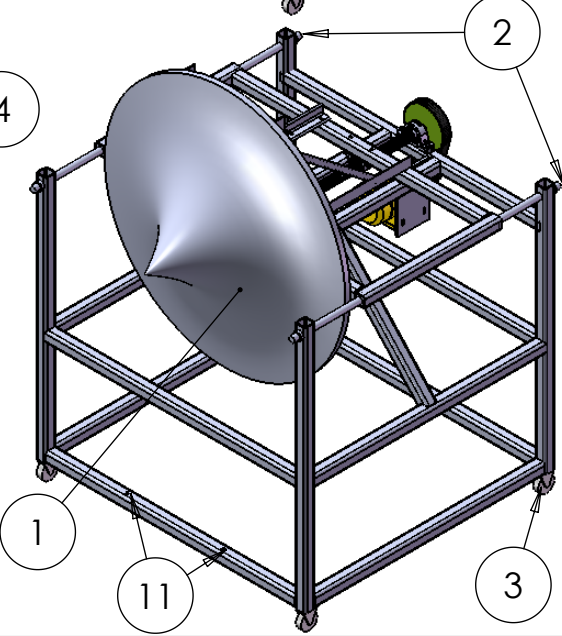
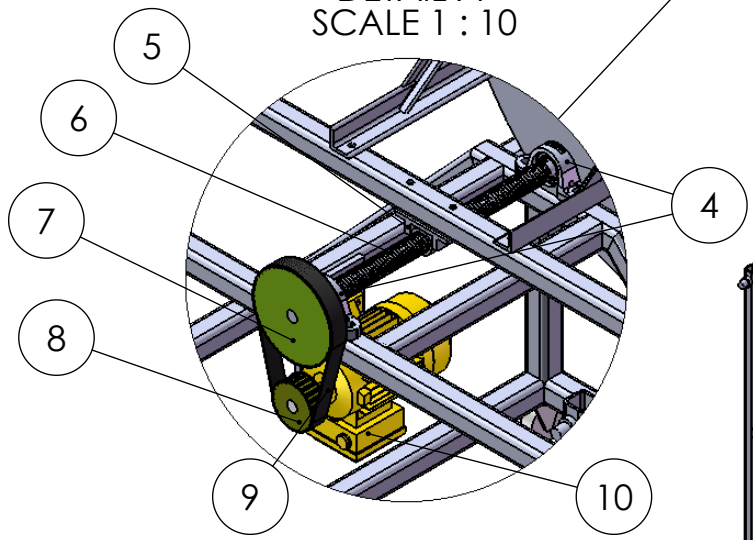
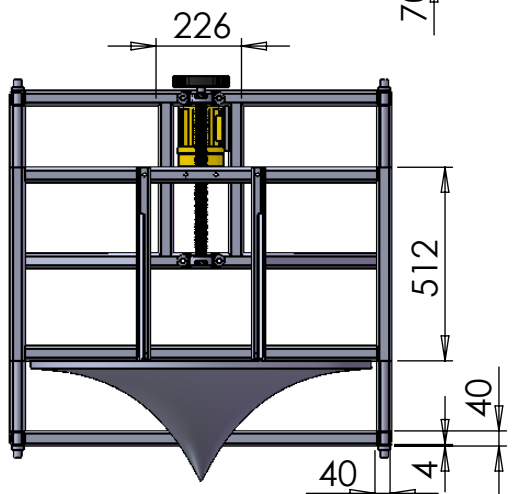
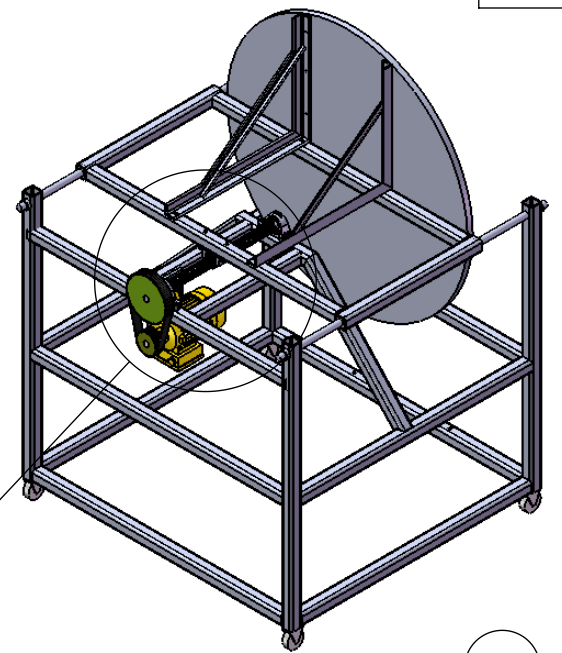
ΟΝΟΜΑ:

ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΔΙΑ-02



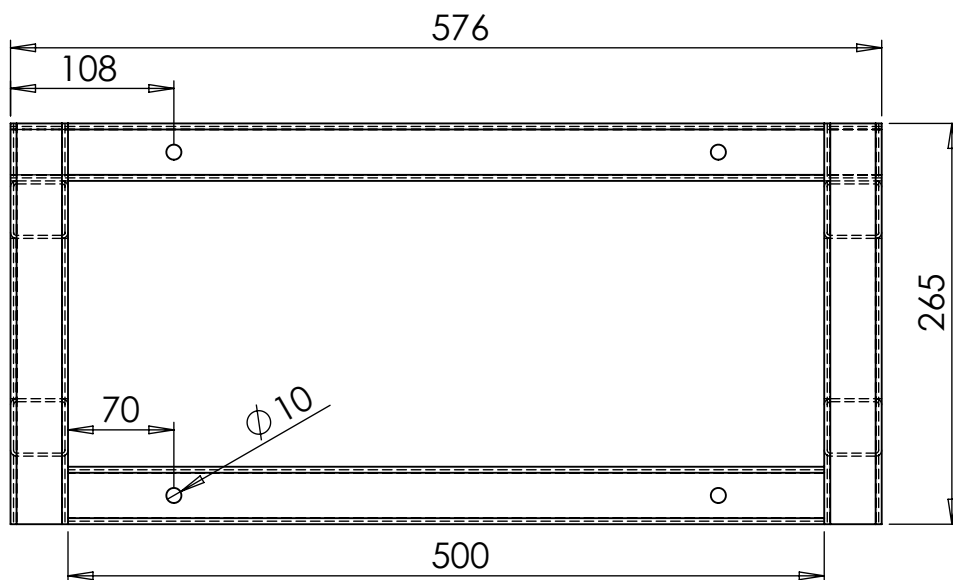
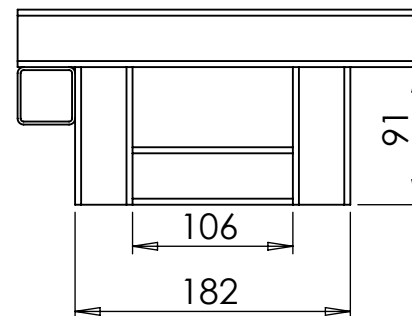
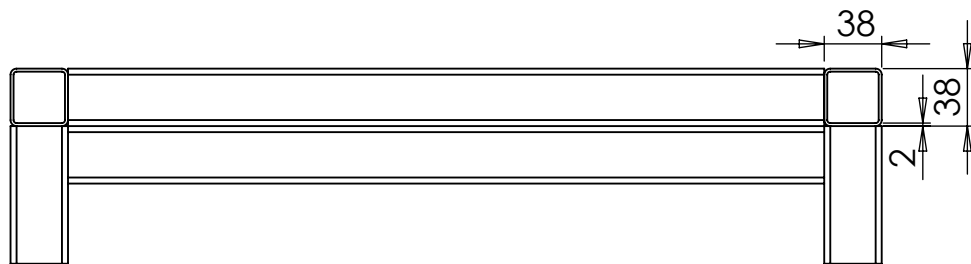
DETAIL A
SCALE 1 : 10



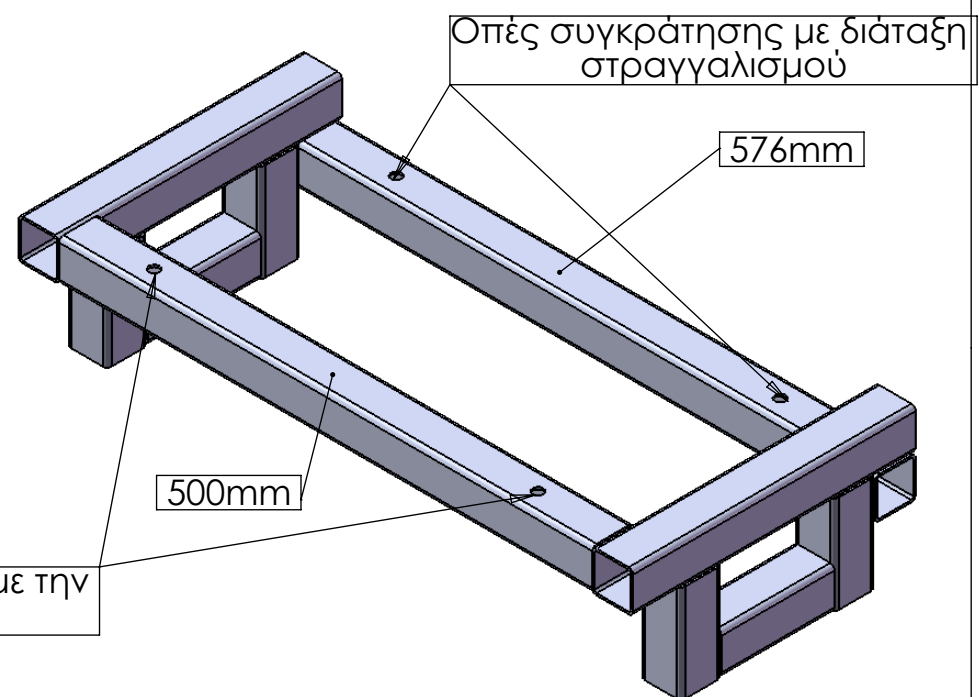
α/α	Περιγραφή τμαχίου
1	"Κώνος" στραγγαλισμού παροχής
2	Γλίστρες (άξονες Φ20x1m)
3	Ελαστικοί τροχοί μεταφοράς διάταξης
4	Έδρανα κοχλίας (6) (skf syk 20 ff)
5	Περισκόχλιο κοχλίας (6)
6	Τραπεζοειδής κοχλίας D=30mm, P=6mm
7	Τροχαλία χρονισμού 48L100 d=18mm (Challenge)
8	Τροχαλία χρονισμού 24L100 d=19mm (Challenge)
9	Ιμάντας χρονισμού 270L100 P.L.=685.8mm (Challenge)
10	Η/Κ 0.18kW, 640RPM, 8πόλοι (Valiadis)
11	Οπές συγκράτησης με τον αποστάτη (Σχ. ΑΠΟ-01)

ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ :
 Τα δομικά στοιχεία της διάταξης είναι κοιλοδοκοί διατομής 40x40x4 υλικού st37, εκτός από τις γωνίες συγκράτησης του "κώνου" που είναι διατομής τύπου L διαστάσεων 35x35x5.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΡΑΓΓΑΛΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΥΛΙΚΟ: -	ΒΑΡΟΣ: ~80kg	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 4/03/10
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΣΤΡ-01		



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΑΠΟΣΤΑΤΗ



ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ :

Όλα ταδομικά στοιχεία είναι από στραντζαριστό διατομής 38x38x2.

Οπές συγκράτησης με την κύρια διάταξη

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

ΑΠΟΣΤΑΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΡΑΓΓΑΛΙΣΜΟΥ
ΠΑΡΟΧΗΣ

ΥΛΙΚΟ:
-

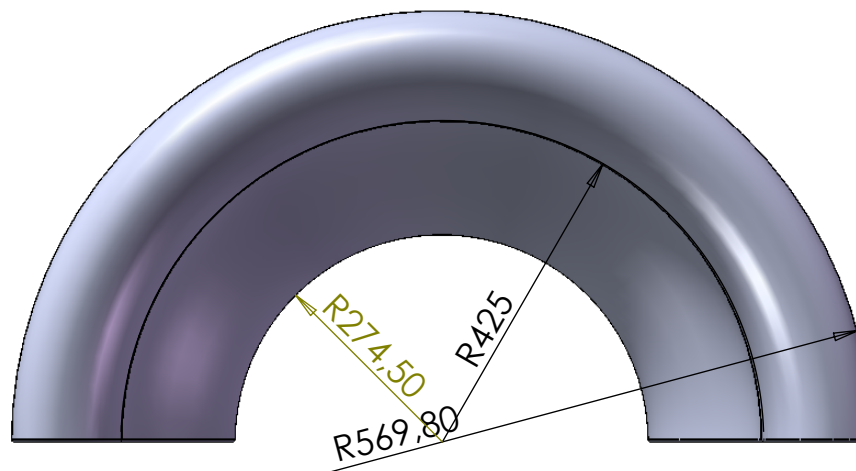
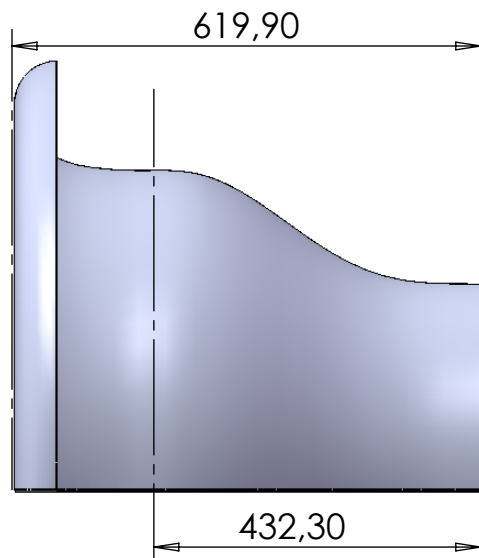
ΒΑΡΟΣ:
~2kg

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
29/10/09

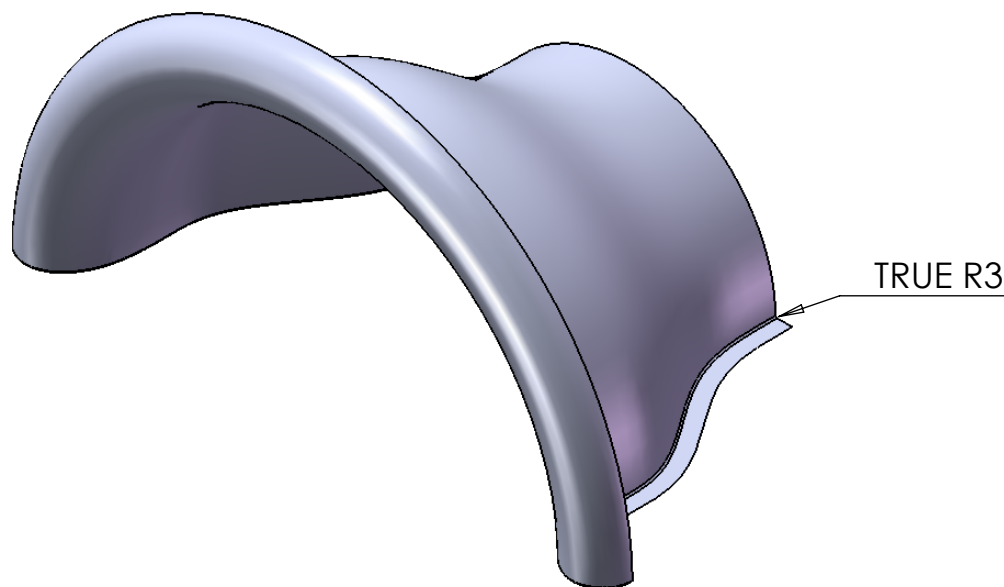
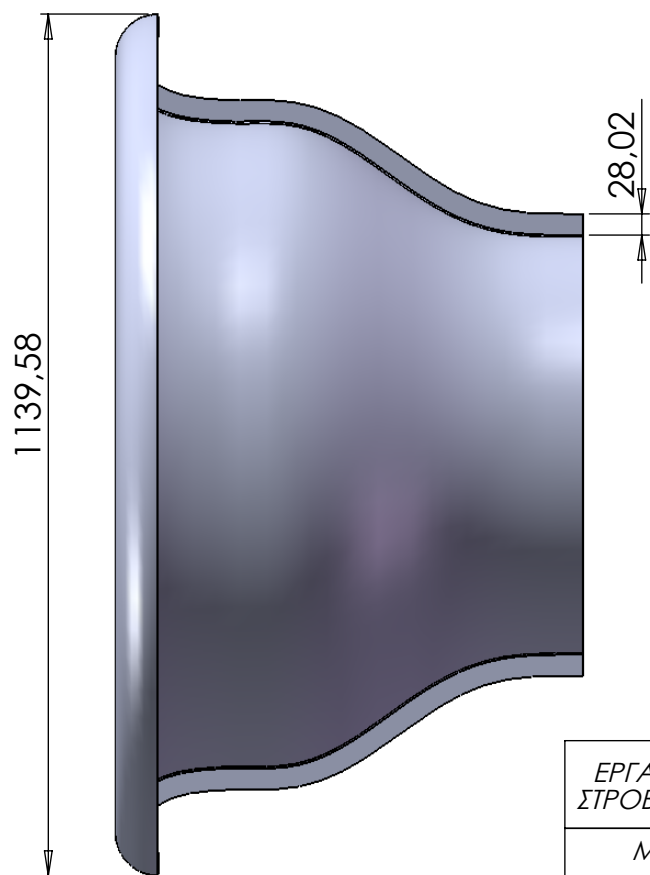
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΟΝΟΜΑ:
ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΑΠΟ-01



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΜΙΣΟΥ ΒELLMOUTH



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΩΣ
ΑΓΩΓΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ (BELLMOUTH)

ΥΛΙΚΟ:
Πολυεστέρας
& Υαλοπίλημα

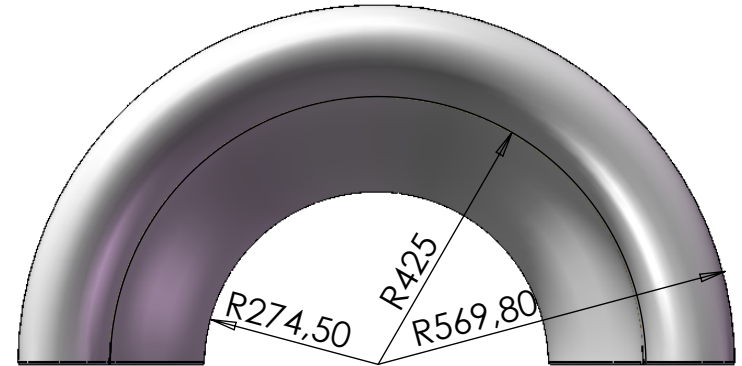
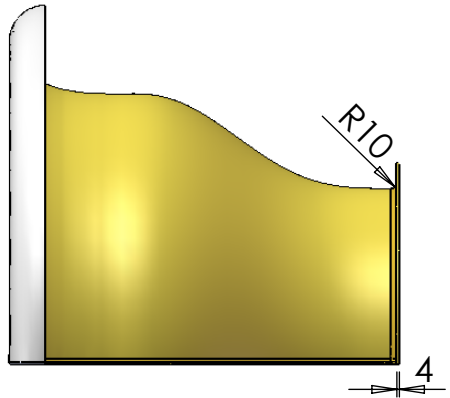
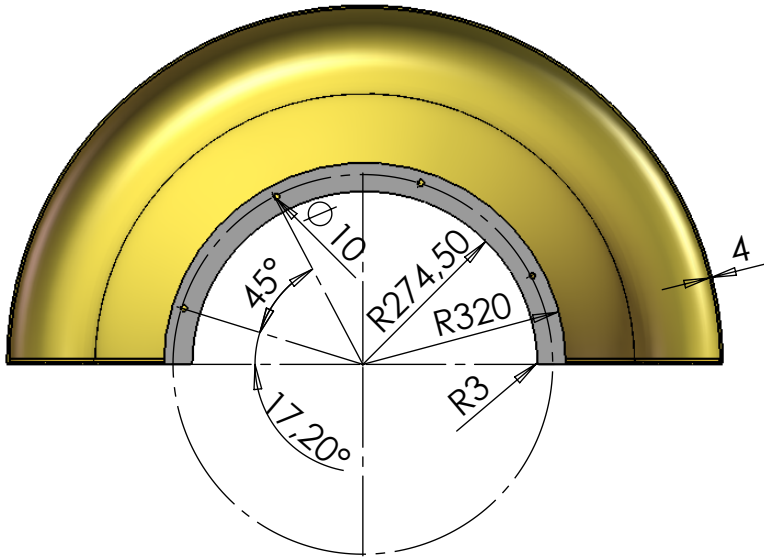
ΒΑΡΟΣ:
~

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
24/07/09

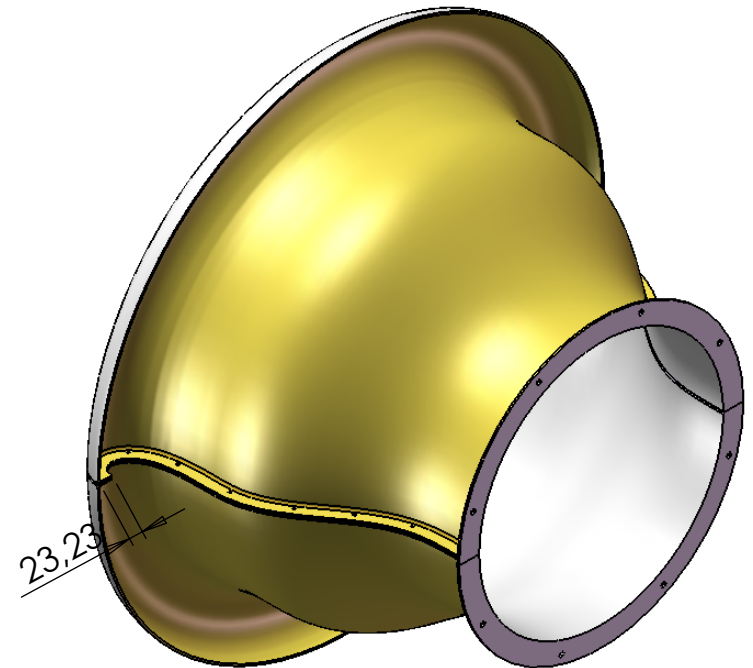
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΟΝΟΜΑ:
ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΑΓΩ-01



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ (BELLMOUTH)



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΣΥΓΚΛΙΝΩΝ ΑΓΩΓΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ
(BELLMOUTH)

ΟΝΟΜΑ: **ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ**

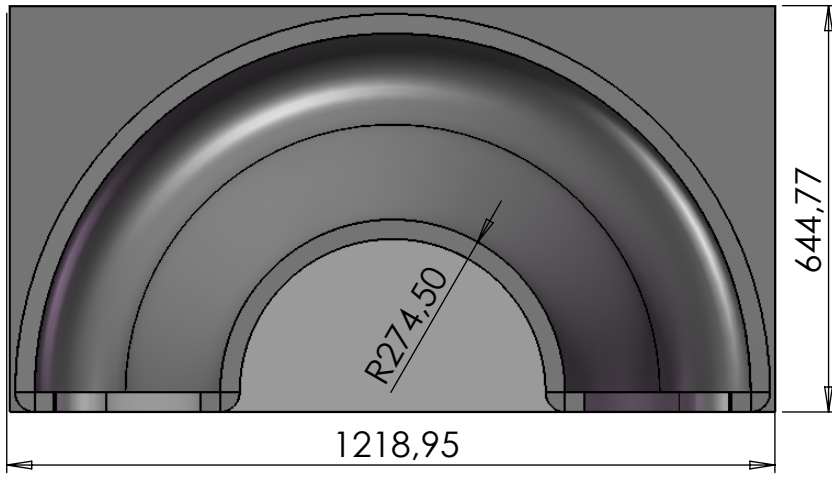
ΥΛΙΚΟ: Πολυεστέρας & Υαλοπίλημα
ΒΑΡΟΣ: ~10kg
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 24/07/09

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΑΓΩ-01

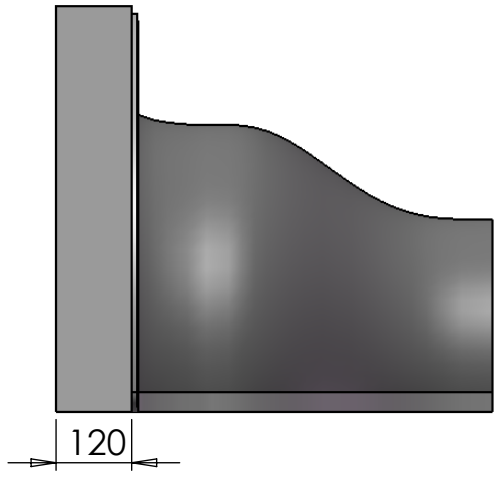
ΚΑΛΟΥΠΙ ΑΓΩΓΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ (BELLMOUTH)

ΚΑΛ-01

1/1

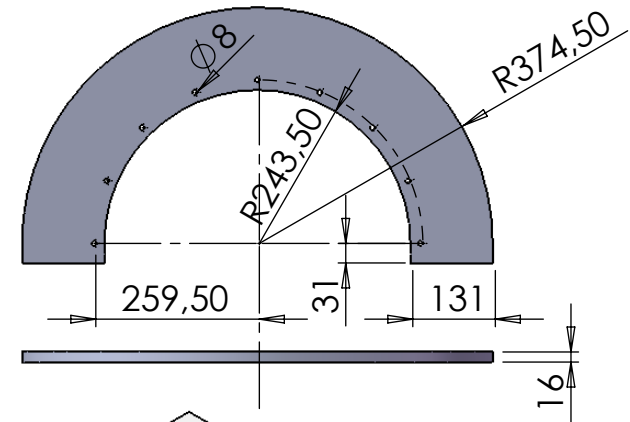


ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ (BELLMOUTH)



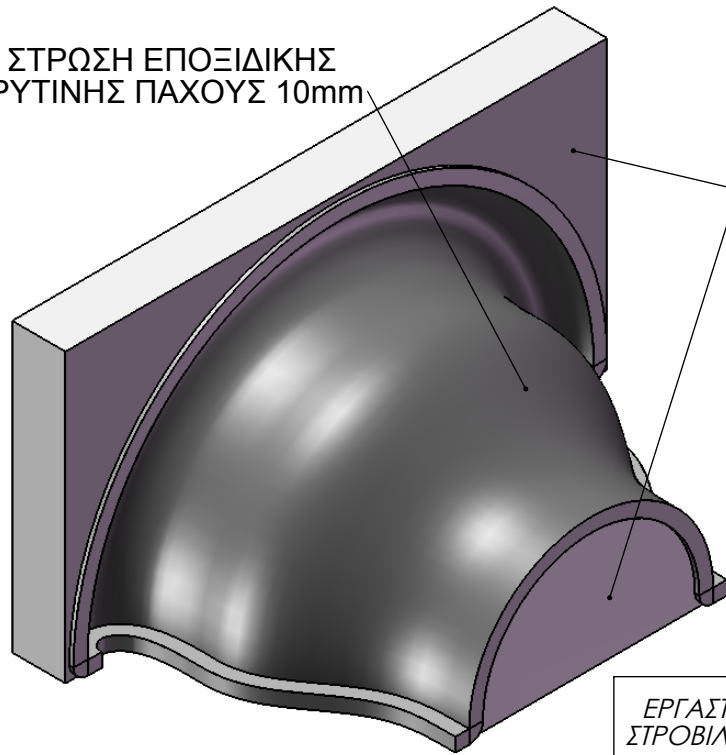
ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ (BELLMOUTH) ΜΕ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΗ ΤΗ ΦΛΑΤΖΑ

ΦΛΑΤΖΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ BELLMOUTH (ΒΙΔΩΝΕΤΑΙ ΣΤΟ ΚΑΛΟΥΠΙ)

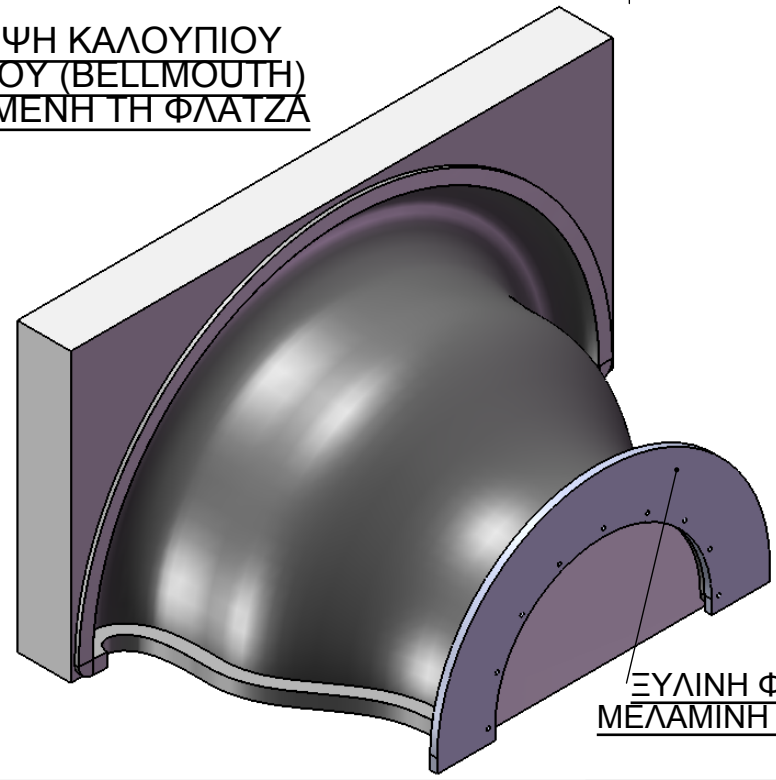


ΣΤΡΩΣΗ ΕΠΟΞΙΔΙΚΗΣ ΡΥΤΙΝΗΣ ΠΑΧΟΥΣ 10mm

ΦΕΛΙΖΟΛ ΥΨΗΛΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ



ΞΥΛΙΝΗ ΦΛΑΤΖΑ ΑΠΟ ΜΕΛΑΜΙΝΗ ΠΑΧΟΥΣ 16mm

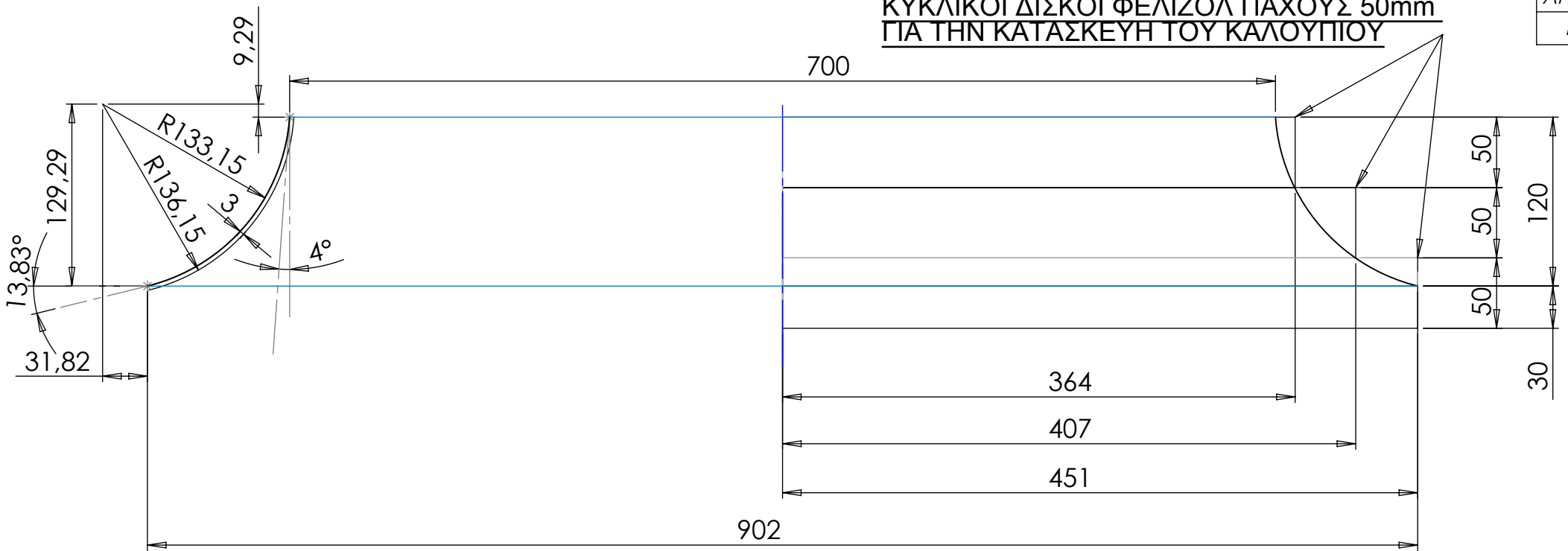


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΚΑΛΟΥΠΙ ΑΓΩΓΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ (BELLMOUTH MOLD)	ΥΛΙΚΟ: -	ΒΑΡΟΣ: ~15kg	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 24/07/09
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΚΑΛ-01		

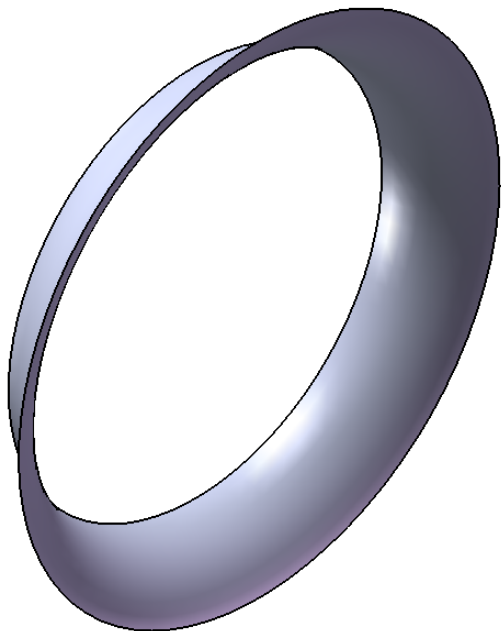
ΚΥΚΛΙΚΟΙ ΔΙΣΚΟΙ ΦΕΛΙΖΟΛ ΠΑΧΟΥΣ 50mm
ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

ΑΓΩ-02

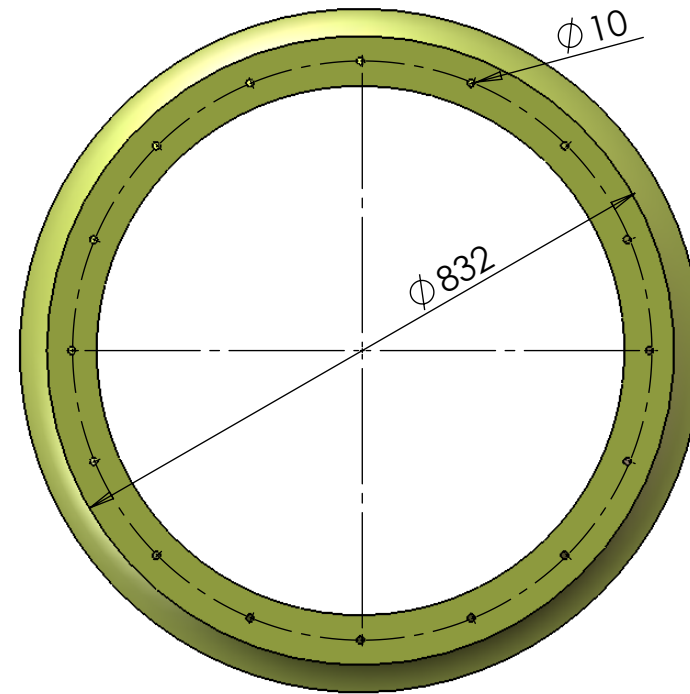
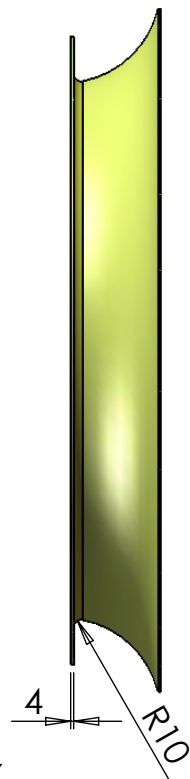
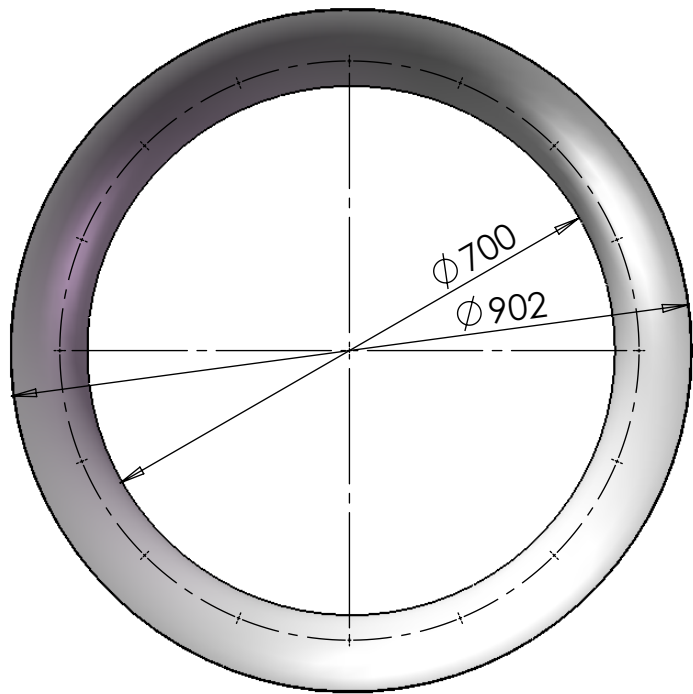
1/2



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΧΕΙΛΟΥΣ ΕΞΟΔΟΥ



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΞΟΔΟΥ (ΧΕΙΛΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΔΙΑΧΥΤΗ)	ΥΛΙΚΟ: <i>Πολυεστέρας & Υαλοπίλημα</i>	ΒΑΡΟΣ: ~	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 22/07/09
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΑΓΩ-02		



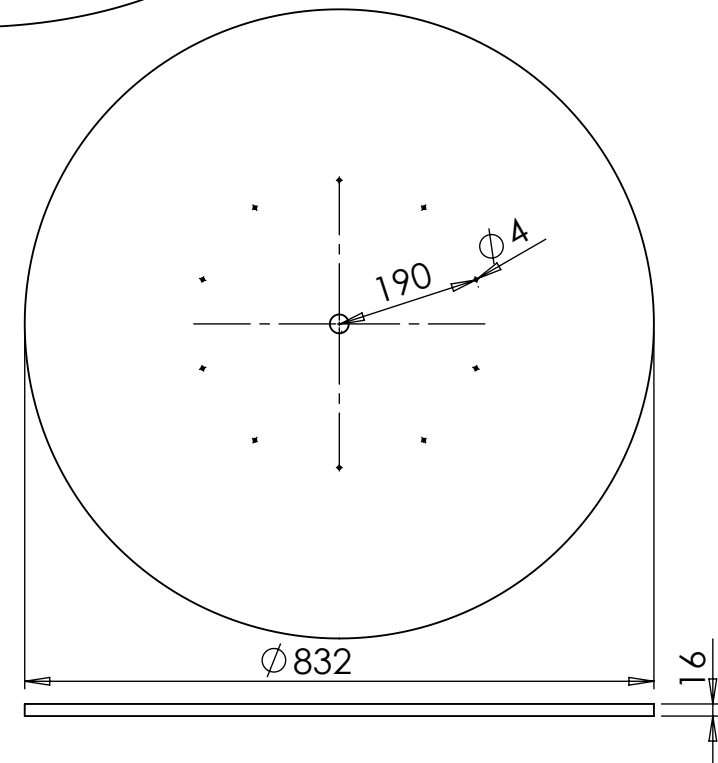
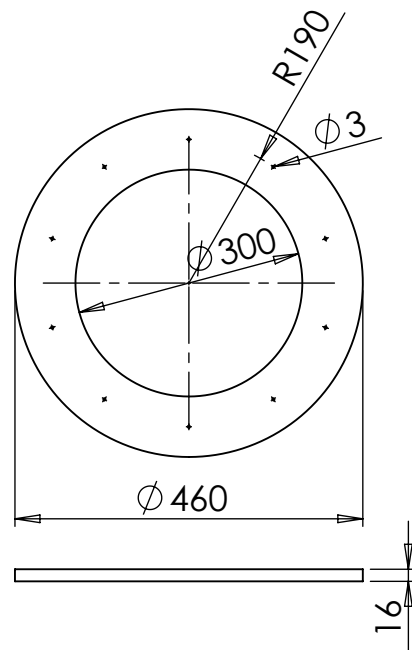
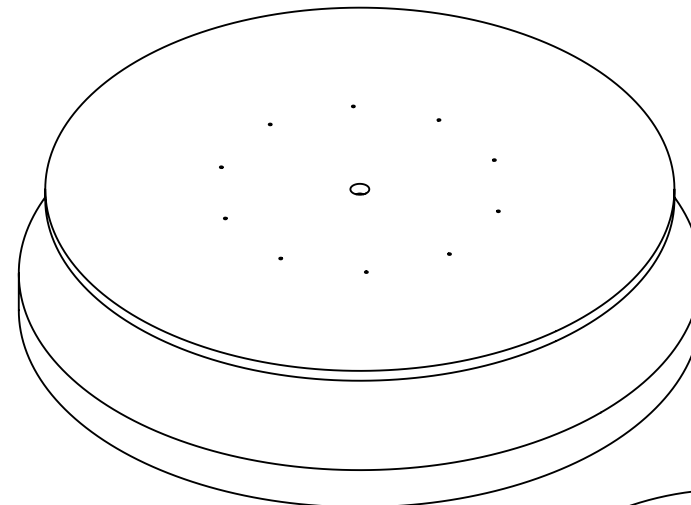
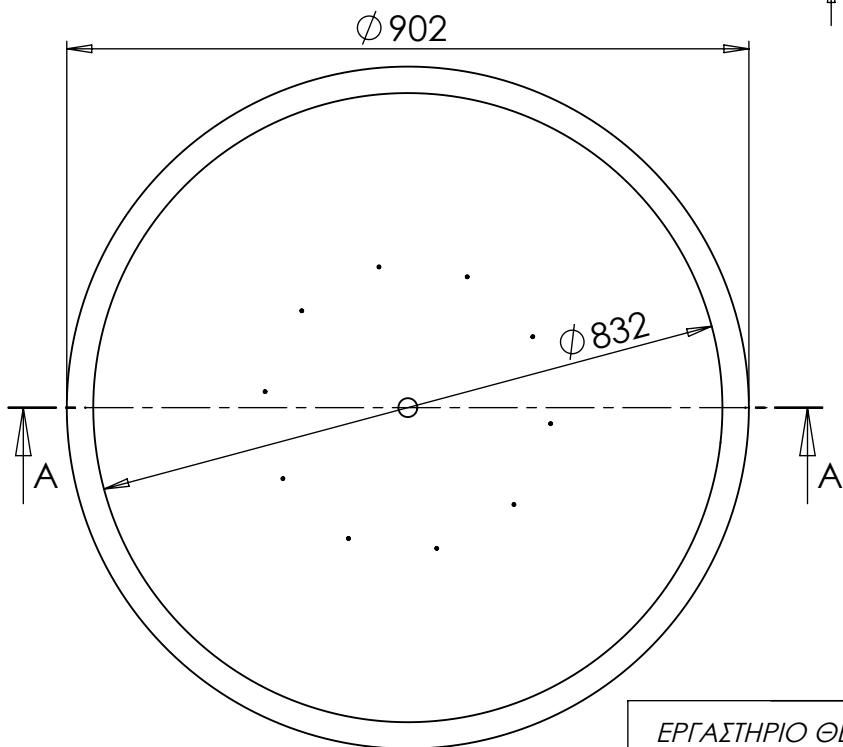
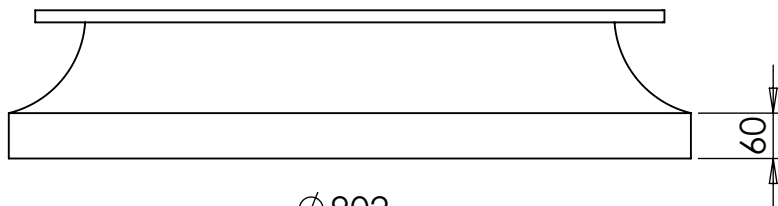
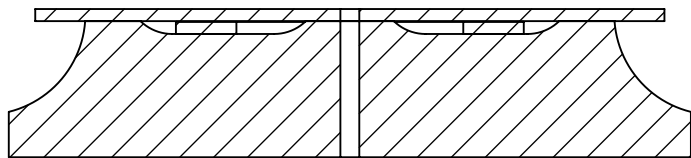
ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΧΕΙΛΟΥΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΞΟΔΟΥ



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΧΕΙΛΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΞΟΔΟΥ	ΥΛΙΚΟ: POLYESTER RESIN & FIBERGLASS	ΒΑΡΟΣ: ~2.5kg	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 24/07/09
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΑΓΩ-02		

ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΕΝΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

SECTION A-A
SCALE 1 : 10



<p>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ</p>	<p>ΚΑΛΟΥΠΙ ΧΕΙΛΟΥΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΞΟΔΟΥ</p>	<p>ΥΛΙΚΟ: -</p>	<p>ΒΑΡΟΣ: ~10kg</p>	<p>ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 24/07/09</p>
<p>ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ</p>	<p>ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ</p>	<p>ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΚΑΛ-02</p>		

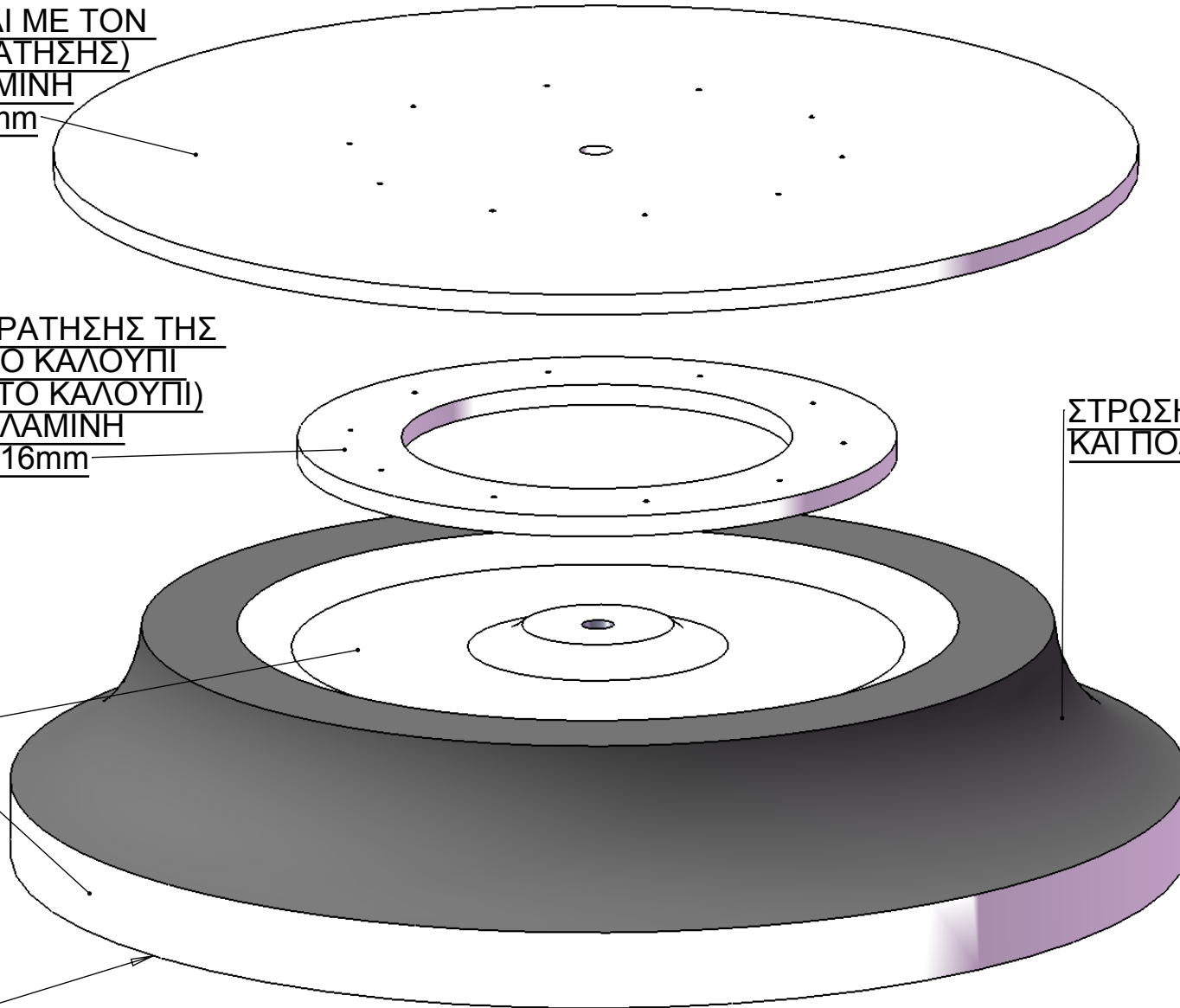
ΦΛΑΤΖΑ (ΒΙΔΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟΝ
ΔΑΚΤΥΛΙΟ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ)
ΥΛΙΚΟ : ΜΕΛΑΜΙΝΗ
ΠΑΧΟΣ : 16mm

ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΤΗΣ
ΦΛΑΤΖΑΣ ΜΕ ΤΟ ΚΑΛΟΥΠΙ
(ΚΟΛΛΙΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΚΑΛΟΥΠΙ)
ΥΛΙΚΟ : ΜΕΛΑΜΙΝΗ
ΠΑΧΟΣ : 16mm

ΣΤΡΩΣΗ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ
ΚΑΙ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΟΥ ΣΤΟΚΟΥ
ΠΑΧΟΥΣ 2mm

ΦΕΛΙΖΟΛ

ΚΑΛΟΥΠΙ



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
 ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

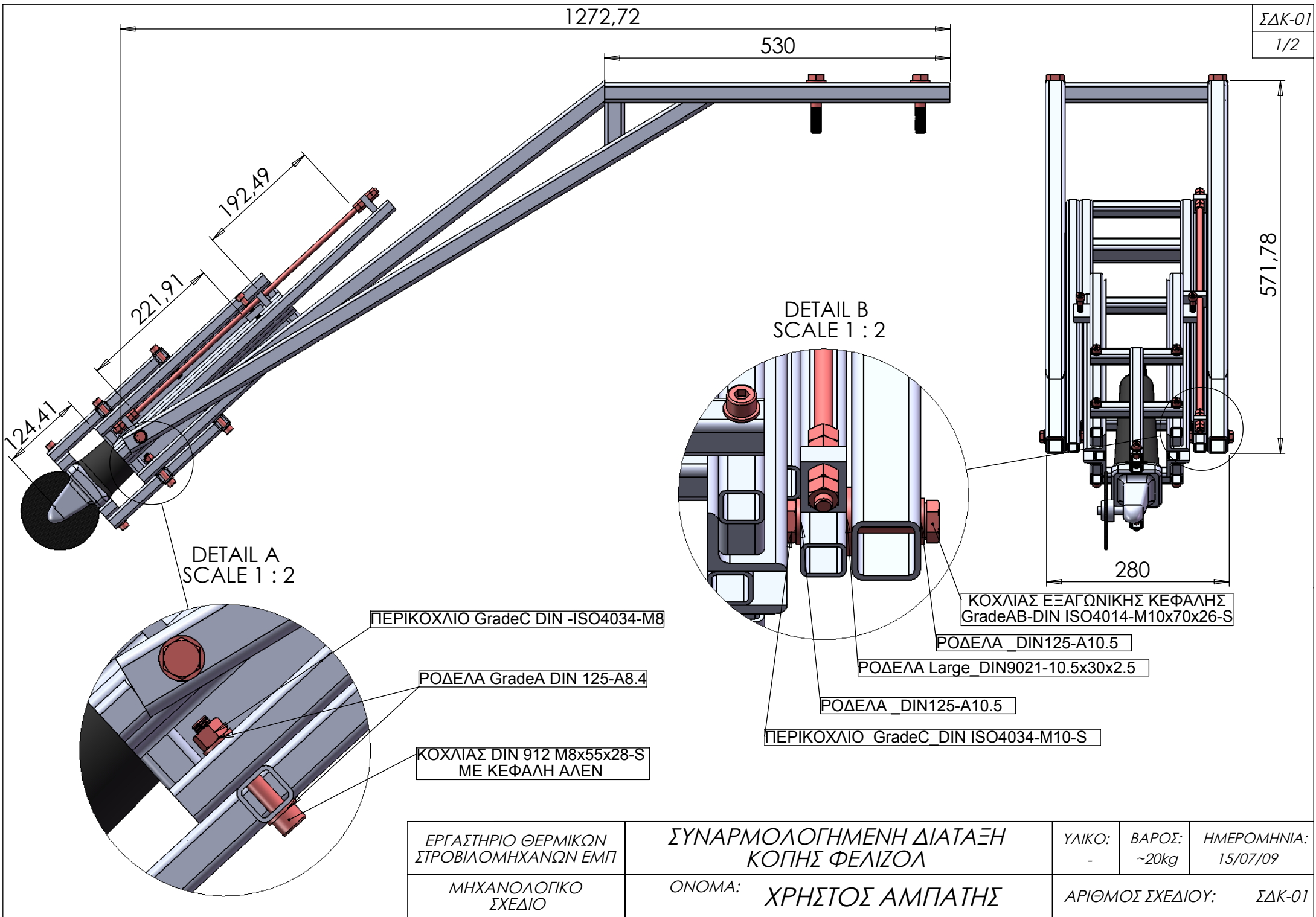
ΚΑΛΟΥΠΙ ΧΕΙΛΟΥΣ ΕΞΟΔΟΥ
 ΑΓΩΓΟΥ ΕΓΟΔΟΥ

ΥΛΙΚΟ: - ΒΑΡΟΣ: ~10kg ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 24/07/09

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
 ΣΧΕΔΙΟ

ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΚΑΛ-02



DETAIL A
SCALE 1 : 2

DETAIL B
SCALE 1 : 2

ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ GradeC DIN -ISO4034-M8

ΡΟΔΕΛΑ GradeA DIN 125-A8.4

ΚΟΧΛΙΑΣ DIN 912 M8x55x28-S
ΜΕ ΚΕΦΑΛΗ ΑΛΕΝ

ΚΟΧΛΙΑΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ
GradeAB-DIN ISO4014-M10x70x26-S

ΡΟΔΕΛΑ DIN125-A10.5

ΡΟΔΕΛΑ Large DIN9021-10.5x30x2.5

ΡΟΔΕΛΑ DIN125-A10.5

ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ GradeC DIN ISO4034-M10-S

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

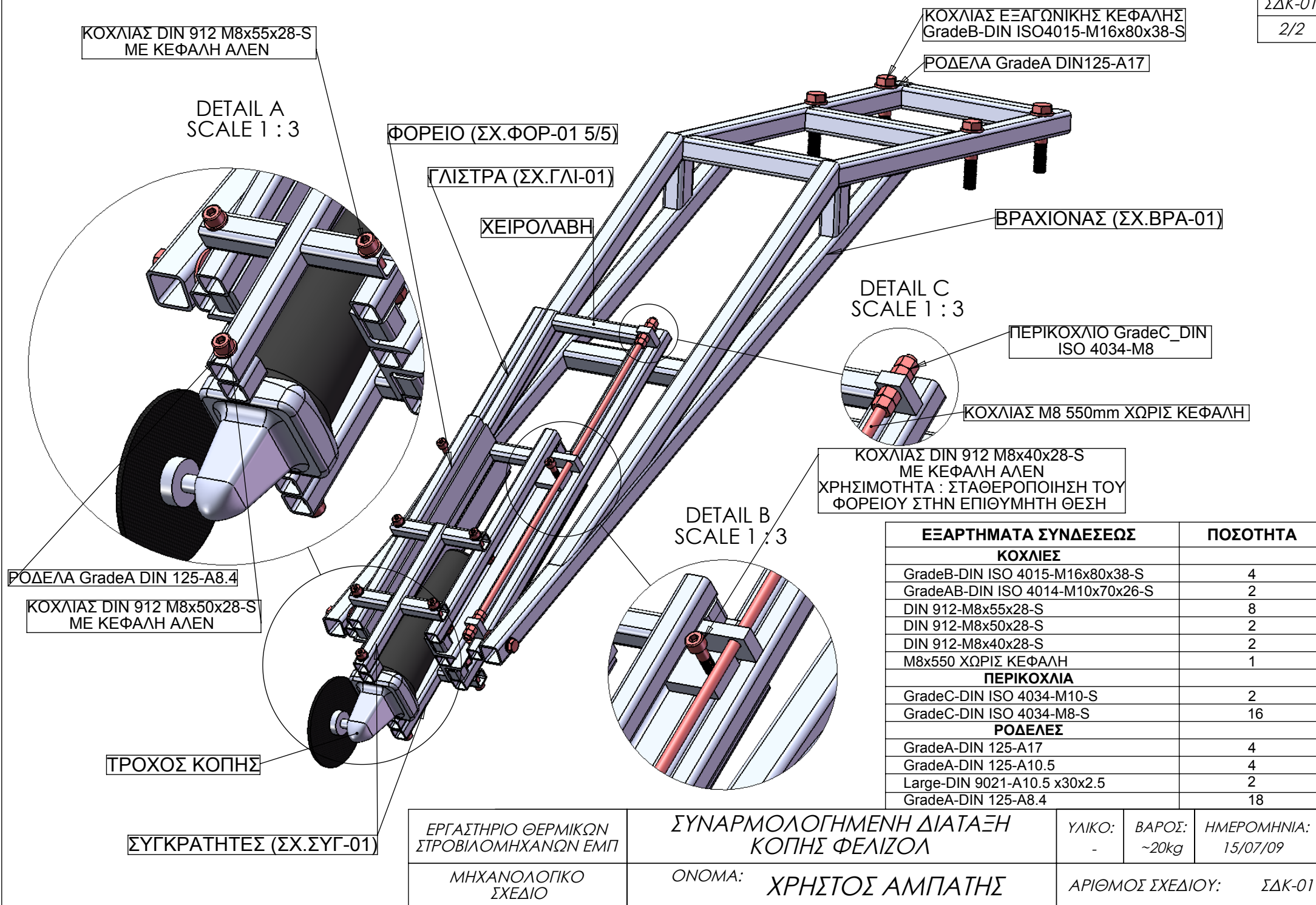
ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ
ΚΟΠΗΣ ΦΕΛΙΖΟΛ

ΥΛΙΚΟ: -	ΒΑΡΟΣ: ~20kg	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 15/07/09
-------------	-----------------	-------------------------

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΟΝΟΜΑ:
ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΣΔΚ-01



ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
ΚΟΧΛΙΕΣ	
GradeB-DIN ISO 4015-M16x80x38-S	4
GradeAB-DIN ISO 4014-M10x70x26-S	2
DIN 912-M8x55x28-S	8
DIN 912-M8x50x28-S	2
DIN 912-M8x40x28-S	2
M8x550 ΧΩΡΙΣ ΚΕΦΑΛΗ	1
ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΑ	
GradeC-DIN ISO 4034-M10-S	2
GradeC-DIN ISO 4034-M8-S	16
ΡΟΔΕΛΕΣ	
GradeA-DIN 125-A17	4
GradeA-DIN 125-A10.5	4
Large-DIN 9021-A10.5 x30x2.5	2
GradeA-DIN 125-A8.4	18

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ
ΚΟΠΗΣ ΦΕΛΙΖΟΛ

ΥΛΙΚΟ:
-

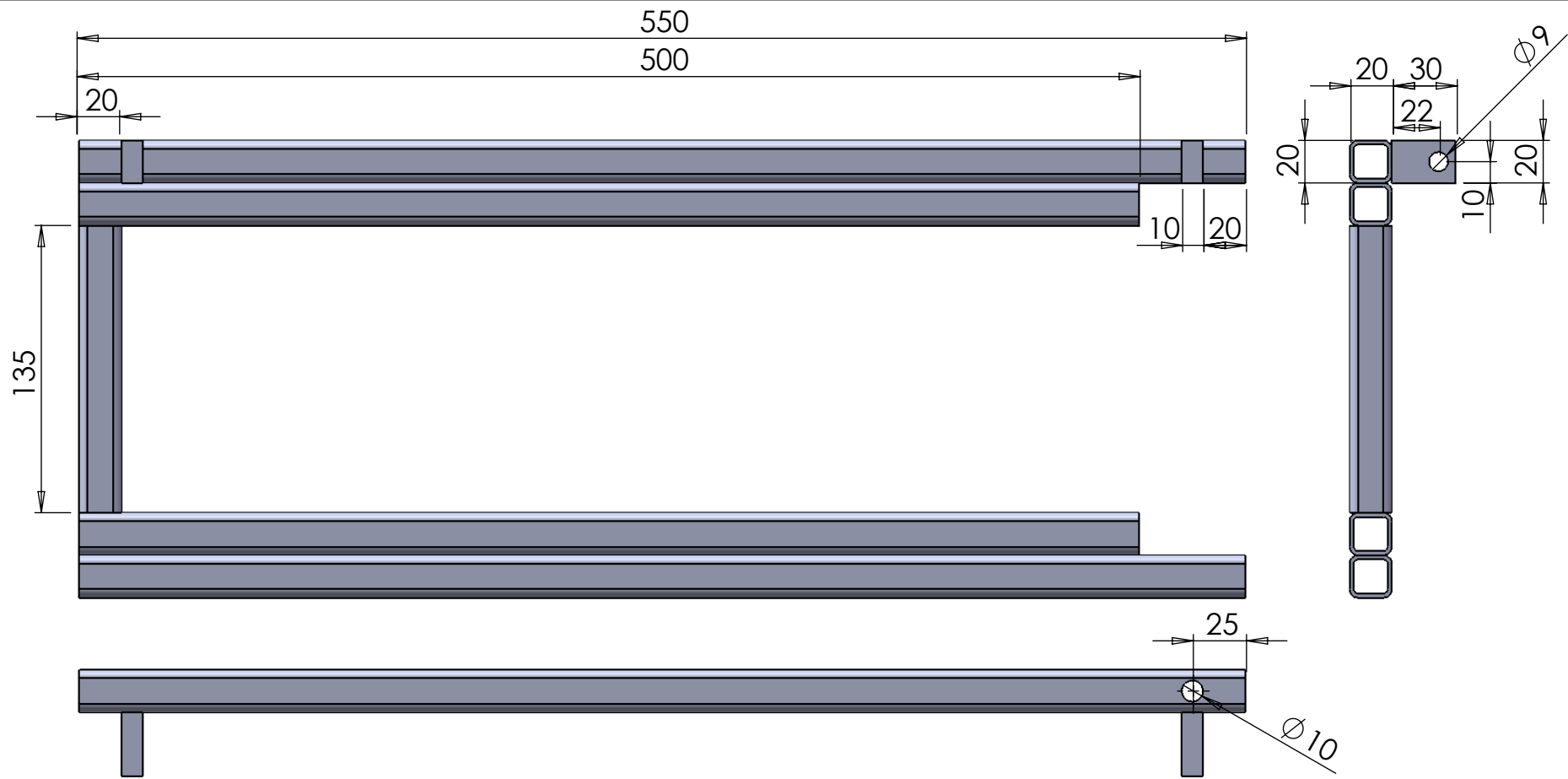
ΒΑΡΟΣ:
~20kg

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
15/07/09

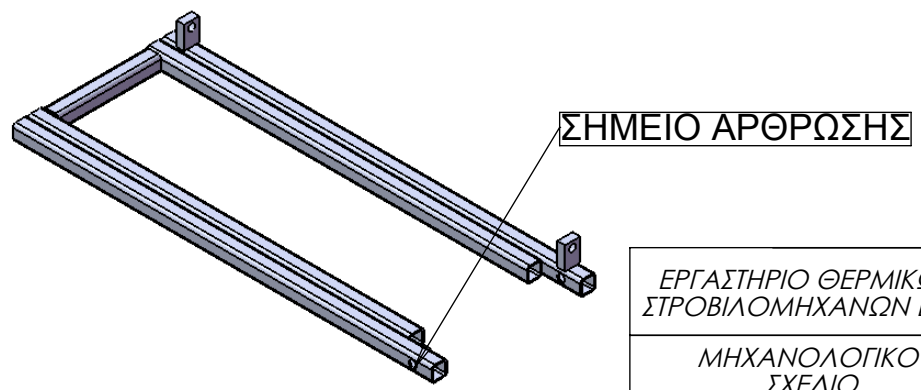
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΟΝΟΜΑ:
ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

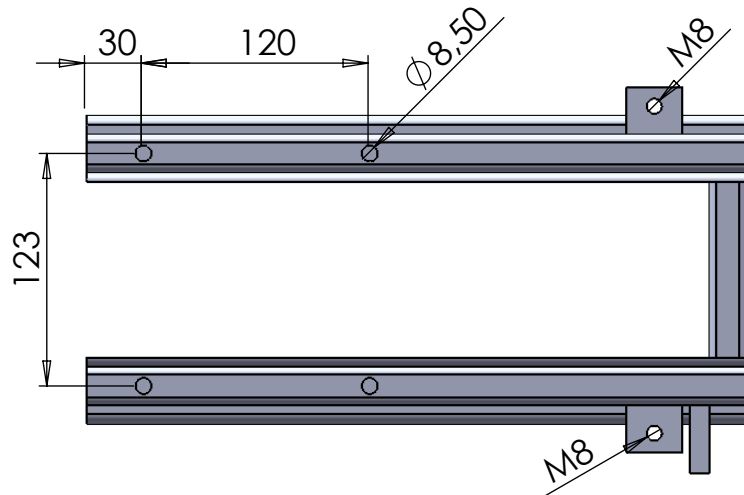
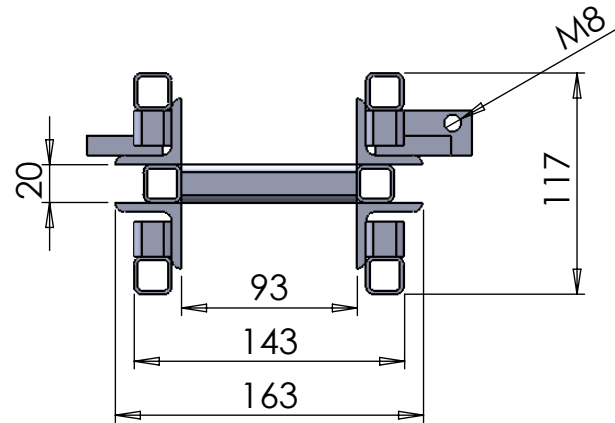
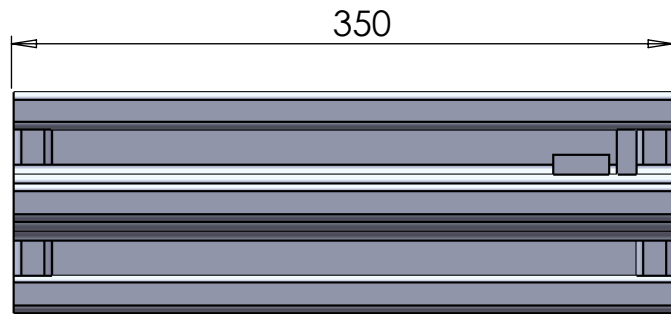
ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΣΔΚ-01



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΓΛΙΣΤΡΑΣ

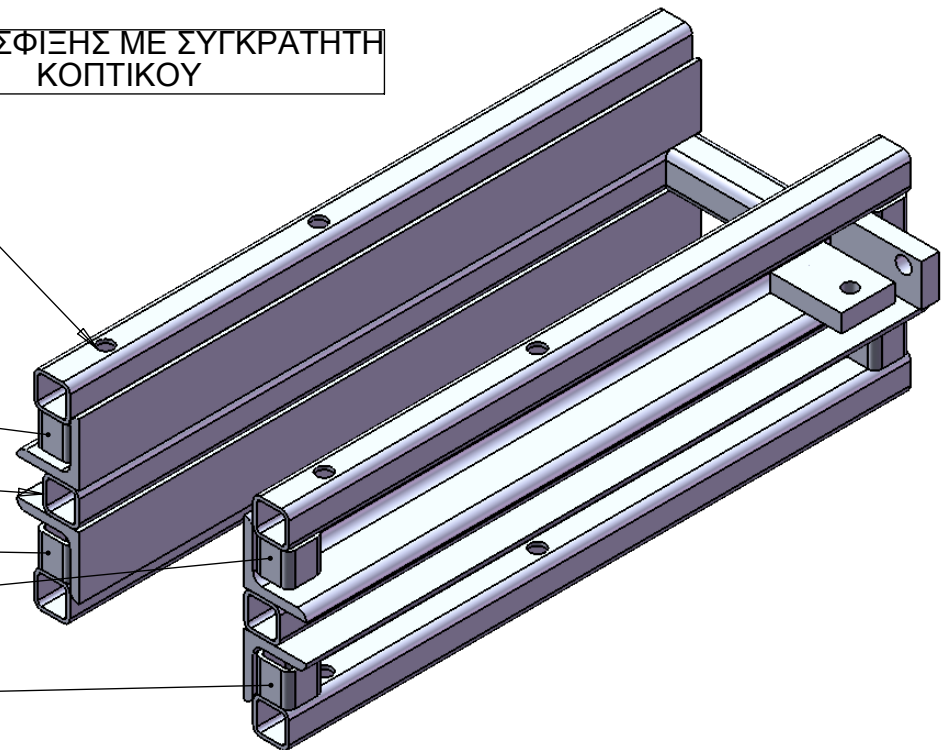


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΓΛΙΣΤΡΑ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ	ΥΛΙΚΟ: ΣΤΡΑΝΤΖΑΡΙΣΤΟ 20x20x2	ΒΑΡΟΣ: ~150g	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 15/07/09
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΓΛΙ-01		



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

ΟΠΕΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ ΜΕ ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗ ΚΟΠΤΙΚΟΥ



ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Γ" (ΦΟΡ-01 3/5)

ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Α" (ΦΟΡ-01 1/5)

ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Δ" (ΦΟΡ-01 4/5)

ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Β" (ΦΟΡ-01 2/5)

ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Δ" (ΦΟΡ-01 4/5)

ΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ Β,Γ,Δ,
ΣΥΓΚΟΛΛΟΥΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ Α

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

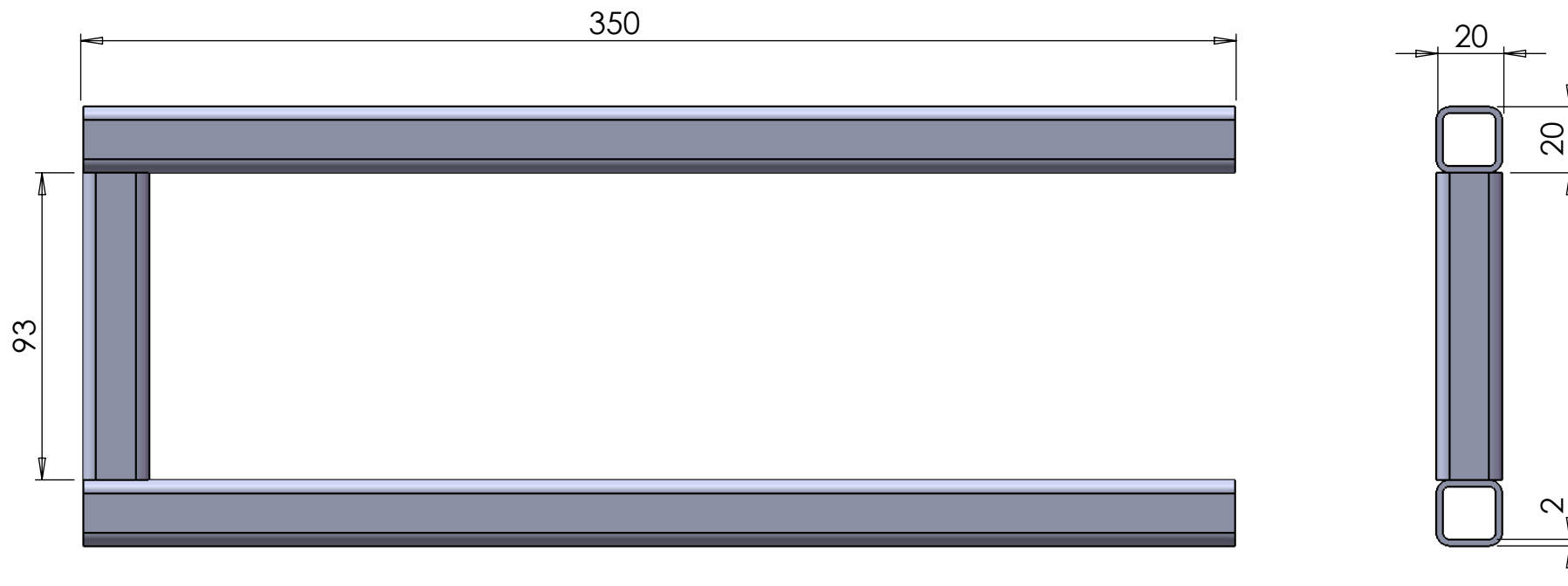
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΦΟΡΕΙΟ ΚΟΠΤΙΚΟΥ

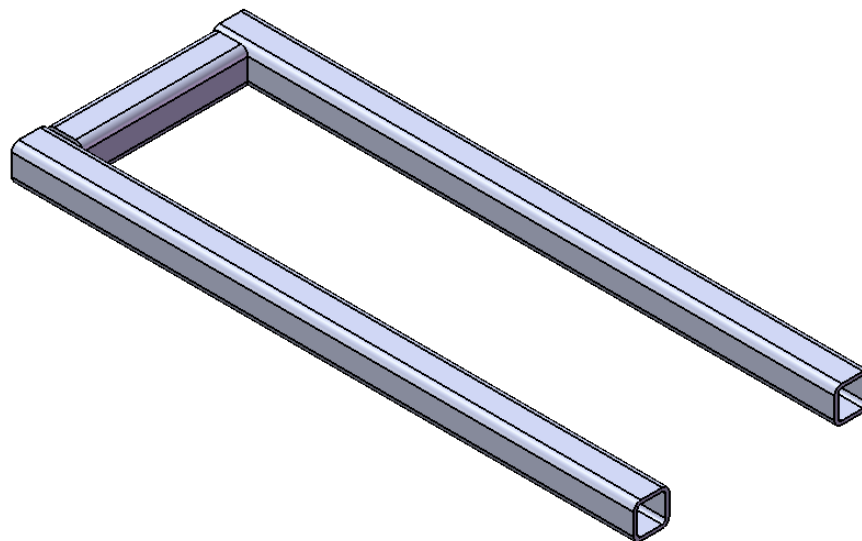
ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΥΛΙΚΟ: -
ΒΑΡΟΣ: ~3kg
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 15/07/09

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΦΟΡ-01



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Α"
ΦΟΡΕΑ ΚΟΠΤΙΚΟΥ

ΥΛΙΚΟ:
ΣΤΡΑΝΤΖΑΡΙΣΤΟ
20x20x2

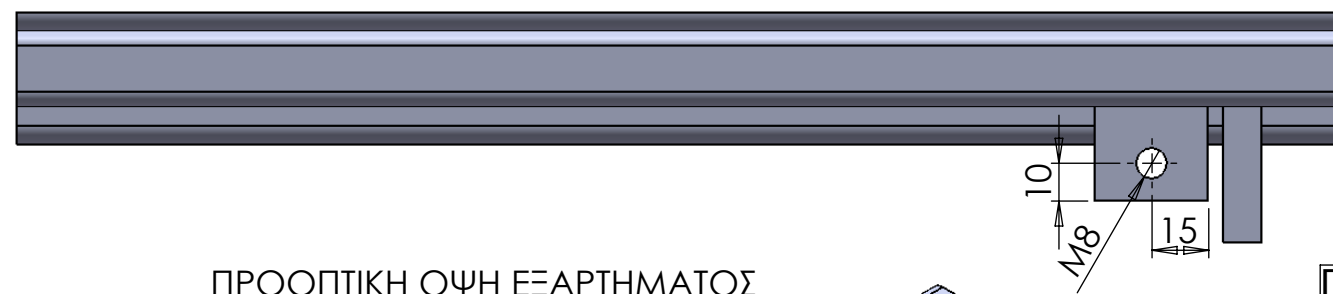
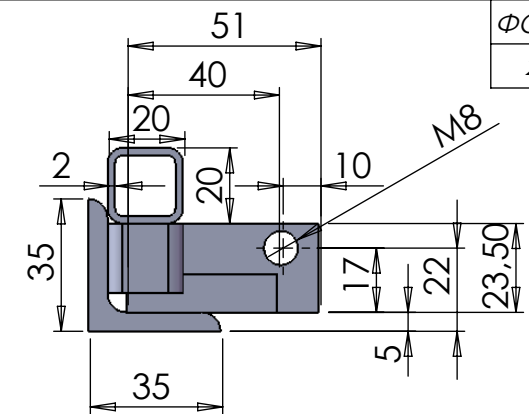
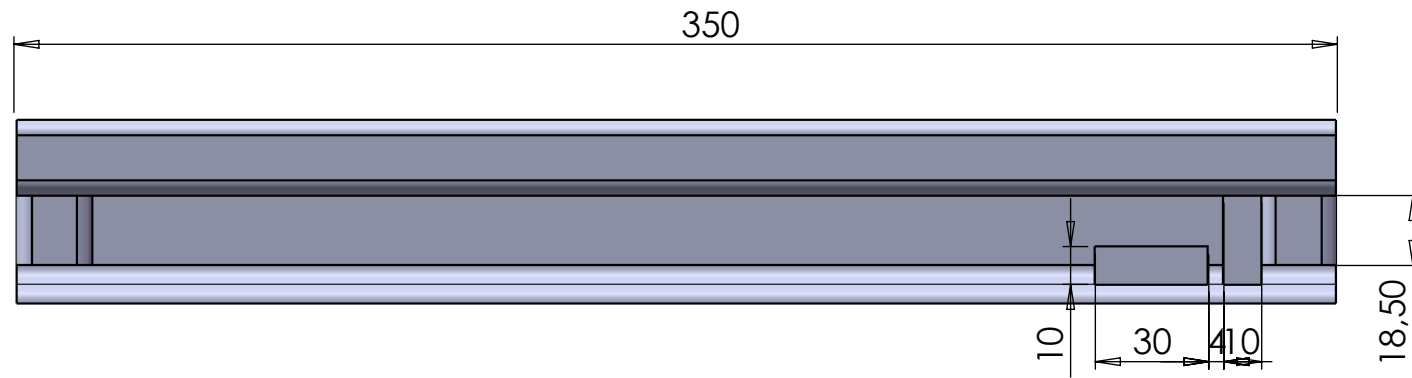
ΒΑΡΟΣ:
~400g

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
15/07/09

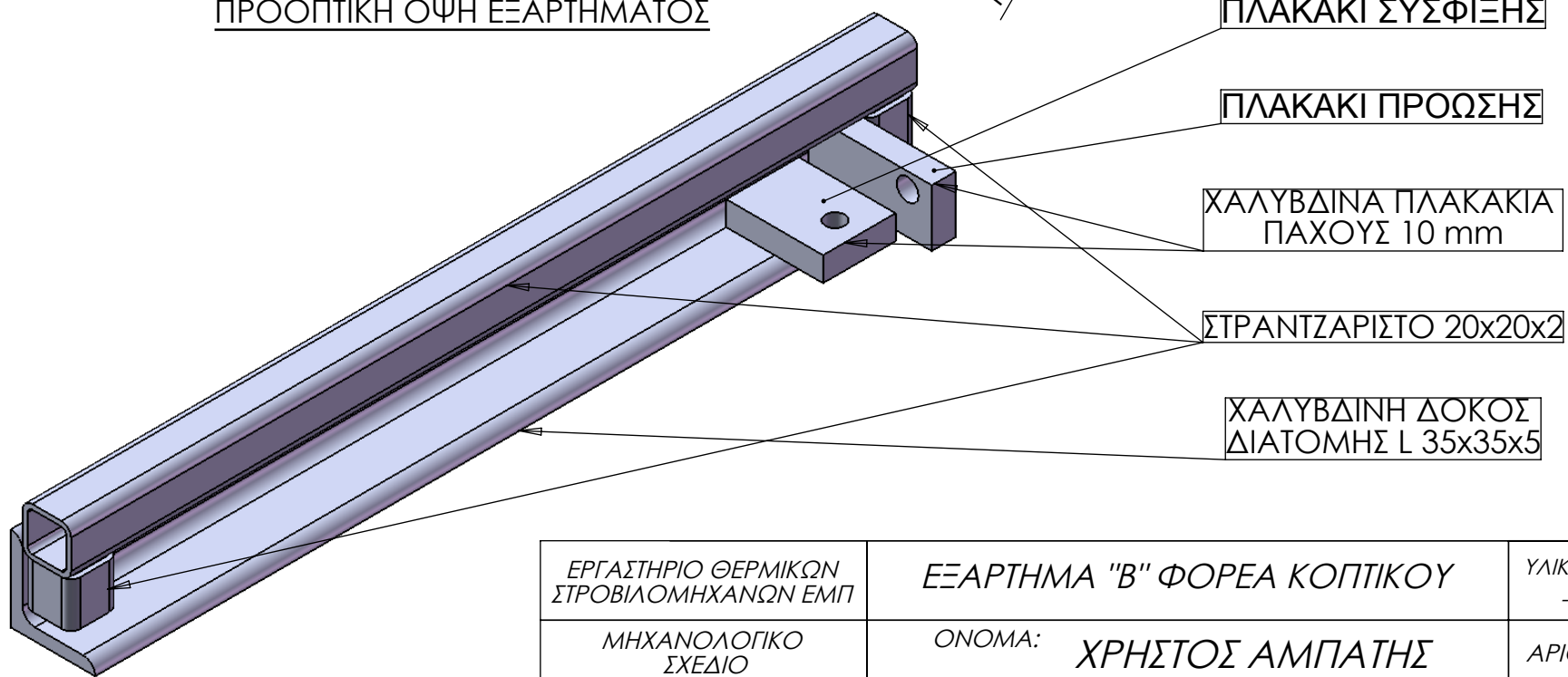
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΟΝΟΜΑ:
ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΦΟΡ-01



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ



ΠΛΑΚΑΚΙ ΣΥΣΦΙΞΗΣ

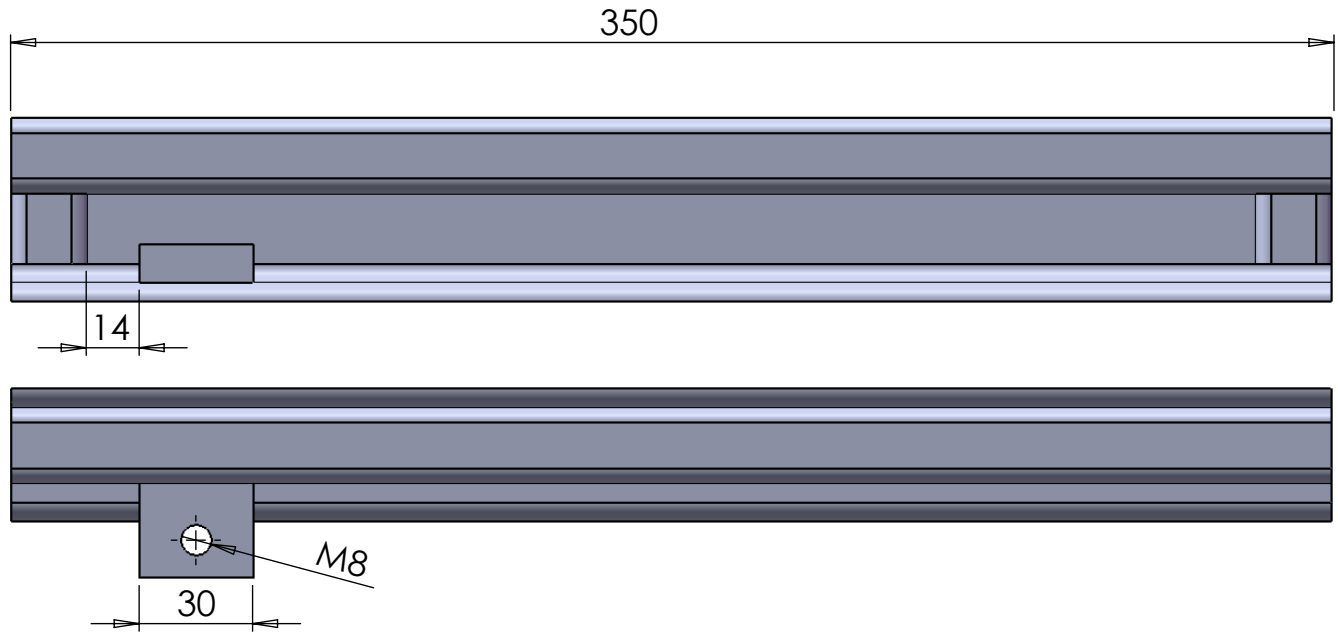
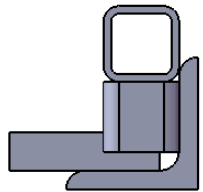
ΠΛΑΚΑΚΙ ΠΡΟΩΣΗΣ

ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΠΛΑΚΑΚΙΑ ΠΑΧΟΥΣ 10 mm

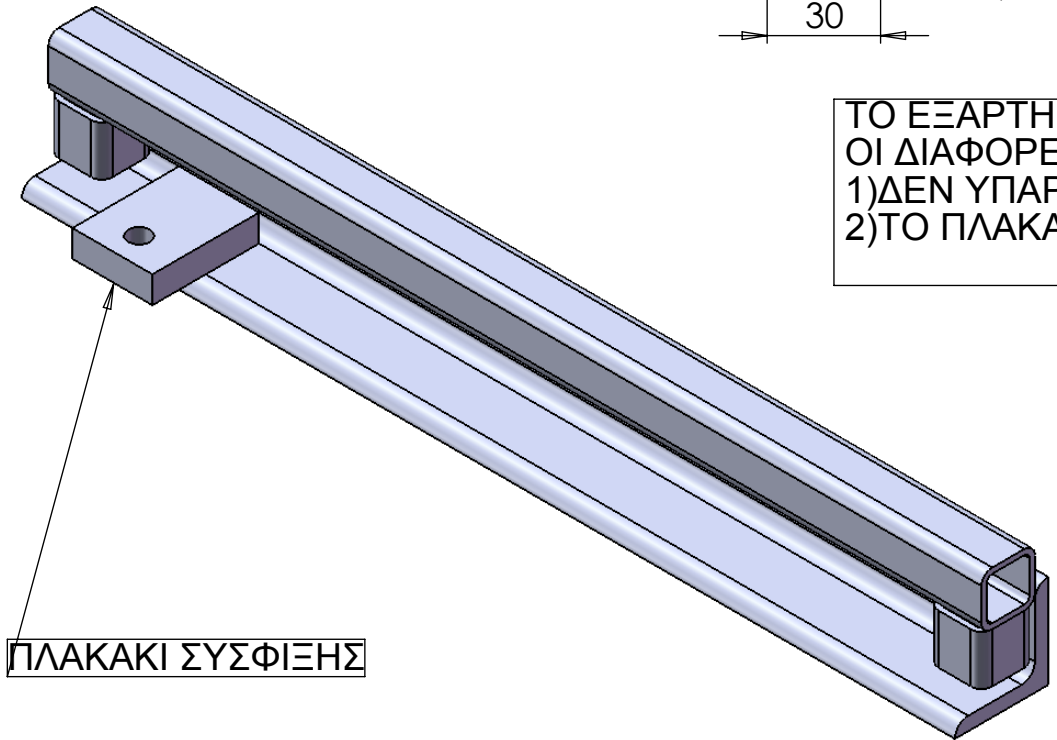
ΣΤΡΑΝΤΖΑΡΙΣΤΟ 20x20x2

ΧΑΛΥΒΔΙΝΗ ΔΟΚΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ L 35x35x5

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΕΞΑΡΤΗΜΑ "B" ΦΟΡΕΑ ΚΟΠΤΙΚΟΥ	ΥΛΙΚΟ: -	ΒΑΡΟΣ: ~650g	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 15/07/09
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΦΟΡ-01		



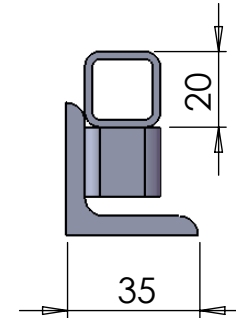
ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ



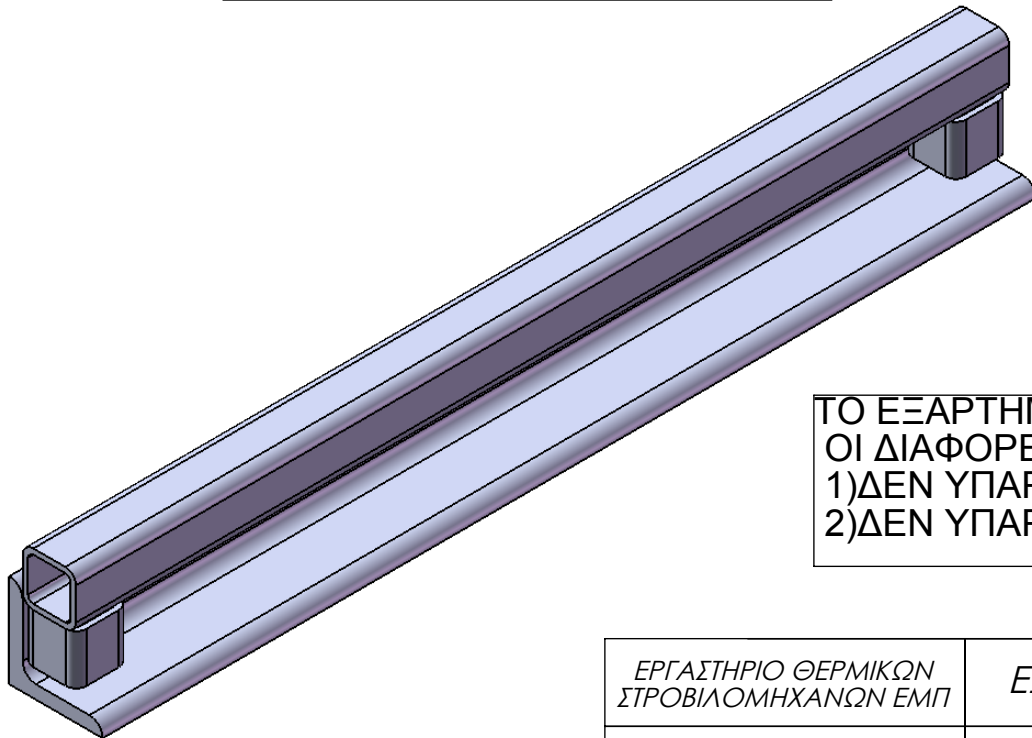
ΠΛΑΚΑΚΙ ΣΥΣΦΙΞΗΣ

ΤΟ ΕΞΑΡΤΗΜΑ ΑΥΤΟ ΕΙΝΑΙ ΙΔΙΟ ΜΕ ΤΟ ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Β" (ΦΟΡ-01 2/5).
ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΙΝΑΙ :
1)ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΤΟ ΠΛΑΚΑΚΙ ΠΡΟΩΣΗΣ.
2)ΤΟ ΠΛΑΚΑΚΙ ΣΥΣΦΙΞΗΣ ΕΙΝΑΙ ΣΤΗΝ ΑΠΕΝΑΝΤΙ ΠΛΕΥΡΑ.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Γ" ΦΟΡΕΑ ΚΟΠΤΙΚΟΥ	ΥΛΙΚΟ: -	ΒΑΡΟΣ: ~650g	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 15/07/09
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΦΟΡ-01		



ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ



ΤΟ ΕΞΑΡΤΗΜΑ ΑΥΤΟ ΕΙΝΑΙ ΙΔΙΟ ΜΕ ΤΟ ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Β" (ΦΟΡ-01 2/5).
ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΙΝΑΙ :

- 1) ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΤΟ ΠΛΑΚΑΚΙ ΠΡΩΩΣΗΣ.
- 2) ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΤΟ ΠΛΑΚΑΚΙ ΣΥΣΦΙΞΗΣ.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ

ΕΞΑΡΤΗΜΑ "Δ" ΦΟΡΕΙΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ

ΥΛΙΚΟ:
-

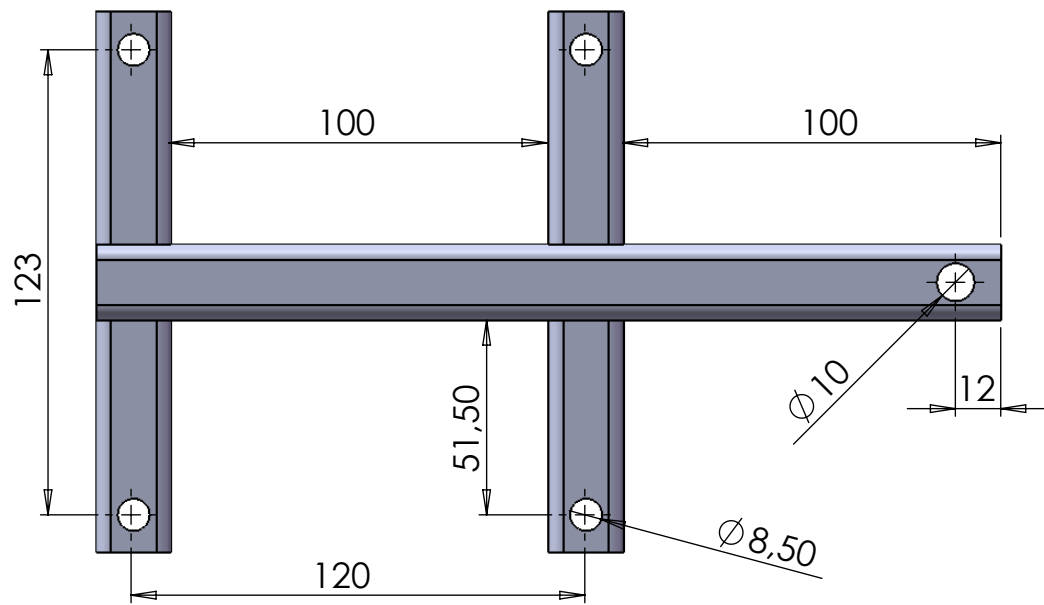
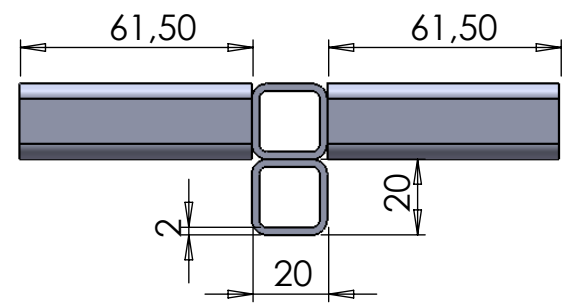
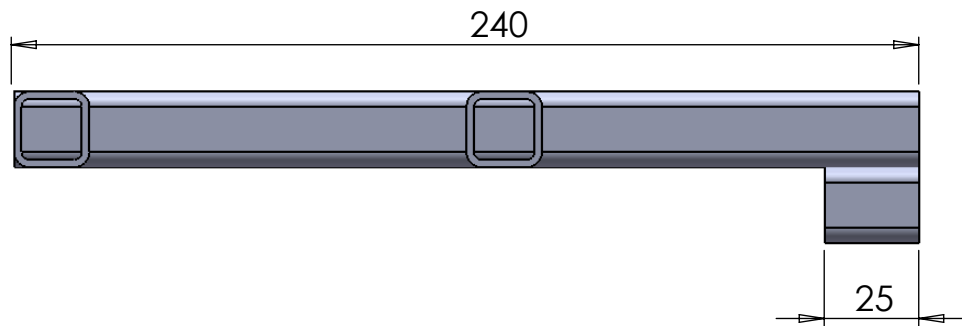
ΒΑΡΟΣ:
~650g

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:
15/07/09

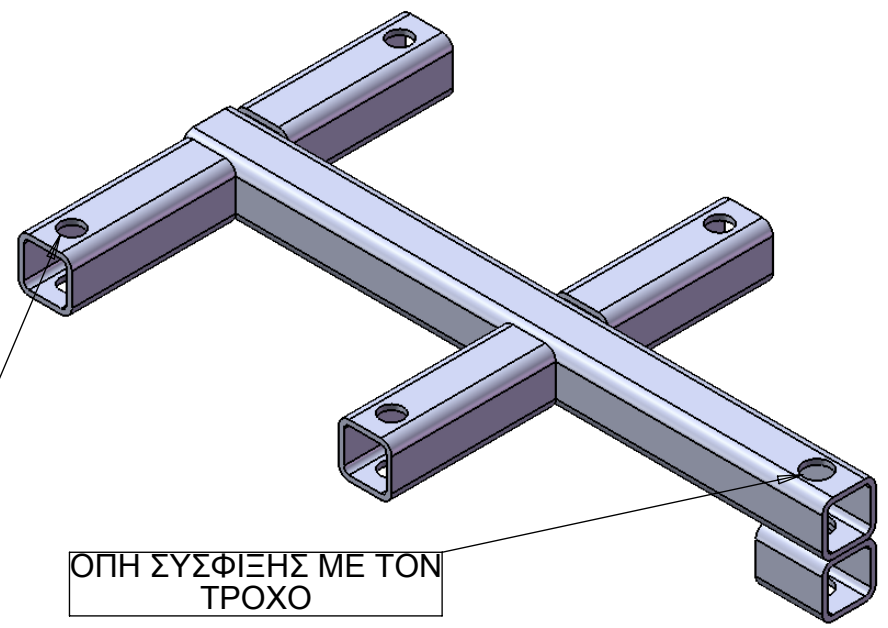
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΣΧΕΔΙΟ

ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΦΟΡ-01



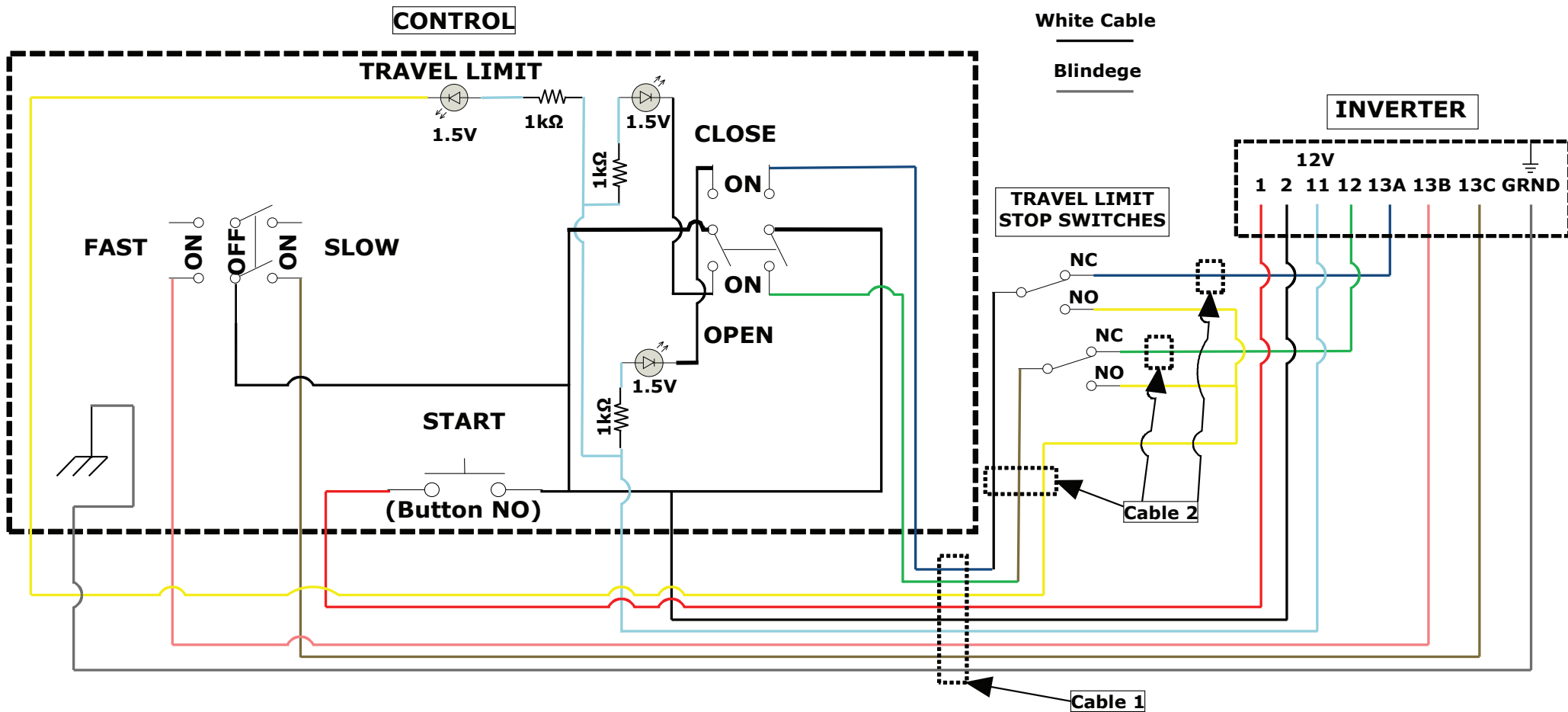
ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΟΨΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ



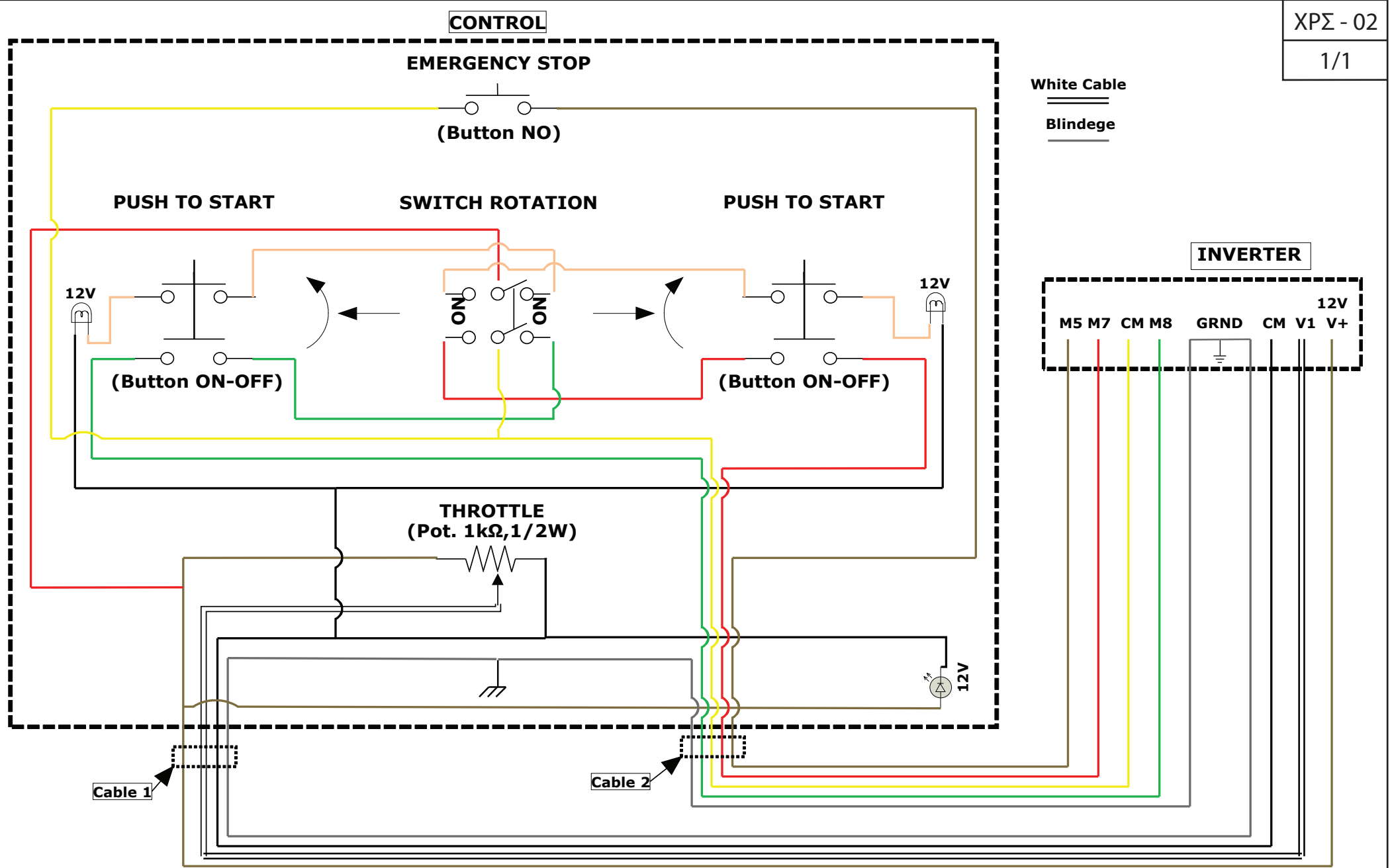
ΟΠΕΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ ΜΕ ΦΟΡΕΙΟ ΚΟΠΤΙΚΟΥ

ΟΠΗ ΣΥΣΦΙΞΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΧΟ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΣΥΓΚΡΑΤΗΤΗΣ ΤΡΟΧΟΥ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	ΥΛΙΚΟ: ΣΤΡΑΝΤΖΑΡΙΣΤΟ 20x20x2	ΒΑΡΟΣ: ~200g	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 15/07/09
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΣΥΓ-01		



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΡΑΓΓΑΛΙΣΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 09/03/2010
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: ΧΡΣ - 01



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ	ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ 3Φ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΗΣ 1ης ΠΤΕΡΩΤΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 09/03/2010
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	ΟΝΟΜΑ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΑΜΠΑΤΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΟΥ: XPΣ - 02