



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**“ΧΑΡΑΞΗ ΧΑΡΤΗ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΜΕΣΩ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ”**

ΟΝΟΜΑ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ:

Φατιόν Α. Μουράτι

ΑΜ: 13014

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Γ. Κουμπογιάννης

Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός

Αθήνα, Μάρτιος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**“ΧΑΡΑΞΗ ΧΑΡΤΗ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΜΕΣΩ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ”**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του
Εισηγητή**

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Αντώνιος Χατζηαποστόλου	Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Ναυπηγών Μηχ/κών ΠΑΔΑ	
2	Γεώργιος Λιβανός	Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Ναυπηγών Μηχ/κών ΠΑΔΑ	
3	Δημήτριος Κουμπογιάννης	Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Ναυπηγών Μηχ/κών ΠΑΔΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μουράτι Φατιόν του Αγκρόν, με αριθμό μητρώου 13014 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

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

Ο/Η Δηλών



Μουράτι Φατιόν

Ευχαριστίες

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, Δρ. Δημήτριο Γ. Κουμπογιάννη, για τη συνεργασία, την καθοδήγηση και την πολύτιμη συμβολή του στην ολοκλήρωσή της.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για την στήριξη, όχι μόνο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά σε όλα τα στάδια της ζωής μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περιεχόμενα.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Ιστορική Αναδρομή	8
1.2 Ταξινόμηση Ρευστοδυναμικών Μηχανών	10
Στρόβιλοι.....	10
Αντλίες.....	10
Συμπιεστές - ανεμιστήρες	12
Εφαρμογές συμπιεστών στο πλοίο.....	14
Χρήση Turbocharger και Supercharger	17
1.3 Φυγοκεντρικός Συμπιεστής.....	20
Εξαρτήματα απλής διάταξης φυγοκεντρικού συμπιεστή	21
Λειτουργία φυγοκεντρικού συμπιεστή	25
Πάλμωση, περιστροφική αποκόλληση και Στραγγαλισμός	26
Κεφάλαιο 2: ΧΑΡΤΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ	31
Κεφάλαιο 3: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟ.....	34
Επισκόπηση	35
Συμπιεστής.....	38
Τεχνικές Προδιαγραφές.....	42
Κεφάλαιο 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	43
Σκοπός.....	43
Μεθοδολογία	43
Μαθηματικές σχέσεις και μεγέθη.....	43
Μετρήσεις και Διαγράμματα	47
Κεφάλαιο 5: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ	77
Πρώτη Προσέγγιση	77
Βελτιστοποίηση.....	86
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	100

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αρχικά, γίνεται αναφορά στα είδη των ρευστοδυναμικών μηχανών, καθώς επίσης και σε ναυτικές εφαρμογές, στη συνέχεια, η εργασία εστιάζεται στον φυγοκεντρικό συμπιεστή, τις εφαρμογές του και τα φαινόμενα αστάθειας.

Στη συνέχεια, εξηγείται η θεωρητική καμπύλη λειτουργίας του φυγοκεντρικού συμπιεστή και της τεχνολογίας που εφαρμόζεται ώστε να χαραχθεί αυτή.

Έπειτα, αναφέρεται η εργαστηριακή διάταξη του συμπιεστή καθώς επίσης και η πειραματική διαδικασία.

Μετά τις μετρήσεις και τους κατάλληλους υπολογισμούς, χαράσσεται ο χάρτης απόδοσης του συμπιεστή και γίνεται προσέγγιση των αποτελεσμάτων με μαθηματικές σχέσεις, ώστε να αποφευχθεί η διαδικασία του πειράματος εκ νέου.

ABSTRACT

At first, reference is made to the types of fluid dynamics machines, as well as in marine applications, in the process we focus on the centrifugal compressor, its applications and the instability phenomena.

Then, we explain the theoretical operation curve of the centrifugal compressor and the technology behind that.

Afterward, we describe the laboratory set-up of the compressor and the experimental procedure.

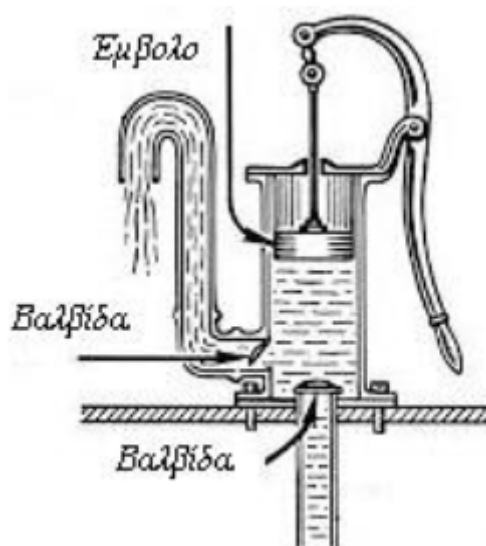
We conclude with the measurements and the appropriate calculations in order to curve the performance map of the compressor. As the final step, we try to approach all the data with mathematical relations, in order to avoid redoing the experimental procedure.

Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Οι ρευστοδυναμικές μηχανές, δηλαδή οι **αντλίες**, οι **συμπιεστές** και οι **στρόβιλοι** (υδροστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι, αεριοστρόβιλοι) πήραν τη σημερινή τους μορφή μετά από πολύχρονες προσπάθειες βελτίωσης του σχεδιασμού τους. Η ανάπτυξη των μηχανών αυτών, όπως άλλωστε όλων των μηχανών, συμβαδίζει με τις ανάγκες της κοινωνίας των ανθρώπων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών, των μεθόδων κατεργασίας και των εργαλειομηχανών.

Οι εμβολοφόρες αντλίες χρησιμοποιήθηκαν από τους αρχαίους Αιγυπτίους και Έλληνες, και είχαν μακρόχρονη παρουσία στην καθημερινή ζωή μέχρι να αναπτυχθούν οι περιστροφικές ρευστοδυναμικές μηχανές. Οι περιστροφικές ρευστοδυναμικές μηχανές εμφανίζονται τον 17ο αιώνα. Ο Γάλλος εφευρέτης, φυσικός Denis Papin (1674-1714) θεωρείται ο πατέρας των φυγοκεντρικών αντλιών και ανεμιστήρων. Ο ίδιος εφευρέτης κατασκεύασε πρότυπα φυγοκεντρικών αντλιών με περίβλημα και πτερωτές (στροφεία) με δύο ακτινικά πτερύγια, αρχικά, και περισσότερα στη συνέχεια. Οι μηχανές αυτές είχαν σημαντικά λειτουργικά προβλήματα διότι δεν υπήρχε στεγανοποίηση του εσωτερικού του περιβλήματος και η είσοδος του ατμοσφαιρικού αέρα εμπόδιζε την ανάπτυξη υπερπίεσης στην έξοδο του νερού από το στροφείο. Επίσης, επειδή η ανάπτυξη των κινητήριων μηχανών (ηλεκτροκινητήρες, μηχανές εσωτερικής καύσης) και των εδράνων ολίσθησης έγινε μεταγενέστερα, οι πρώτοι αυτοί σχεδιασμοί πτερωτών δεν μπορούσαν να περιστρέφονται με τις επιθυμητές μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Η προσπάθεια συνεχίζεται πιο έντονα, καθώς παράλληλα αναπτύσσονται και οι κινητήριες μηχανές.



Εικόνα 1.1. Παλαιά εμβολοφόρος αντλία

Ο J. Skeys παρουσίασε το 1875 την πρώτη αντλία αξονικής ροής με πτερωτή τύπου έλικα. Το σπειροειδές περίβλημα γύρω από τη φυγοκεντρική πτερωτή εισάγεται αργότερα (1840) από τον W.D. Andrews. Περί τα τέλη του 19^{ου} αιώνα αρχίζει η βιομηχανική παραγωγή φυγοκεντρικών αντλιών, με την ίδρυση μεγάλων μονάδων κατασκευής ρευστοδυναμικών μηχανών, μερικές από τις οποίες έχουν παρουσία και στη σύγχρονη εποχή.



Εικόνα 1.2. Παλαιά φυγοκεντρική αντλία

Όσον αφορά τους συμπιεστές, η άφιξή τους χρονολογείται χιλιάδες χρόνια πριν, περί το 1500 π.Χ. και τη δημιουργία φουσερών/φουσητήρων που σαν σκοπό είχαν την επίτευξη φλογών υψηλότερης θερμοκρασίας. Αργότερα, το 1776 ο Wilkinson εφηύρε τη πρώτη μηχανή που θεωρείται το πρότυπο των αεροσυμπιεστών.

Μέχρι το 1800, οι άνθρωποι είχαν αρχίσει να χρησιμοποιούν τους συμπιεστές για τη μετάδοση ενέργειας. Ο Αυστριακός μηχανικός Viktor Popp δημιούργησε τη πρώτη μονάδα συμπιεστή στο Παρίσι το 1888. Περισσότερες εφευρέσεις και βελτιώσεις στους αεροσυμπιεστές συνέχιζαν να γίνονται, και σύντομα ενσωματώθηκε η ηλεκτρική και πνευματική ενέργεια.

Σήμερα, υπάρχουν πολλοί τύποι σύγχρονων αεροσυμπιεστών. Συστήματα συμπιεσμένου αέρα προσφέρουν τεράστια γραμμή παραγωγής, συμπεριλαμβανομένου, παλινδρομικής κίνησης, λίπανσης, εφαρμογής σε οχήματα και άλλα είδη συμπιεστών ανάλογα τις απαιτήσεις.

1.2 Ταξινόμηση Ρευστοδυναμικών Μηχανών

Στρόβιλοι

Οι στρόβιλοι (turbines), λαμβάνουν ενέργεια ανά μονάδα βάρους προσερχόμενου ρευστού, την οποία και μετατρέπουν σε ωφέλιμο έργο. Στόχο, φυσικά, των στροβίλων αποτελεί η μέγιστη μεταφορά ενέργειας από το ρευστό.

Η πιο απλή μορφή στροβίλου είναι μια σύνθεση στροφείου, όπου σε έναν άξονα, ή ένα τύμπανο, προσαρμόζονται πτερύγια. Το ρευστό επιδρά στα πτερύγια και αυτά, αντιδρώντας στη ροή, περιστρέφουν το στροφείο. Απλά παραδείγματα στροβίλων είναι οι ανεμόμυλοι και οι νερόμυλοι.

Ανάλογα με το εργαζόμενο ρευστό, διακρίνονται τέσσερις βασικοί τύποι στροβίλων:

- Υδροστρόβιλοι (π.χ. νερόμυλοι, πιο σύγχρονοι υδροστρόβιλοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας)
- Αεριοστρόβιλοι (π.χ. αεριοστρόβιλοι των αεροπορικών εφαρμογών, επίγειοι αεριοστρόβιλοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας)
- Ατμοστρόβιλοι (χρησιμοποιούνται κυρίως σε ατμοηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλεύοντας υδρατμό υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης)
- Ανεμοκινητήρες (π.χ. ανεμογεννήτριες)

Αντλίες - Ανεμιστήρες και Συμπιεστές

Αντλίες, ανεμιστήρες και συμπιεστές ονομάζονται ρευστοδυναμικές μηχανές με τις οποίες είναι δυνατό να προσφερθεί ενέργεια ανά μονάδα βάρους προσερχόμενου σε αυτές ρευστού. Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για να ανυψωθεί μία ποσότητα ρευστού ή να μεταφερθεί από ένα χώρο χαμηλής πίεσης σε άλλο υψηλής πίεσης ή να διατεθεί για να αντιμετωπισθούν οι υδραυλικές αντιστάσεις των δικτύων μεταφοράς. Αντλίες, ανεμιστήρες και συμπιεστές δημιουργούν πάντοτε θετική διαφορά πίεσης μεταξύ της εξόδου του ρευστού, που ωθείται από κινούμενο στέλεχος (στροφείο ή έμβολο), και της εισόδου του ρευστού, που προσέρχεται στο στέλεχος αυτό. Έχουν, δηλαδή, όμοια λειτουργική συμπεριφορά σε σχέση με το ρευστό με το οποίο αλληλοεπιδρούν.

Αντλίες

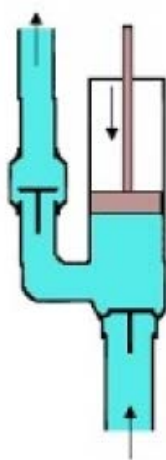
Ο όρος αντλία χρησιμοποιείται για μηχανές που αλληλοεπιδρούν με ρευστά σε υγρή μορφή.

Οι δυο βασικοί τύποι αντλιών είναι:

- 1) Οι αντλίες Θετικής Εκτόπισης (Positive displacement pumps) και
- 2) Οι Δυναμικές αντλίες (Rotodynamic pumps).

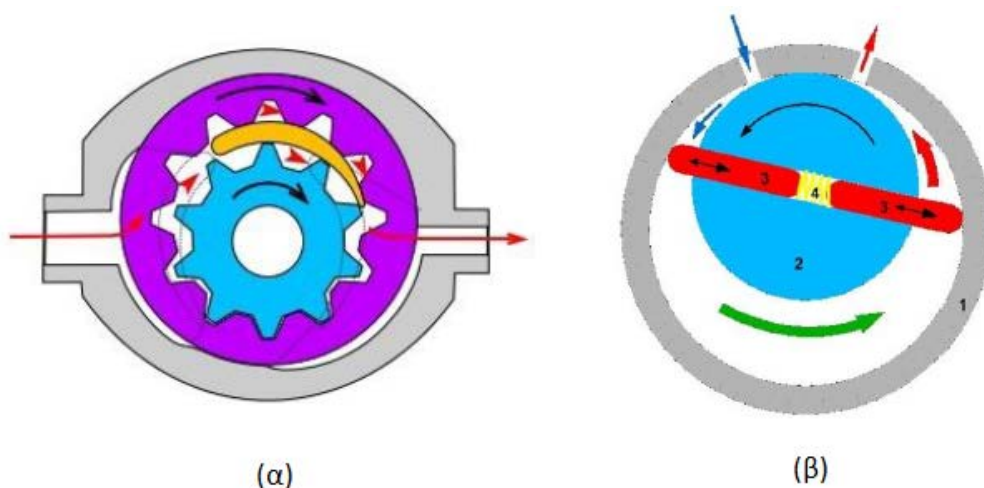
Οι αντλίες Θετικής Εκτόπισης διακρίνονται με τη σειρά τους σε:

- Παλινδρομικές αντλίες (Reciprocating pumps)



Εικόνα 1.3. Παλινδρομική αντλία

- Περιστροφικές αντλίες (Rotary pumps)



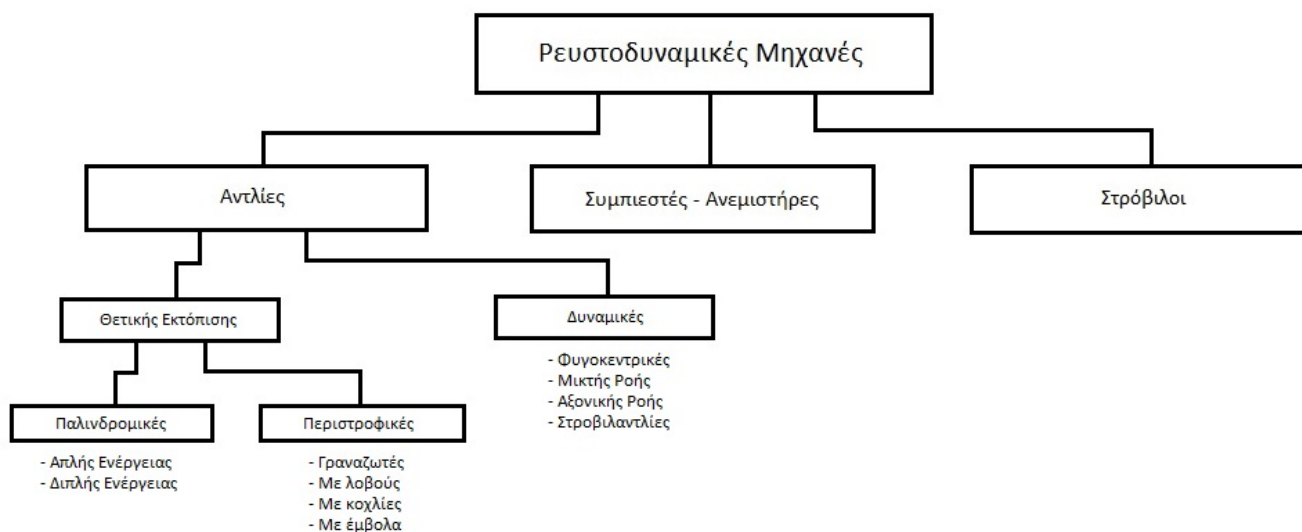
Εικόνα 1.4. Περιστροφική αντλία. (α) γραναζωτή, (β) με έμβολα

Οι παλινδρομικές αντλίες ταξινομούνται σε απλής ενέργειας και διπλής ενέργειας και οι περιστροφικές συνήθως σε γραναζωτές, με λοβούς, με κοχλίες και με έμβολα.

Ενώ οι Δυναμικές αντλίες ταξινομούνται ανάλογα με τη μορφή του στροφείου και της πτερύγωσης που φέρουν (τα δύο αυτά στοιχεία καθορίζουν τη διαδρομή του ρευστού μέσα στη μηχανή):

- Φυγοκεντρικές αντλίες ή αντλίες ακτινικής ροής (Centrifugal pumps)
- Μικτής ή διαγώνιας ροής (Mixed flow pumps)
- Αξονικής ροής (Axial flow pumps)
- Στροβιλαντλίες (Turbine pumps)

Παρακάτω συνοψίζονται οι βασικές κατηγορίες που αναφέρθηκαν έως τώρα:



Εικόνα 1.5: Κατηγορίες Αντλιών

Συμπιεστές - ανεμιστήρες

Οι αεροσυμπιεστές κατέχουν ένα σπουδαίο ρόλο στη βιομηχανία, καθώς προμηθεύουν με πεπιεσμένο αέρα διάφορες εφαρμογές, είτε όντας ως ανεξάρτητα τμήματα ή ακόμα και όταν είναι αναπόσπαστα μέρη ενός γενικότερου μηχανικού συνόλου (π.χ. αεριοστρόβιλος).

Όταν η ρευστοδυναμική μηχανή καλείται να δώσει ενέργεια ανά μονάδα βάρους προσερχομένου ρευστού στον αέρα του περιβάλλοντος, τότε ονομάζεται ανεμιστήρας, φυσητήρας ή συμπιεστής. Γενικά, συμπιεστής ορίζεται ως η μηχανική διάταξη η οποία αυξάνει τη πίεση του ρευστού μειώνοντας τον όγκο του.

Η αρχή λειτουργίας των ανεμιστήρων και των συμπιεστών δε διαφέρει από αυτή των αντλιών. Και οι δύο συσκευές αυξάνουν τη πίεση του ρευστού το οποίο τις διαρρέει και επίσης μπορούν να μεταφέρουν το εκάστοτε ρευστό μέσω σωληνώσεων. Ως γνωστόν τα αέρια είναι συμπιεστά άρα ο συμπιεστής μπορεί επίσης να μειώσει τον όγκο του αερίου σε αντίθεση με τα υγρά τα οποία είναι ασυμπίεστα άρα η κύρια λειτουργία μιας αντλίας είναι να αυξάνει τη πίεση τους και να τα μεταφέρει.

Υπάρχουν διάφορα είδη συμπιεστών τα οποία υπάρχουν στη βιομηχανία και επιλέγονται ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν. Ανάλογα με τη λειτουργία τους, οι αεροσυμπιεστές ταξινομούνται σε:

1) Θετικής Εκτόπισης

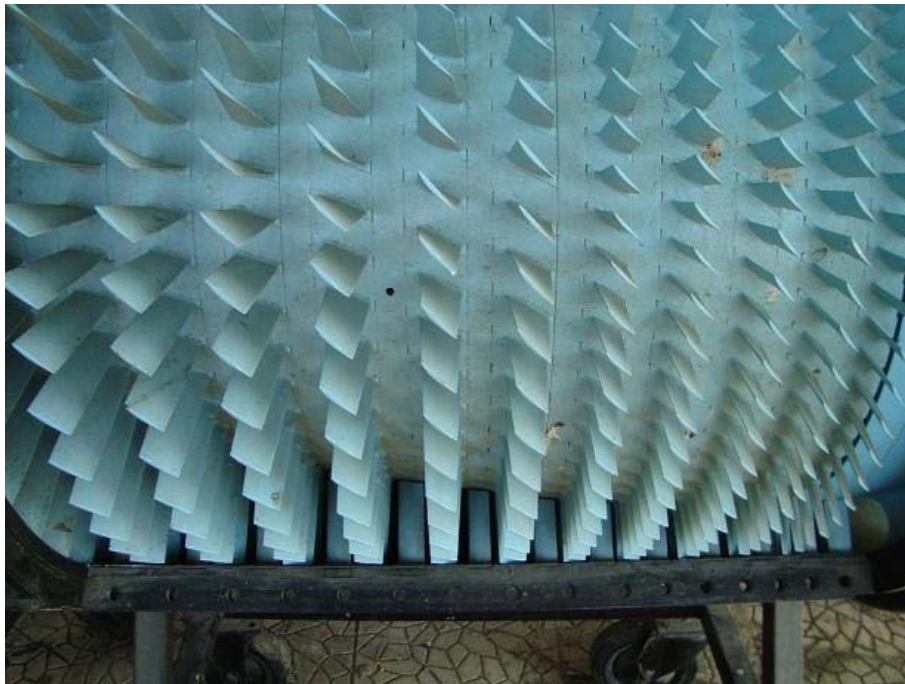
2) Δυναμικούς

Στους συμπιεστές Θετικής Εκτόπισης έχουμε δύο βασικά είδη:

- Παλινδρομικοί
- Περιστροφικοί

Οι παλινδρομικοί διακρίνονται σε απλής ενέργειας, διπλής ενέργειας και διαφράγματος και οι περιστροφικοί κυρίως σε λοβού, κοχλιωτοί και κύλισης.

Στους Δυναμικούς συμπιεστές θα δούμε τους Φυγοκεντρικούς και Αξονικούς.

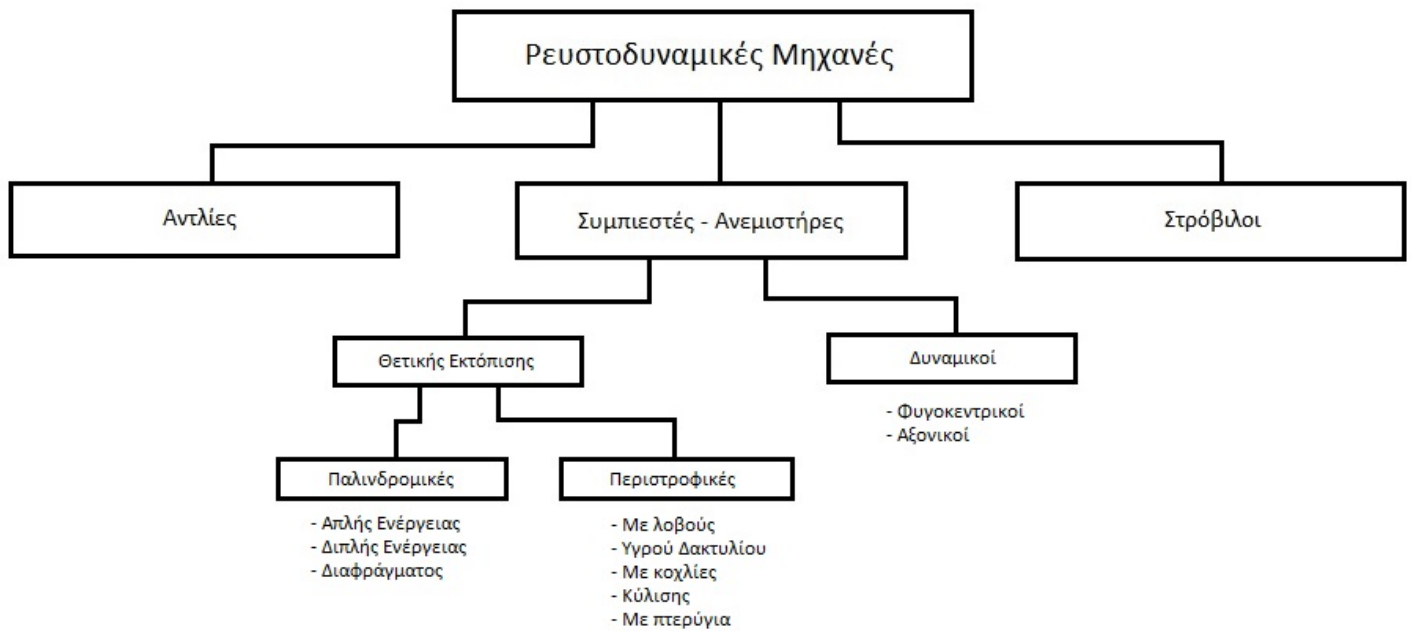


Εικόνα 1.6: Αξονικός συμπιεστής αεροπορικού κινητήρα



Εικόνα 1.7: Κοχλιωτός συμπιεστής

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται συγκεντρωμένοι οι βασικοί τύποι των συμπιεστών

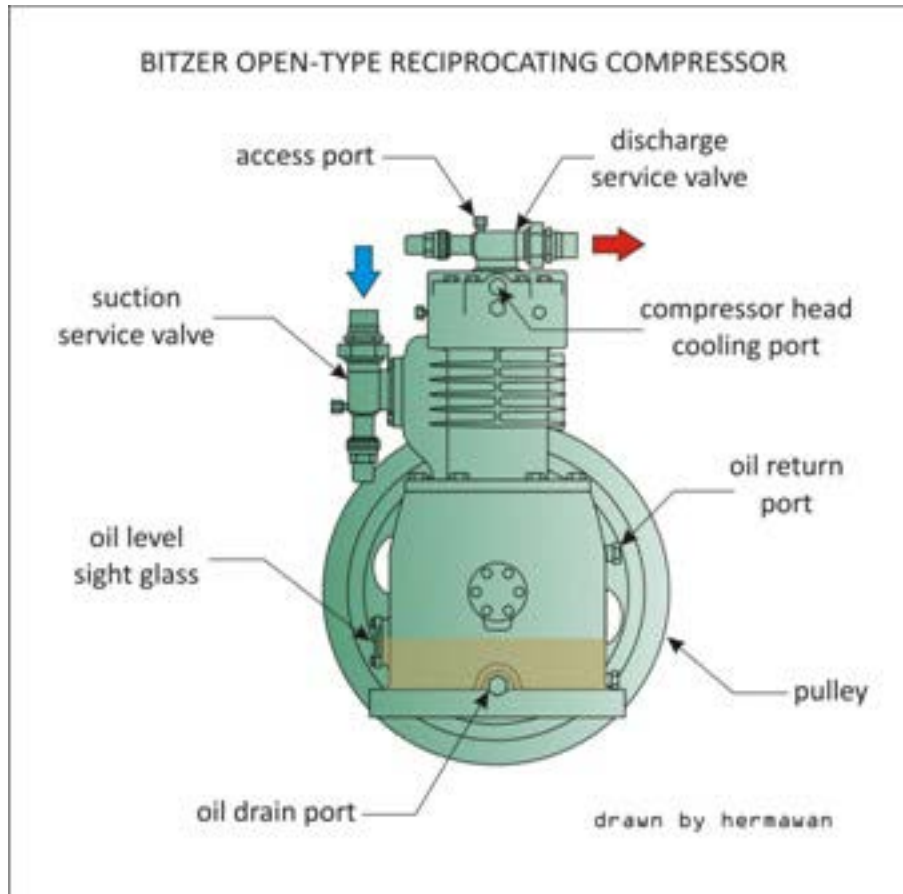


Εικόνα 1.8: Διάγραμμα Συμπιεστών - Ανεμιστήρων

Εφαρμογές συμπιεστών στο πλοίο

Συγκεκριμένα, οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι στον μηχανικό εξοπλισμό των πλοίων. Γενικότερα όμως, η χρήση συμπιεστών και αντλιών είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία των πλοίων.

Όσον αφορά τους συμπιεστές, η χρήση τους επικεντρώνεται στη συμπίεση ατμοσφαιρικού αέρα. Ο συμπιεσμένος αέρας στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα διάφορα πνευματικά συστήματα του πλοίου, και όχι μόνο. Να σημειωθεί ότι ο αέρας αυτός μπορεί να αποτελέσει την αφετηρία παραγωγής της απαραίτητης ενέργειας στο πλοίο. Οι δύο τύποι που συναντώνται πιο συχνά είναι οι εμβολοφόροι και οι κοχλιωτοί.

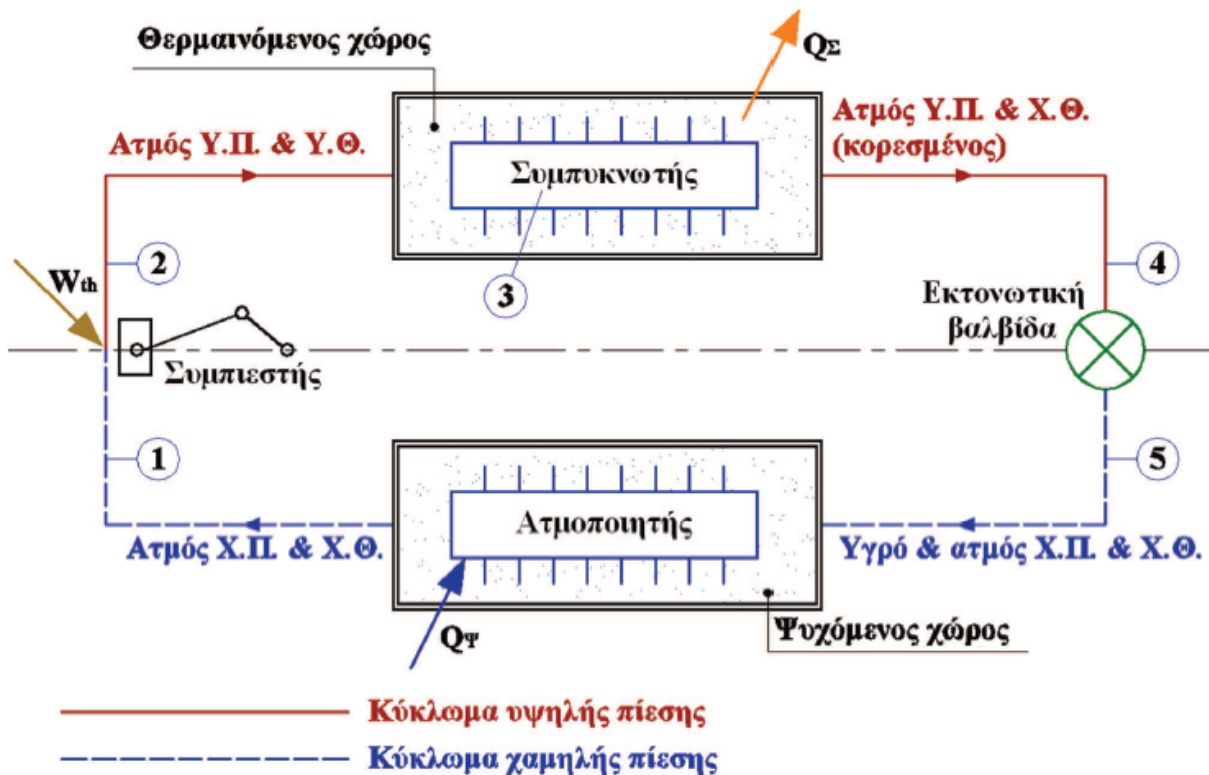


Εικόνα 1.9: Εμβολοφόρος συμπιεστής ανοιχτού τύπου



Εικόνα 1.10: Κοχλιωτός συμπιεστής

Άλλη χρήση είναι αυτή στα συστήματα ψύξης και κλιματισμού. Ως γνωστόν, ο συμπιεστής αποτελεί ένα από τα τέσσερα βασικά τμήματα στη διάταξη παραγωγής ψύξης (πιο συγκεκριμένα πραγματοποιεί τη συμπίεση του ψυκτικού μέσου – φρέον).



Εικόνα 1.11: Βασική διάταξη παραγωγής ψύξης

Παράλληλα, η εφαρμογή των αντλιών αποτελεί και αυτή αναπόσπαστο κομμάτι στη λειτουργία των πλοίων. Ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιείται, χωρίζουμε τη χρήση των αντλιών σε κατηγορίες:

- Θαλασσινό νερό (main cooling sea water pump)
- Γλυκό νερό (low temperature cooling fresh water pump)
- Λάδι (main engine lube oil pump)
- Πετρέλαιο (main engine fuel oil supply pump)

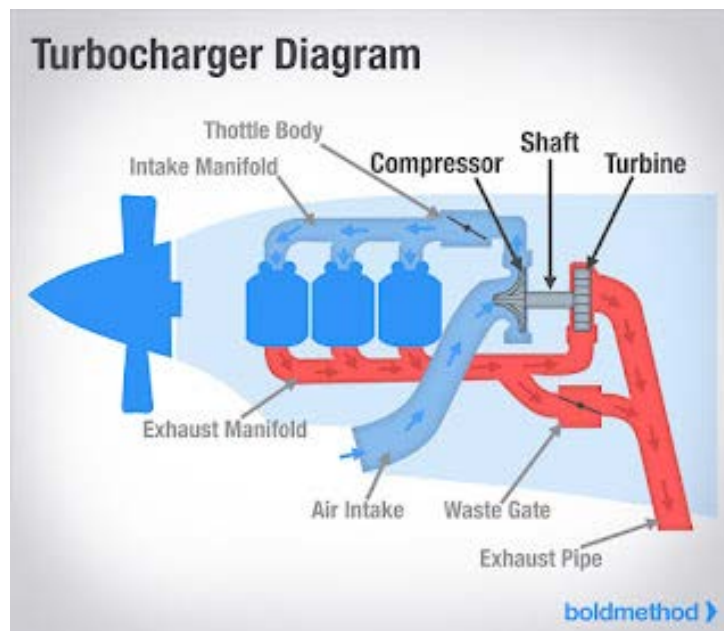
Εδώ οι πιο συνηθισμένοι τύποι είναι οι κοχλιωτές και οι φυγοκεντρικές αντλίες.

Χρήση Turbocharger και Supercharger

Η χρήση των turbocharger και των supercharger ολοένα και αυξάνεται στους εμβολοφόρους κινητήρες, κάνοντας έτσι τους απλούς ατμοσφαιρικούς κινητήρες πολύ πιο αποτελεσματικούς και αποδοτικούς, είτε μιλώντας για αυτοκίνητα είτε για αεροσκάφη.

Turbocharger

Αποτελείται από έναν άξονα, πάνω στον οποίο συνδέεται ένας συμπιεστής και μια τουρμπίνα. Υπάρχει και μια πύλη/πεταλούδα αποβλήτων/καυσαερίων, όπως λέγεται, η οποία ρυθμίζει τη παροχή και τη ταχύτητα των καυσαερίων, τα οποία δεν θα οδηγούνται στη τουρμπίνα αλλά απευθείας στην έξοδο. Ο συμπιεστής παρεμβάλλεται στη διαδρομή που κυκλοφορεί ο αέρας από την εισαγωγή προς το κινητήρα για να πραγματοποιηθεί καύση, ενώ η τουρμπίνα παρεμβάλλεται στη διαδρομή που ακολουθούν τα καυσαέρια που βγαίνουν από τη πολλαπλή προς την εξάτμιση του κινητήρα.



Εικόνα 1.12: Διάγραμμα Turbocharger

Αρχή λειτουργίας:

Ο αέρας από την εισαγωγή, καθώς πηγαίνει προς τον κινητήρα περιστρέφει -με ελάχιστες στροφές- τον συμπιεστή. Ένα μέρος των παραγόμενων καυσαερίων, έχοντας αυξημένη θερμοκρασία και πίεση, περιστρέφουν τη τουρμπίνα, η οποία αποκτώντας τώρα περισσότερες στροφές, περιστρέφει ακόμα πιο γρήγορα το συμπιεστή. Η κίνηση του συμπιεστή προέρχεται κυρίως από την τουρμπίνα. Επίσης, να σημειώσουμε ότι κατά την εκκίνηση, υπάρχει ένας ελάχιστος (νεκρός χρόνος) στον οποίο δεν υπάρχουν τα απαιτούμενα καυσαέρια για να περιστρέψουν τη τουρμπίνα και με τη σειρά της αυτή, τον συμπιεστή και έτσι εμφανίζεται μια καθυστέρηση στην απόδοση.

Πλεονεκτήματα σε σύγκριση με έναν supercharger:

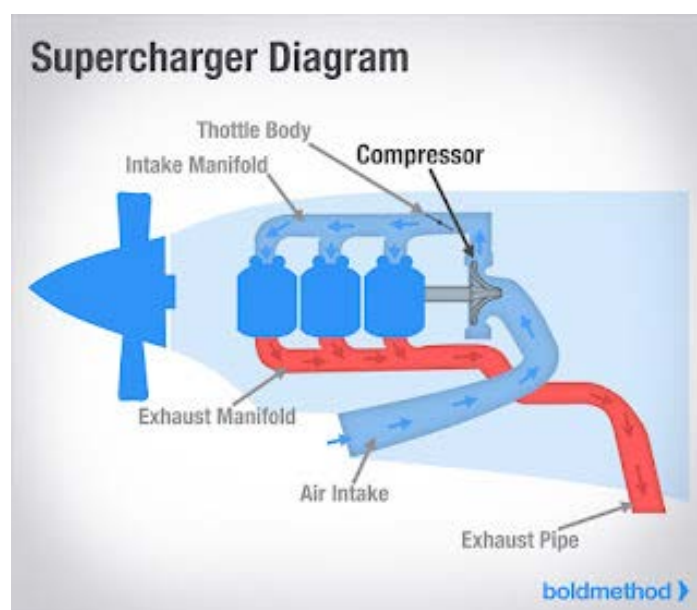
- a) πιο αποτελεσματικός, αφού παίρνει κίνηση από τα παραγόμενα καυσαέρια του κινητήρα, τα οποία δεν εκμεταλλεύονται πριν ο κινητήρας.
- b) μικρότερη κατανάλωση καυσίμου
- c) μικρότερο βάρος εγκατάστασης
- d) καλύτερη συνολική αύξηση της υποδύναμης, λόγω της ρύθμισης από την πύλη καυσαερίων

Μειονεκτήματα:

- a) καθυστέρηση στην απόδοση στην εκκίνηση, λόγω νεκρού χρόνου
- b) ελάχιστο έως καθόλου όφελος στη λειτουργία 'ρελαντί', λόγω των μικρών ρυθμίσεων ισχύος στη φάση αυτή
- c) ύπαρξη -ιδίως στους παλιότερους turbocharger- του φαινομένου 'power surge (=κύμα δύναμης)', το οποίο συμβαίνει όταν μειώνουμε απότομα την ισχύ του κινητήρα και ο αέρας συσσωρευμένος στη πολλαπλή εισαγωγής, προκαλεί αναστροφή ροής και κραδασμούς.

Supercharger

Αποτελείται από έναν άξονα και έναν συμπιεστή. Δηλαδή, δεν υπάρχει τουρμπίνα. Η περιστροφή του συμπιεστή γίνεται μέσω ιμάντα ή αλυσίδας/καδένα που συνδέεται με τον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα και έτσι παίρνει κίνηση. Αυτή, είναι και η βασική του διαφορά με τον turbocharger.



Εικόνα 1.13: Διάγραμμα Supercharger

Αρχή λειτουργίας:

Ο αέρας, απο την εισαγωγή, καθώς πηγαίνει προς τον κινητήρα περιστρέφει -με ελάχιστες στροφές- τον συμπιεστή. Μετά τη καύση και την εκτόνωση, η δύναμη περιστροφής που ασκείται στον στροφαλοφόρο, ουσιαστικά περιστρέφει -εκτός απο τον έλικα/προπέλα- και τον άξονα του supercharger. Έτσι αυξάνονται οι στροφές του συμπιεστή. Η κίνηση του συμπιεστή προέρχεται απο την περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα.

Πλεονεκτήματα σε σύγκριση με έναν turbocharger:

- a) δεν παρουσιάζουν καμιά καθυστέρηση ούτε στην εκκίνηση ούτε κατά τη πτήση
- b) ενισχύουν το κινητήρα και στις πολύ χαμηλές στροφές, κάτι που δεν γίνεται με τους turbochargers
- c) είναι φθηνοί στη κατασκευή
- d) εξασφαλίζουν μια 'μηχανολογική απλότητα', αφού η χρήση turbocharger απαιτεί επανασχεδίαση του τμήματος εισαγωγής και εξάτμισης, ρύθμιση της πίεσης εισαγωγής αέρα, ρύθμιση του συστήματος ψύξης για περισσότερη ψύξη λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας, κτλ.

Μειονεκτήματα:

- a) έχουν γενικά χαμηλή απόδοση, αφού 'κόβουν' ισχύ απο το στροφαλοφόρο για να εξασφαλίσουν τη κίνησή τους. Αυτή η εξάρτησή τους απο τον στροφαλοφόρο, είναι το σημαντικό τους μειονέκτημα.
- b) έχουν αυξημένη συντήρηση, λόγω τροχαλιών, γραναζιών, κτλ.
- c) μεγαλύτερη πιθανότητα ύπαρξης ζημιάς, αφού χρησιμοποιούν περισσότερα κινούμενα εξαρτήματα
- d) έχουν αυξημένη κατανάλωση

Η ύπαρξη του supercharger, ξεκίνησε χρόνια πριν, ιδίως στη περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Η χρήση τους, αύξησε την απόδοση των αεροσκαφών και όποιος τη διέθετε υπερείχε έναντι του αντιπάλου. Σε συνδυασμό με την έλλειψη υψηλής αντοχής μετάλλων, που θα μπορούσαν να αντέξουν την υψηλή θερμοκρασία που παράγουν οι turbochargers, ήταν ένας λόγος που καθυστέρησε τη χρήση τους. Επίσης, το καύσιμο τότε ήταν αρκετά πιο οικονομικό, οπότε δεν τους περιόριζε σε κάτι η αυξημένη κατανάλωση των superchargers.

Παρ' όλα αυτά οι καιροί άλλαξαν. Η τεχνολογία προχώρησε και έτσι φτάσαμε στο σήμερα, να έχουμε μια πληθώρα μετάλλων και κραμάτων για κάθε συνθήκη και να μας ενδιαφέρει αρκετά η οικονομία καυσίμου και η μείωση του βάρους στις αεροπορικές κατασκευές μας. Έτσι, η χρήση των turbochargers, θεωρήθηκε πλέον η πιο κατάλληλη και αποτελεί νούμερο ένα επιλογή για τους σημερινούς κατασκευαστές.

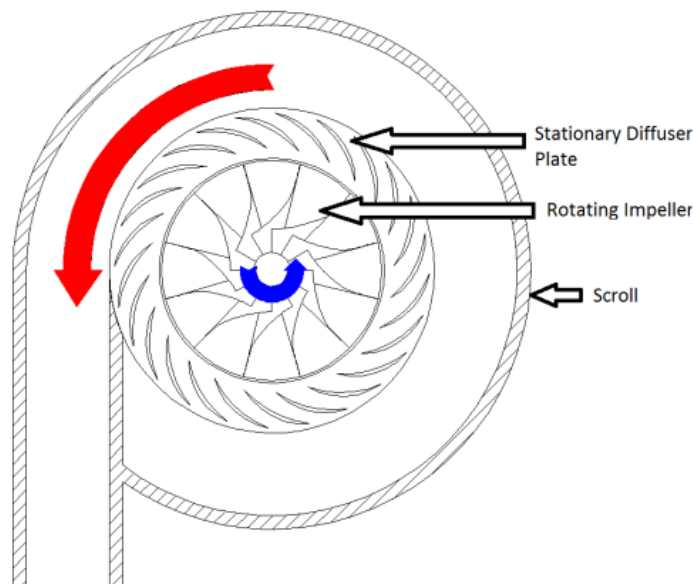
1.3 Φυγοκεντρικός Συμπιεστής

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής είναι ένας δυναμικός συμπιεστής ο οποίος βασίζεται στη μεταφορά ενέργειας από μια συστοιχία περιστρεφόμενων πτερυγίων προς τον αέρα.

Στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές ο αέρας εισέρχεται με διεύθυνση παράλληλη στον άξονα περιστροφής του δρομέα, δηλαδή αξονικά, αλλά λόγω του σχεδιασμού των πτερυγίων του ρότορα αλλά και του διαχύτη ο αέρας εξέρχεται με γωνία 90° , δηλαδή ακριβώς κάθετα από τον άξονα περιστροφής του δρομέα.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές αποβάλλουν αέριο σε υψηλή πίεση μετατρέποντας τη γωνία της ροής μέσω των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η διαδικασία αποδοτικά, οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές περιστρέφονται σε υψηλότερες ταχύτητες σε σχέση με άλλους τύπους συμπιεστών. Αυτού του είδους οι συμπιεστές είναι σχεδιασμένοι για υψηλότερη αντοχή καθώς η ροή μέσα από το συμπιεστή είναι συνεχής. Ρυθμίζοντας τα οδηγητικά πτερύγια στην εισαγωγή είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος να ελεγχθεί η παροχή σε ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή. Η λίπανση του συμπιεστή γίνεται σε ξεχωριστό χώρο ο οποίος είναι στεγανοποιημένος ώστε να αποφεύγεται τυχόν ανάμειξη με τον αέρα που συμπιέζεται.

Οι εν λόγω συμπιεστές (ή αλλιώς ακτινικοί), είναι υποκατηγορία των δυναμικών στροβιλομηχανών απορρόφησης έργου. Μια εξιδανικευμένη άποψη είναι ότι οι δυναμικές στροβιλομηχανές συμπίεσης επιτυγχάνουν αύξηση της πίεσης του ρευστού προσδίδοντας κινητική ενέργεια (ταχύτητα) σε μια συνεχή ροή ρευστού διαμέσου του ρότορα και των στρεφόμενων πτερυγίων του. Στη συνέχεια η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε μια αύξηση της στατικής πίεσης επιβραδύνοντας τη ροή μέσω ενός διαχύτη ο οποίος στην ουσία μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε δυναμική.

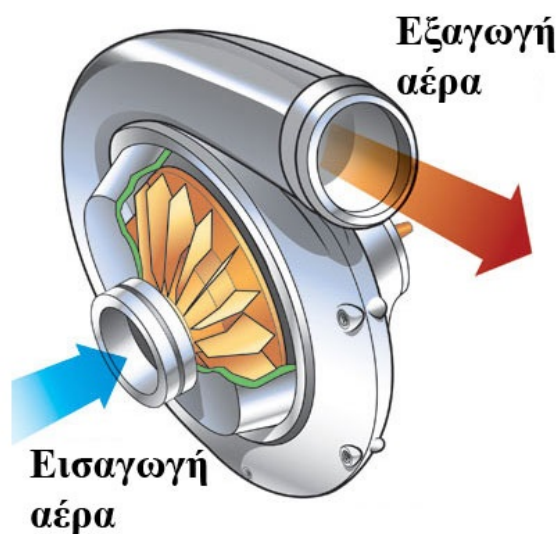


Εικόνα 1.14: Φυγοκεντρικός συμπιεστής με διαχύτη

Εξαρτήματα απλής διάταξης φυγοκεντρικού συμπιεστή

Μια απλή διάταξη φυγοκεντρικού συμπιεστή απαρτίζεται από τα ακόλουθα αναπόσπαστα μέρη: Εισαγωγή, Ρότορα με τα πτερύγια (impeller), Διαχύτη, και το Συλλέκτη. Αυτά είναι και τα τμήματα τα οποία συναντά το ρευστό στη διαδρομή του μέσα από το συμπιεστή. Πιο αναλυτικά το ρευστό (εργαζόμενο μέσο) εισέρχεται στο συμπιεστή αξονικά. Καθώς ο ρότορας περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα, έλκει το ρευστό στα πτερύγια του και στη συνέχεια το στρέφει μέσα από το κέλυφος του (από αξονικά σε ακτινικά περίπου 90°) και το καταθλίβει στο διαχύτη (ένα στενό πέρασμα από σταθερά πτερύγια/στάτορας) από όπου και το ρευστό αποκτά υψηλή ταχύτητα.

- Εισαγωγή
Η εισαγωγή ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή είναι τυπικά μια απλή σωλήνωση. Ενδέχεται να περιλαμβάνει διάφορα παρελκόμενα όπως μια βαλβίδα, βάνες και όργανα μέτρησης πίεσης και θερμοκρασίας. Όλες αυτές οι επιπρόσθετες διατάξεις είναι, σημαντικές για τον έλεγχο του φυγοκεντρικού συμπιεστή.



Εικόνα 1.15: Εισαγωγή και εξαγωγή αέρα

- Φτερωτή/Ρότορας

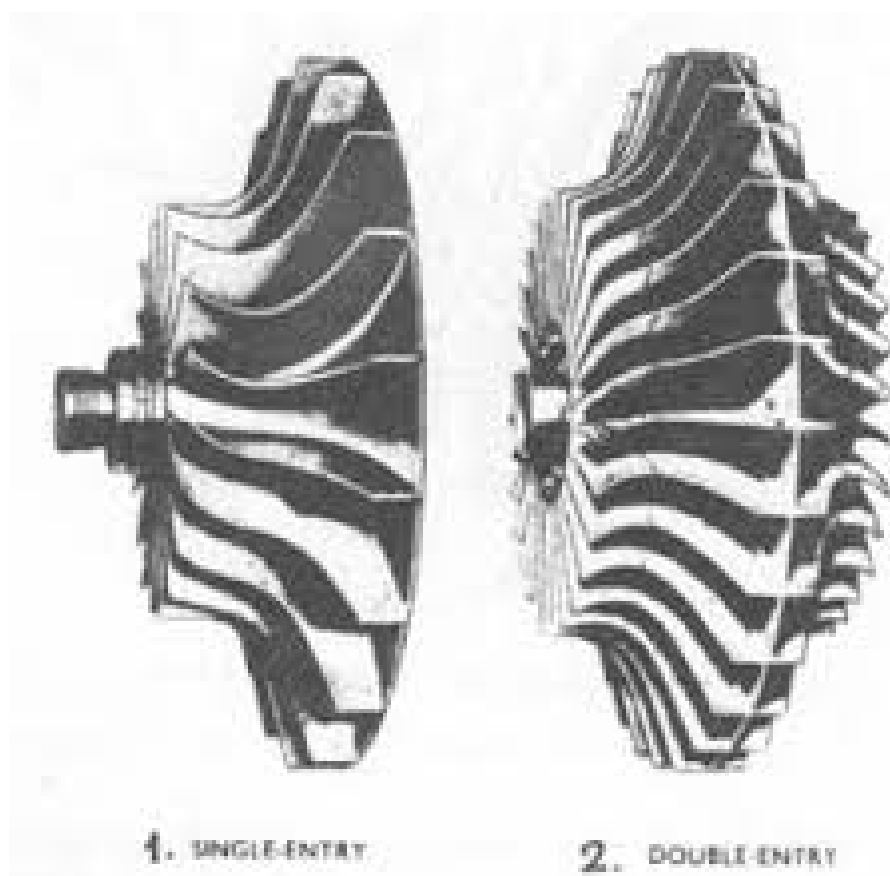
Το βασικό εξάρτημα το οποίο κάνει το συμπιεστή φυγοκεντρικό είναι η φτερωτή του. Ο ρότορας είναι στην ουσία το κινητό μέρος του φυγοκεντρικού συμπιεστή. Τα στρεφόμενα πτερύγια είναι αυτά που βαθμιαία αυξάνουν την ενέργεια του αερίου. Αυτό είναι πανομοιότυπο με έναν αξονικό συμπιεστή με την εξαίρεση ότι το αέριο μπορεί να φτάσει σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη και ταχύτητα διαμέσου μιας φυγοκεντρικής φτερωτής. Σε πολλούς μοντέρνους φυγοκεντρικούς συμπιεστές υψηλής απόδοσης το αέριο εξέρχεται της φτερωτής με την ταχύτητά του να είναι κοντά σε αυτή του ήχου.

Γενικά υπάρχουν 2 είδη φτερωτών - αξόνων στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές.

1. Μονής εισόδου. Σε αυτή τη περίπτωση οι φτερωτές φέρουν ακτινικά πτερύγια στην μία τους πλευρά.

2. Διπλής εισόδου. Σε αυτήν τη περίπτωση οι φτερωτές φέρουν πτερύγια και στις δύο πλευρές.

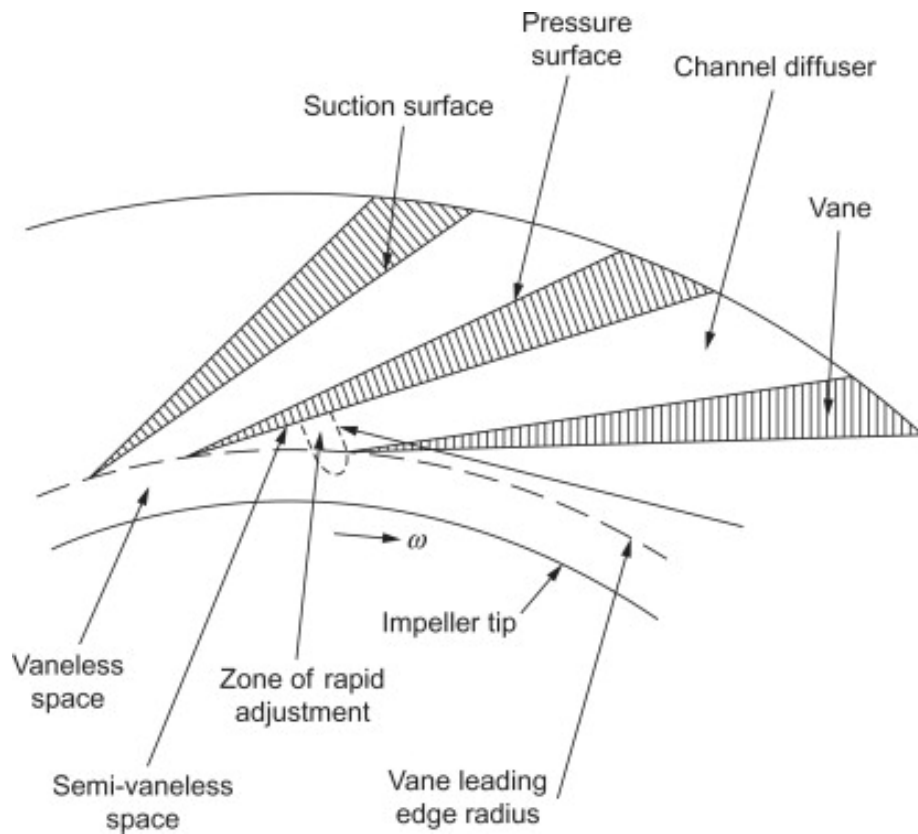
Η διαφορά των δύο αυτών ειδών διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.16: Φτερωτή μονής και διπλής εισόδου

- Διαχύτης

Το επόμενο βασικό εξάρτημα σε μια απλή διάταξη ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή είναι ο διαχύτης. Είναι το ακίνητο μέρος του φυγοκεντρικού συμπιεστή. Ο διαχύτης αποτελεί το περίβλημα της φτερωτής του ρότορα. Στο εσωτερικό του υπάρχουν οδηγητικά σταθερά πτερύγια τα οποία είναι εφαπτομενικά τοποθετημένα έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε δυναμική που έχει σαν αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της πίεσης. Ρόλος του διαχύτη είναι να μετατρέψει την κινητική ενέργεια (υψηλή ταχύτητα) σε πίεση μειώνοντας σταδιακά τη ταχύτητα του αερίου. Παρακάτω διακρίνονται τα πτερύγια του διαχύτη (diffuser vanes), το διάκενο μεταξύ φτερωτής και διαχύτη καθώς και η ροή του αέρα μέσα απο τα οδηγητικά πτερύγια του διαχύτη.

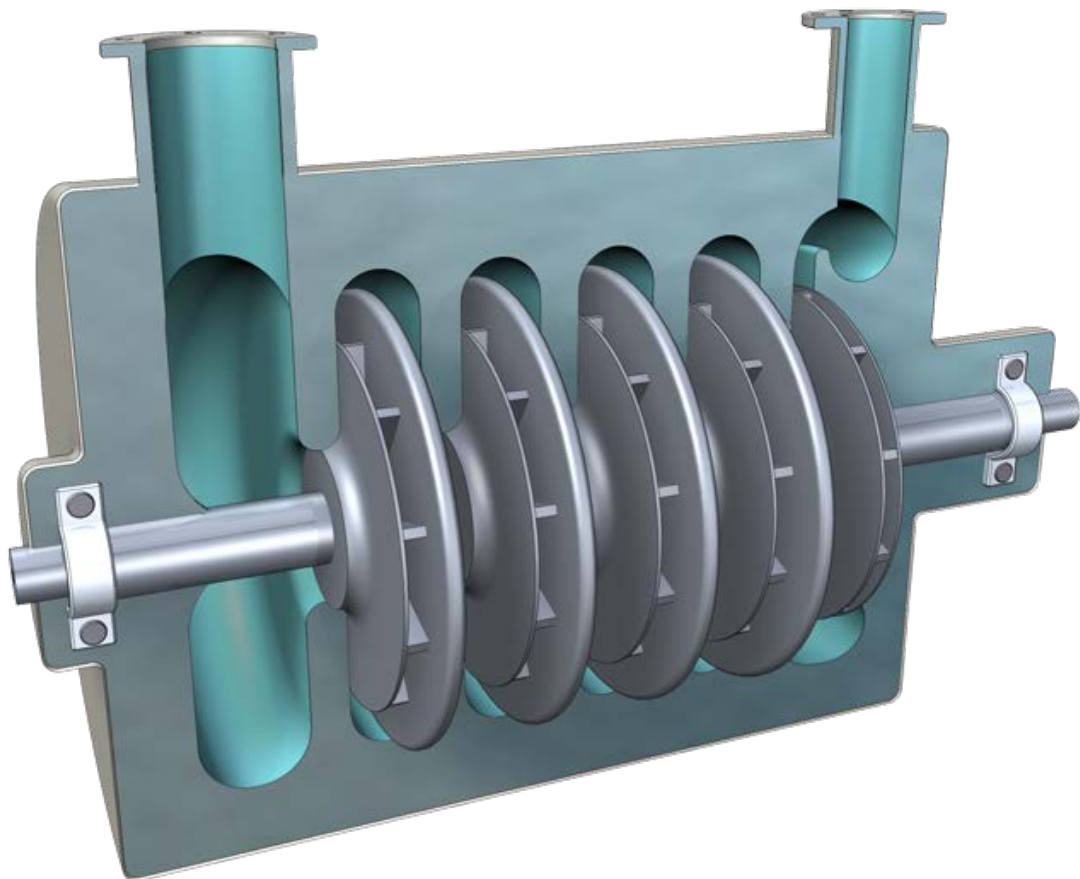


Εικόνα 1.17: Διαχύτης

- Συλλέκτης

Ο συλλέκτης μπορεί να βρίσκεται σε διάφορες μορφές και σχήματα. Σκοπός του είναι να λαμβάνει τη ροή απο το διαχύτη και να τη διαμοιράζει στο σωλήνα της κατάθλιψης. Ο συλλέκτης ή ο σωλήνας μπορεί να φέρουν βαλβίδες και όργανα μέτρησης που εξυπηρετούν στον έλεγχο του συμπιεστή.

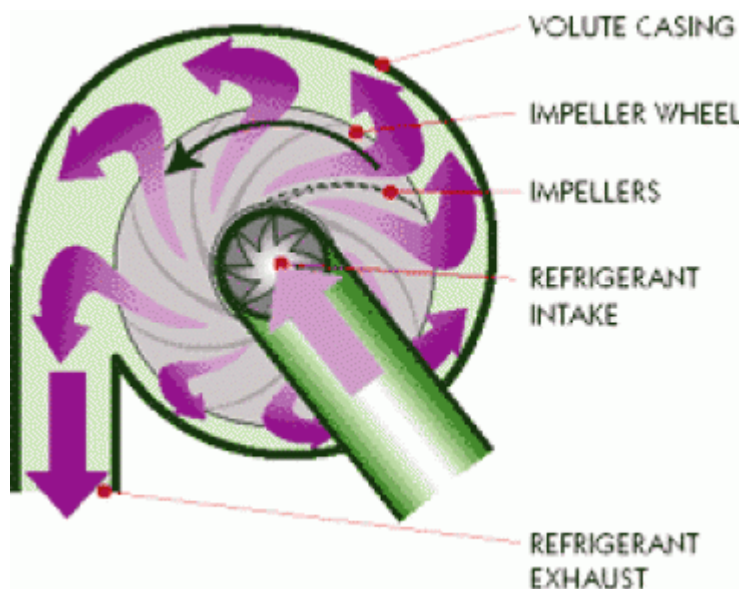
Ένας συμπιεστής, ανάλογα με το πόσες συστοιχίες ρότορα – στάτορα (βαθμίδες) έχει, διακρίνεται σε μονοβάθμιο και πολυβάθμιο. Σκόπος των πολυβάθμιων είναι η επίτευξη υψηλότερων πιέσεων στην έξοδο.



Εικόνα 1.18: Πολυβάθμιος φυγοκεντρικός συμπιεστής

Λειτουργία φυγοκεντρικού συμπιεστή

Με τη χρήση ηλεκτρικής ισχύος επιτυγχάνουμε την περιστροφή του δρομέα της ηλεκτρικής μηχανής ο οποίος είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με το δρομέα του φυγοκεντρικού συμπιεστή. Ο δρομέας του συμπιεστή ο οποίος φέρει και τα ακτινικά πτερύγια στην περιφέρεια του, αρχίζει και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με αριθμό στροφών τον οποίο εμείς έχουμε επιλέξει σύμφωνα με τις ανάγκες μας. Η περιστροφή των πτερυγίων του συμπιεστή προκαλεί αρνητική πίεση στην είσοδο του συμπιεστή με αποτέλεσμα να αρχίσει να εισέρχεται αέρας σε ατμοσφαιρική πίεση. Ο αέρας καθώς εισέρχεται στο συμπιεστή προσκρούει στον ρότορα (ο οποίος περιστρέφεται με σχετικά μεγάλο αριθμό στροφών) όπου εκεί αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η κινητική του ενέργεια λόγω της περιστροφής των πτερυγίων. Σε αυτό το σημείο ο αέρας λόγω του σχηματισμού των πτερυγίων αποκτά φυγοκεντρικές δυνάμεις έτσι ώστε να τείνει να διαφύγει προς την εξωτερική περιφέρεια, δηλαδή αποκτά ακτινική διεύθυνση. Στη συνέχεια, ο αέρας έχοντας αποκτήσει υψηλή ταχύτητα εισέρχεται στα πτερύγια του διαχύτη όπου, λόγω της ειδικής σχεδίασης, η υψηλή ταχύτητα υποβιβάζεται σε χαμηλότερα επίπεδα και η στατική πίεση αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό. Έχουμε δηλαδή μετατροπή της υψηλής κινητικής ενέργειας σε δυναμική. Τέλος, ο αέρας εξέρχεται με διεύθυνση κάθετη πλέον σε σχέση με αυτή του άξονα περιστροφής λόγω της φυγόκεντρου δύναμης. Πλέον έχει προσδοθεί στον αέρα η ενέργεια που απαιτείται για την εκάστοτε εφαρμογή.



Εικόνα 1.19: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας συμπιεστή

Πάλμωση, περιστροφική αποκόλληση και Στραγγαλισμός

Κατά τη λειτουργία ενός συμπιεστή είτε φυγοκεντρικού είτε αξονικού είναι δυνατόν να εμφανιστούν κάποια ανεπιθύμητα φαινόμενα, τα οποία επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία του συμπιεστή, και ακόμα χειρότερα να επιφέρουν σημαντικές βλάβες στην όλη διάταξη. Δύο από τα πιο βασικά αυτά φαινόμενα είναι τα παρακάτω:

- ΠΑΛΜΩΣΗ
- ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ

ΠΑΛΜΩΣΗ

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργεί ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής είναι αρκετά ευμετάβλητος και έτσι δεν εξασφαλίζεται πλήρως η εύρυθμη λειτουργία του συμπιεστή, του οποίου τα στοιχεία είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν υπό συγκεκριμένες συνθήκες ροής.

Κατά το φαινόμενο της πάλμωσης υπάρχει στιγμιαία ανακυκλοφορία του αέρα ο οποίος κατευθύνεται από την έξοδο του συμπιεστή προς την είσοδο. Παρατηρείται δηλαδή μία μακροσκοπική ταλάντωση του συνόλου της ροής.

Κατά μία πιο φυσική εξήγηση του φαινομένου, η πάλμωση εμφανίζεται όταν ο συμπιεστής λειτουργεί υπό συνθήκες ασταθούς ροής στο εσωτερικό του. Αυτό στη συνέχεια επιφέρει την απώλεια στήριξης και την αστάθεια, καθώς η ροή στα πτερύγια είναι ασταθής. Αυτό προκαλείται από ακατάσχετη αύξηση και μείωση της ποσότητας του εισερχόμενου αέρα χωρίς την ταυτόχρονη μεταβολή των χαρακτηριστικών του συμπιεστή. Έτσι, προκύπτει η αδυναμία των πτερυγίων να προωθήσουν τον αέρα σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά για τα οποία έχουν σχεδιαστεί.

Επομένως λοιπόν, η πάλμωση προσδιορίζεται ως το σημείο λειτουργίας στο οποίο φτάνουν η μέγιστη ικανότητα του συμπιεστή και το ελάχιστο όριο της ροής. Ο συμπιεστής χάνει την ικανότητα να διατηρήσει την κορυφή της λειτουργίας του όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της πάλμωσης και έτσι ολόκληρο το σύστημα γίνεται ασταθές.

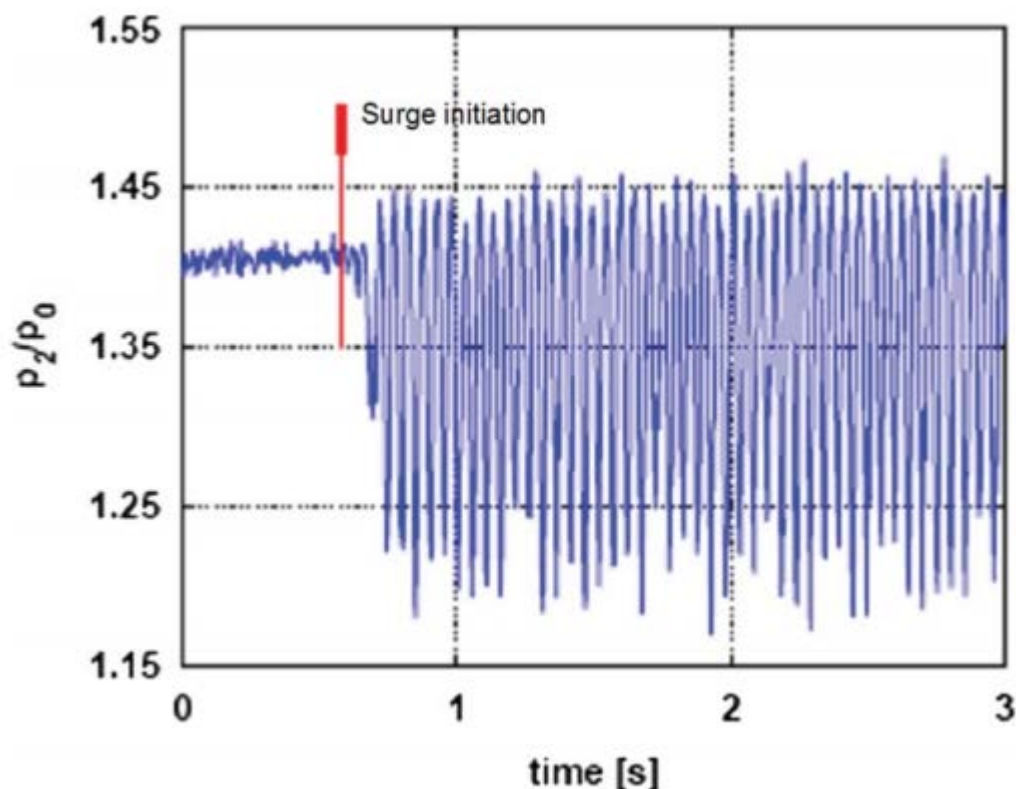
Αίτια

Μερικές από τις πιθανές αιτίες εμφάνισης αυτού του φαινομένου είναι:

- Απότομη αύξηση ή μείωση της ροής του αέρα
- Απότομη αλλαγή του ρυθμού περιστροφής του συμπιεστή
- Μείωση της διατομής στην εισαγωγή του αέρα
- Βλάβη σε ένα ή περισσότερα πτερύγια
- Υψηλή θερμοκρασία αέρα εισαγωγής

Συνέπειες

Η απώλεια στήριξης, τρίξιμο, κραδασμοί, δυνατοί κρότοι, αύξηση της θερμοκρασίας, σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης ακόμα και ολική καταστροφή του συμπιεστή είναι κάποιες από τις συνέπειες που προκαλεί η πάλμωση. Επομένως, όχι μόνο περιορίζεται η απόδοση αλλά είναι πιθανό να απορρέουν σημαντικές ζημιές στο συμπιεστή και στις βοηθητικές διατάξεις αυτού, λόγω των μεγάλων θερμικών και μηχανικών φορτίων που εμπλέκονται. Ένα ακόμη πρόβλημα είναι τα μη αποδεκτά επίπεδα θορύβου που μπορεί να προκληθούν από τις δονήσεις.



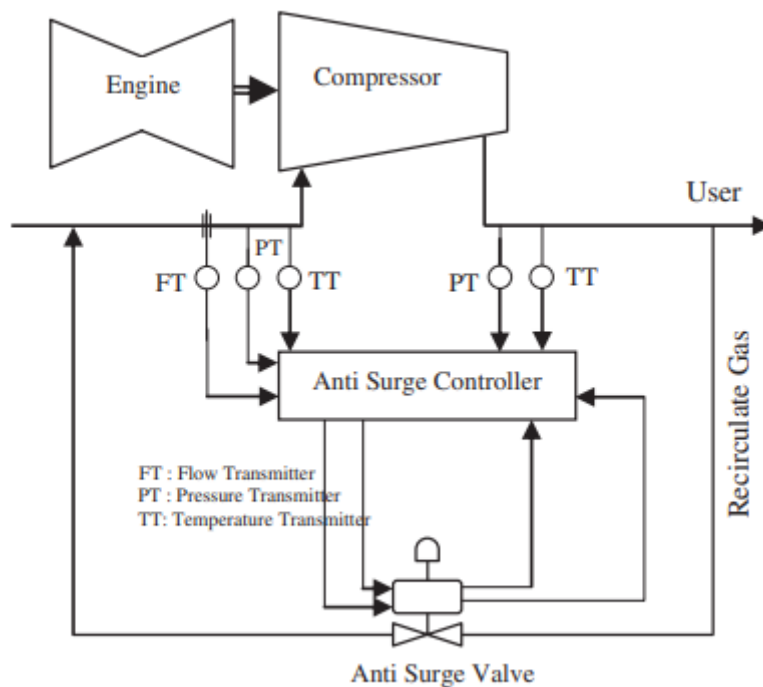
Εικόνα 1.20: Εμφάνιση πάλμωσης σε διάγραμμα λόγου πίεσης συναρτήσει του χρόνου

Τρόποι αντιμετώπισης

Μείωση ή αποφυγή διαταραχών κατά τη λειτουργία ώστε να μη μεταβάλλονται οι συνθήκες που έχουν σαν αποτέλεσμα αεροδυναμική αστάθεια.

Η σωστή αεροδυναμική σχεδίαση συμβάλλει τόσο στη βελτιστοποίηση της απόδοσης αλλά και τη μετάβαση από την ασταθή στη σταθερή ροή.

Συστήματα ελέγχου της πάλμωσης εφαρμόζονται συχνά στους συμπιεστές, ασχέτως με το είδος και την εφαρμογή του. Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται παρακάτω όπου φαίνεται το σύστημα ελέγχου πάλμωσης ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή βιομηχανικής εγκατάστασης (centrifugal compressor of the SC3 Sonatrach station DJELFA, Algeria, fabricated by SOLAR turbine)



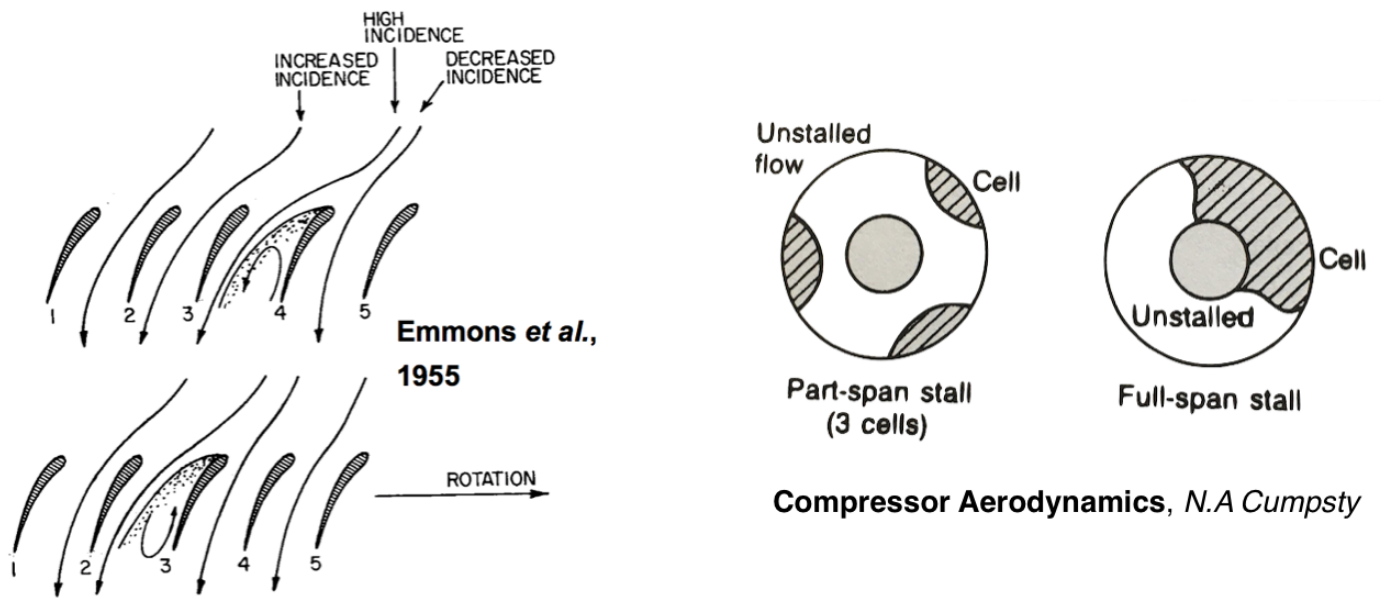
Εικόνα 1.21: Σύστημα ελέγχου πάλμωσης σε εγκατάσταση συμπιεστή

ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ

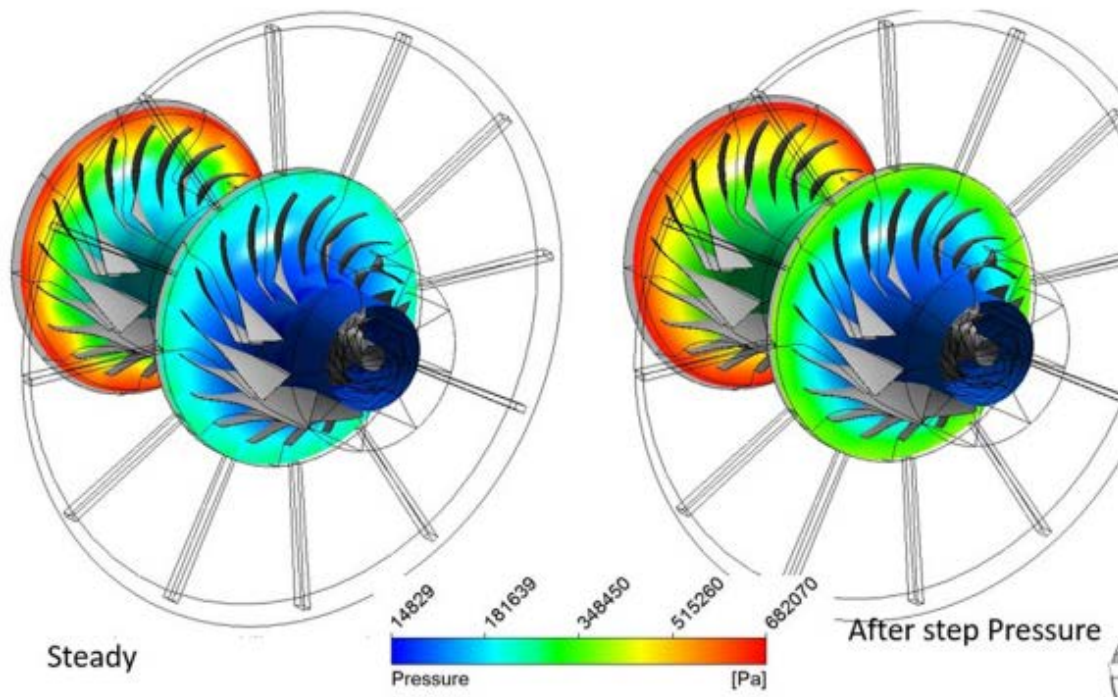
Η αποκόλληση της ροής οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη οριακών στρωμάτων. Ως οριακό στρώμα ορίζεται η περιοχή εκείνη του ρευστού κατά την οποία διακρίνονται οι πρώτες ενδείξεις ελάττωσης του μέτρου της ταχύτητας.

Αποκόλληση της ροής είναι η αποκόλληση του οριακού στρώματος. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται όταν, για μικρές ταχύτητες του αέρα και για αυξανόμενη πίεση κατά τη διεύθυνση της ροής (διαχύτης), το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται προχωρώντας κατά μήκος της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα μόρια του αέρα που βρίσκονται κοντά στα τοιχώματα να ελαττώνουν τόσο πολύ την ταχύτητα τους, ώστε να αναστρέφεται η φορά τους σαν να «ξεκολλάνε». Ειδικότερα, στα πτερύγια μπορούν να λάβουν χώρα τέτοιου είδους φαινόμενα λόγω των καμπύλων επιφανειών τους.

Η περιστροφική αποκόλληση είναι μια αεροδυναμική αστάθεια η οποία περιορίζεται στο εσωτερικό του συμπιεστή και χαρακτηρίζεται από μια παραμόρφωση της ροής περιμετρικά. Μια ή περισσότερες περιοχές (κυψέλες) στάσιμης ροής (stall cells) κινούνται γύρω από τη περιφέρεια του συμπιεστή μεταξύ 40% ως 70% της ταχύτητας του άξονα περιστροφής. Αυτό το φαινόμενο μειώνει ή και διακόπτει τελείως τη ροή με απόρροια τα πτερύγια να δέχονται μεγάλες δονήσεις και θερμικά φορτία. Οι δεδομένες στρεβλωτικές επιπτώσεις στη ροή, επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση και επίδοση του συμπιεστή.



Εικόνα 1.22: Αποκόλληση ροής σε πτερύγια (αριστερά) και δημιουργία κυψελών στο εσωτερικό του συμπιεστή (δεξιά)



Εικόνα 1.23: Κατανομή πίεσης στο πεδίο ροής στα εμπρός και πίσω στροφεία ενός πολυβάθμιου συμπιεστή

ΣΤΡΑΓΓΑΛΙΣΜΟΣ

Ένας ακόμη περιορισμός στο εύρος λειτουργίας (το οποίο δεν αποτελεί αρνητικό φαινόμενο) τίθεται από το σημείο στραγγαλισμού (choke point). Καθώς αυξάνει η ροή μάζας και μειώνεται η πίεση, η πυκνότητα ελαττώνεται και σε κάποια ελάχιστη διατομή στα διάκενα του συμπιεστή η ροή γίνεται ηχητική ($Mach=1$) με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υπάρξει άλλη αύξηση της ροής μάζας. Αυτό το σημείο λειτουργίας λέγεται σημείο στραγγαλισμού.

Αίτια

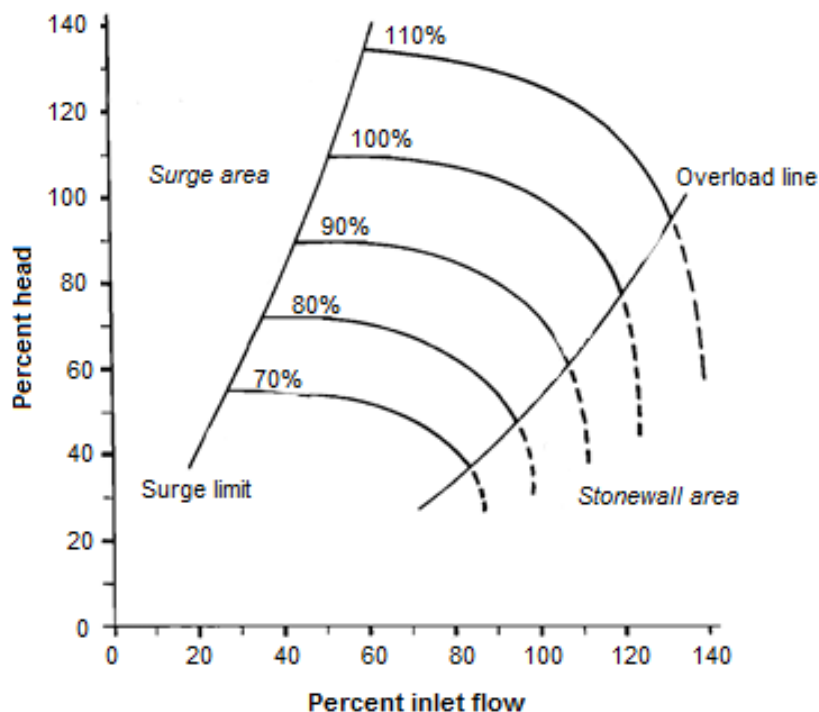
Το φαινόμενο για έναν φυγοκεντρικό συμπιεστή συμβαίνει όταν η αντίσταση στη ροή στη γραμμή εκκένωσης του συμπιεστή (μετά την έξοδο) πέφτει σημαντικά κάτω από τα κανονικά επίπεδα. Αυτό οδηγεί σε αυξημένη ταχύτητα αερίου, με ακραία τιμή αυτή της ηχητικής.

Συνέπειες

Η παρατεταμένη λειτουργία ενός συμπιεστή στο σημείο στραγγαλισμού του μπορεί να προκαλέσει ζημιά στα μέρη του συμπιεστή. Αυτό δεν είναι ιδιαίτερα ζημιογόνο για τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές ενός σταδίου, αλλά μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά στους ρότορες και τα πτερύγια των πολυβάθμιων φυγοκεντρικών και αξονικών συμπιεστών.

Τρόποι Αντιμετώπισης

Για να αποφευχθεί το φαινόμενο, πρέπει να διατηρηθεί ένα ορισμένο επίπεδο αντίστασης ροής στη γραμμή εξόδου του συμπιεστή. Κατάλληλες βαλβίδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό στη γραμμή εξόδου του συμπιεστή. Οι βαλβίδες αυτές κλείνουν για να περιορίσουν τη ροή. Όταν η αντίσταση ροής στην έξοδο του συμπιεστή πέσει και η ροή αρχίζει να αυξάνεται, οι βαλβίδες κατά του στραγγαλισμού κλείνουν για να αναπτύξουν αντίσταση στην αυξανόμενη ροή.



Εικόνα 1.24: Περιοχή Στραγγαλισμού

Κεφάλαιο 2: ΧΑΡΤΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

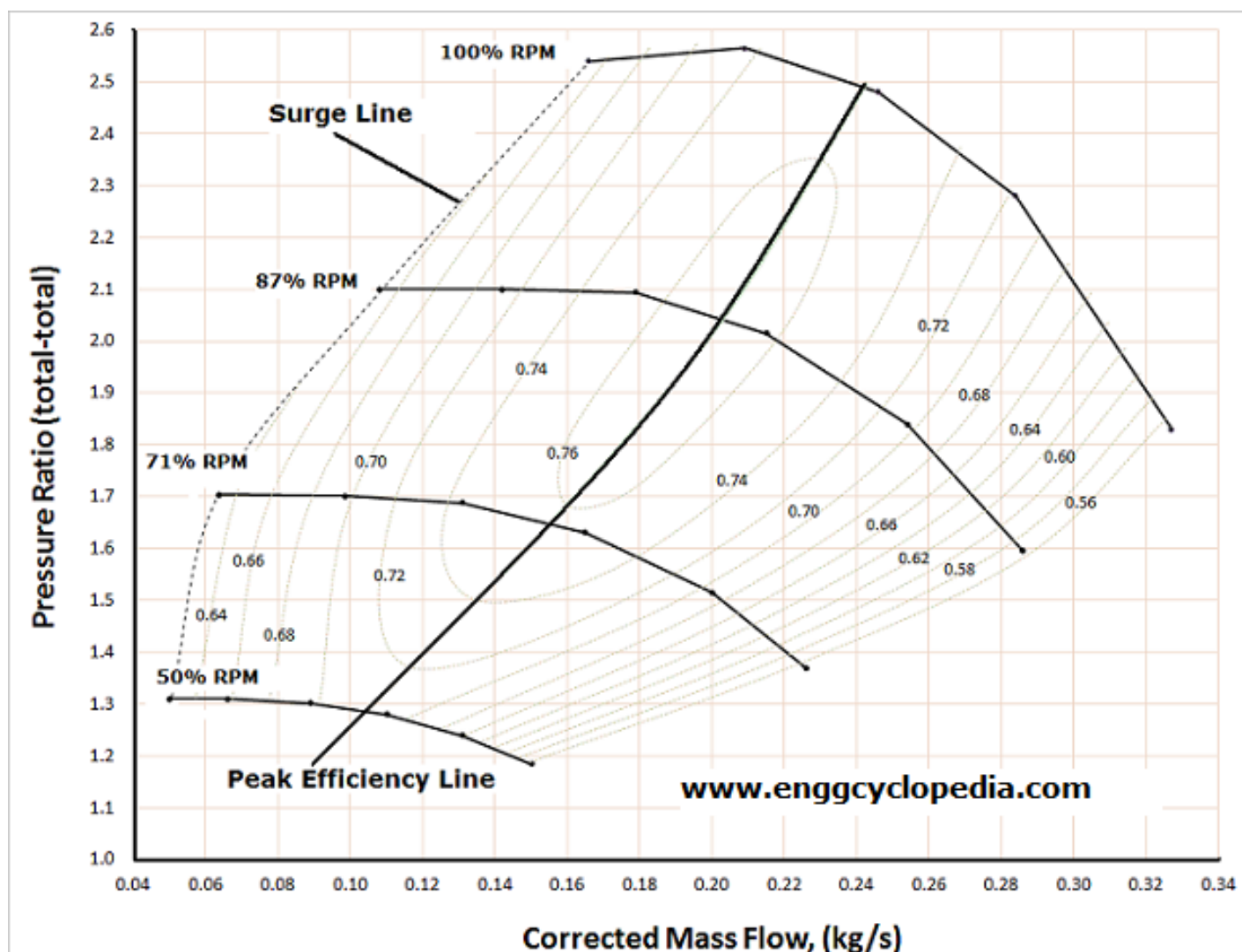
Χάρτης του συμπιεστή αποκαλείται το διάγραμμα το οποίο απεικονίζει σχηματικά τη λειτουργική συμπεριφορά ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή και εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους.

Μια τυπική μορφή χάρτη ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή απεικονίζει κατά κύριο λόγο τις παραμέτρους των σταθερών στροφών σε σχέση με τη πίεση καθώς και τη ροή μάζας του ρευστού.

Η απόδοση ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή προσδιορίζεται από τις καμπύλες οι οποίες δείχνουν τη σχέση μεταξύ του λόγου πίεσης και της ροής της μάζας του αέρα.

Τυπικός Χάρτης Συμπιεστή

Στο παρακάτω ενδεικτικό διάγραμμα διακρίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά της λειτουργικής συμπεριφοράς ενός συμπιεστή.



Εικόνα 2.1: Χάρτης Συμπιεστή

Ο άξονας των x αντιπροσωπεύει την παροχή του ρευστού, ενώ ο άξονας των y δείχνει τον λόγο πίεσης.

Οι έντονες καμπύλες μέσα στο διάγραμμα είναι καμπύλες σταθερών στροφών και η καθεμία έχει τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά.

Οι ισχνές καμπύλες μας δείχνουν την απόδοση, ανεξάρτητα από τις αλλαγές των στροφών, δηλαδή απεικονίζουν σε κάθε σημείο τους την απόδοση του συμπιεστή στη συγκεκριμένη περιοχή του χάρτη.

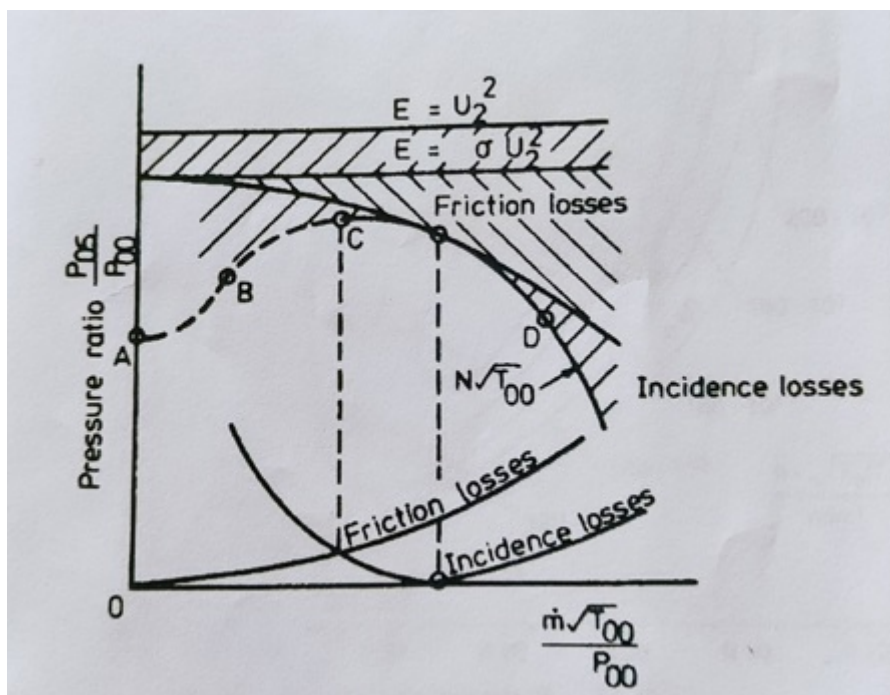
Η διακεκομμένη γραμμή είναι εκείνη της πάλμωσης (Surge Line) και οριοθετεί τη λειτουργία του συμπιεστή. Πέρα από αυτή τη γραμμή, ο συμπιεστής λειτουργεί σε σημεία για τα οποία δεν έχει σχεδιαστεί, δηλαδή σε περιοχές ασταθούς ροής υπό το φαινόμενο της πάλμωσης με τις προαναφερθείσες αρνητικές συνέπειες.

Αν ενώσουμε με μια γραμμή τα ακραία σημεία από τις καμπύλες σταθερών στροφών στα δεξιά, αυτή αποτελεί και τη γραμμή στραγγαλισμού (Choke Line).

Η έντονη κάθετη γραμμή που κόβει τις καμπύλες σταθερών στροφών, ονομάζεται γραμμή μέγιστης απόδοσης (Peak Efficiency Line) και κατά το μήκος της μας δίνει τη μέγιστη απόδοση λειτουργίας.

Γραμμή Σταθερών Στροφών και Απώλειες

Σημαντικό είναι επίσης το σχήμα της καμπύλης σταθερών στροφών που εμφανίζεται παρακάτω, εάν θεωρήσουμε ότι ο συμπιεστής περιστρέφεται με σταθερές στροφές και η παροχή ελέγχεται από ρυθμιστικά μέσα.

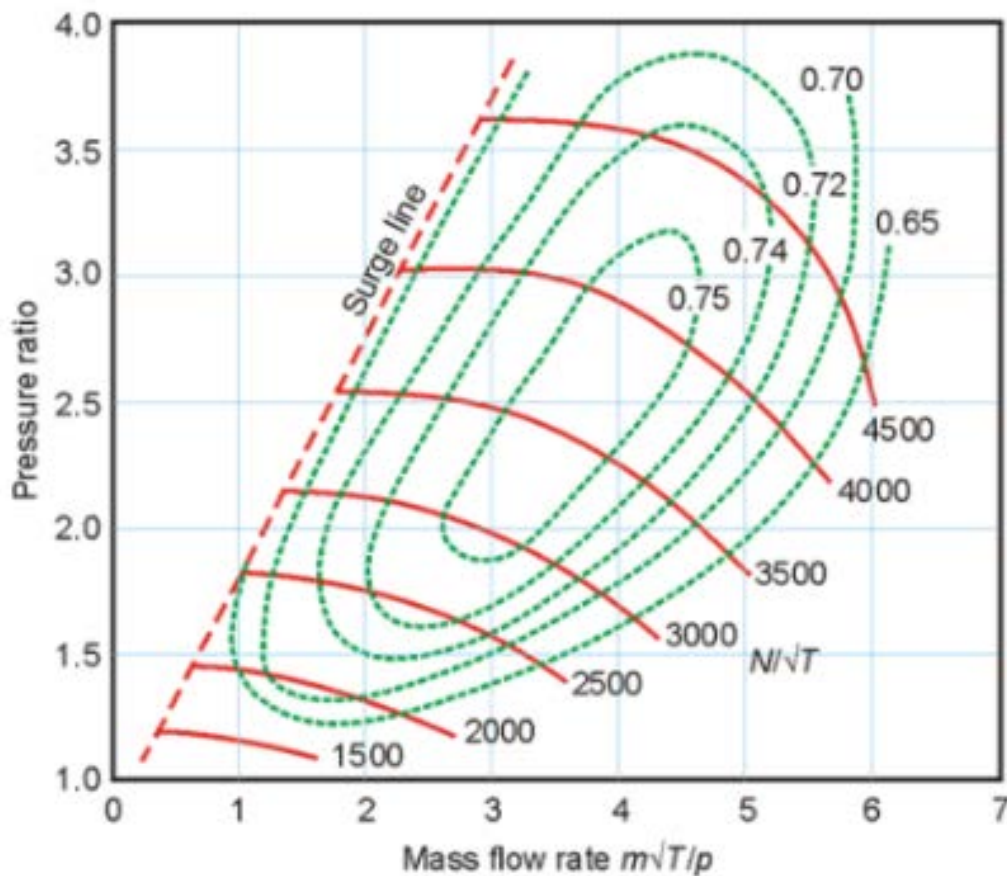


Εικόνα 2.2: Γραμμή Σταθερών Στροφών και Απώλειες

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 2.2, η μεταφορά ενέργειας παραμένει σχεδόν σταθερή όσο το μέγεθος της παροχής μάζας μεταβάλλεται. Οι απώλειες τριβής στα πτερύγια και στον διαχύτη αυξάνονται μαζί με την παροχή μάζας σε υψηλές ταχύτητες. Ενώ υπάρχει και η απώλεια λόγω της διεύθυνσης πρόσπτωσης της ροής, καθώς η γωνία της ροής του αέρα στο άκρο του στροφείου και στην εισαγωγή του διαχύτη, αποκλίνει από τη γωνία των πτερυγίων. Η καμπύλη σταθερών στροφών σχηματίζεται αν αφαιρεθούν οι απώλειες που αναφέρθηκαν από την ενέργεια που προσφέρεται.

Περιοχές Λειτουργίας Συμπιεστή

Ένας ακόμη χάρτης μεγάλης σημασίας είναι αυτός της εικόνας 2.3, όπου διακρίνονται καλύτερα και διαχωρίζονται οι περιοχές λειτουργίας με βάση τον βαθμό απόδοσης ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή.



Εικόνα 2.3: Περιοχές λειτουργίας σε τυπικό χάρτη συμπιεστή

Γενικότερα, η λειτουργική συμπεριφορά προσδιορίζεται από χάρτες οι οποίοι απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ πίεσης και παροχής μάζας. Το ωφέλιμο τμήμα του χάρτη περιορίζεται από τη γραμμή της πάλμωσης (surge line) και τη γραμμή στραγγαλισμού (choke line) καθώς και από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα του συμπιεστή (maximum permissible speed).

Κεφάλαιο 3: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟ

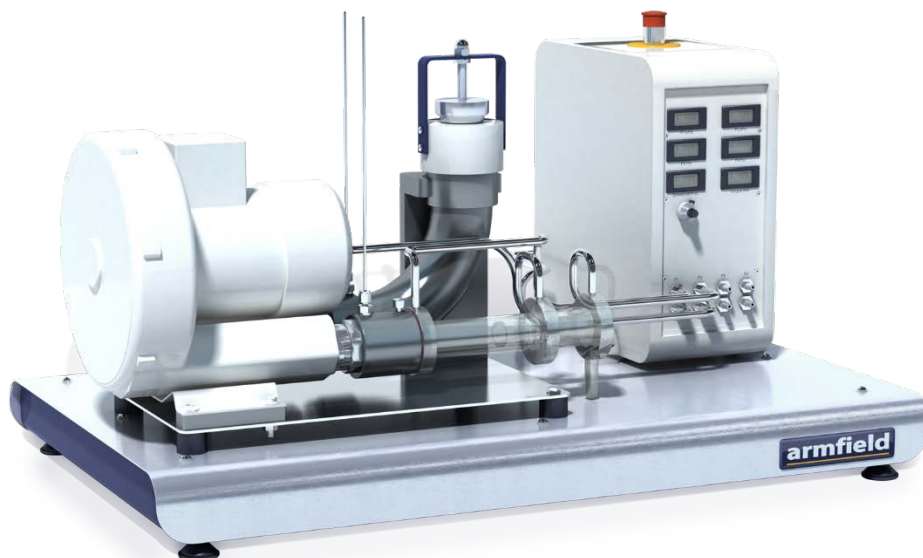
Ο εξοπλισμός C1-MkII του εργαστηρίου περιλαμβάνει αεροσυμπιεστή ενός σταδίου, συμπληρωμένο με δοκιμαστικό τμήμα και βαλβίδα πεταλούδας, συν ηλεκτρονική κονσόλα που περιέχει τα απαραίτητα χειριστήρια και όργανα.

Η μονάδα έχει αναπτυχθεί από κοινού μεταξύ της Armfield Ltd και ενός έμπειρου λέκτορα στη μηχανολογία του Reading College of Technology, και έχει σαν στόχο την εισαγωγή των σπουδαστών σε όλες τις αρχές της συμπιεστής ροής μέσω ενός αριθμού πειραματικών, ειδικά σχεδιασμένων διεργασιών.

Ο συμπιεστής ενός σταδίου κινείται από ένα ενσωματωμένο τριφασικό AC μοτέρ. Η ταχύτητα του συμπιεστή μπορεί να μεταβληθεί χρησιμοποιώντας έναν προηγμένο μετατροπέα συχνότητας ροπής, ο οποίος παρέχει σταθερό και ακριβή έλεγχο ταχύτητας συν άμεση ηλεκτρονική ανάγνωση της ροπής που παράγει ο κινητήρας.

Στην έξοδό του, ο συμπιεστής έχει βαλβίδα που επιτρέπει τη μεταβολή της ροής ανεξάρτητα από την ταχύτητα του συμπιεστή.

Η ηλεκτρονική κονσόλα περιλαμβάνει δύο μεγάλης εμβέλειας και δύο χαμηλής εμβέλειας αισθητήρες διαφορικής πίεσης, συν ένα χειριστήριο στροφών και ενδείξεις για την ταχύτητα του συμπιεστή, τις πιέσεις και τη ροπή του κινητήρα.



Εικόνα 3.1: Armfield C1MKIII Compressible Flow Unit

Επισκόπηση

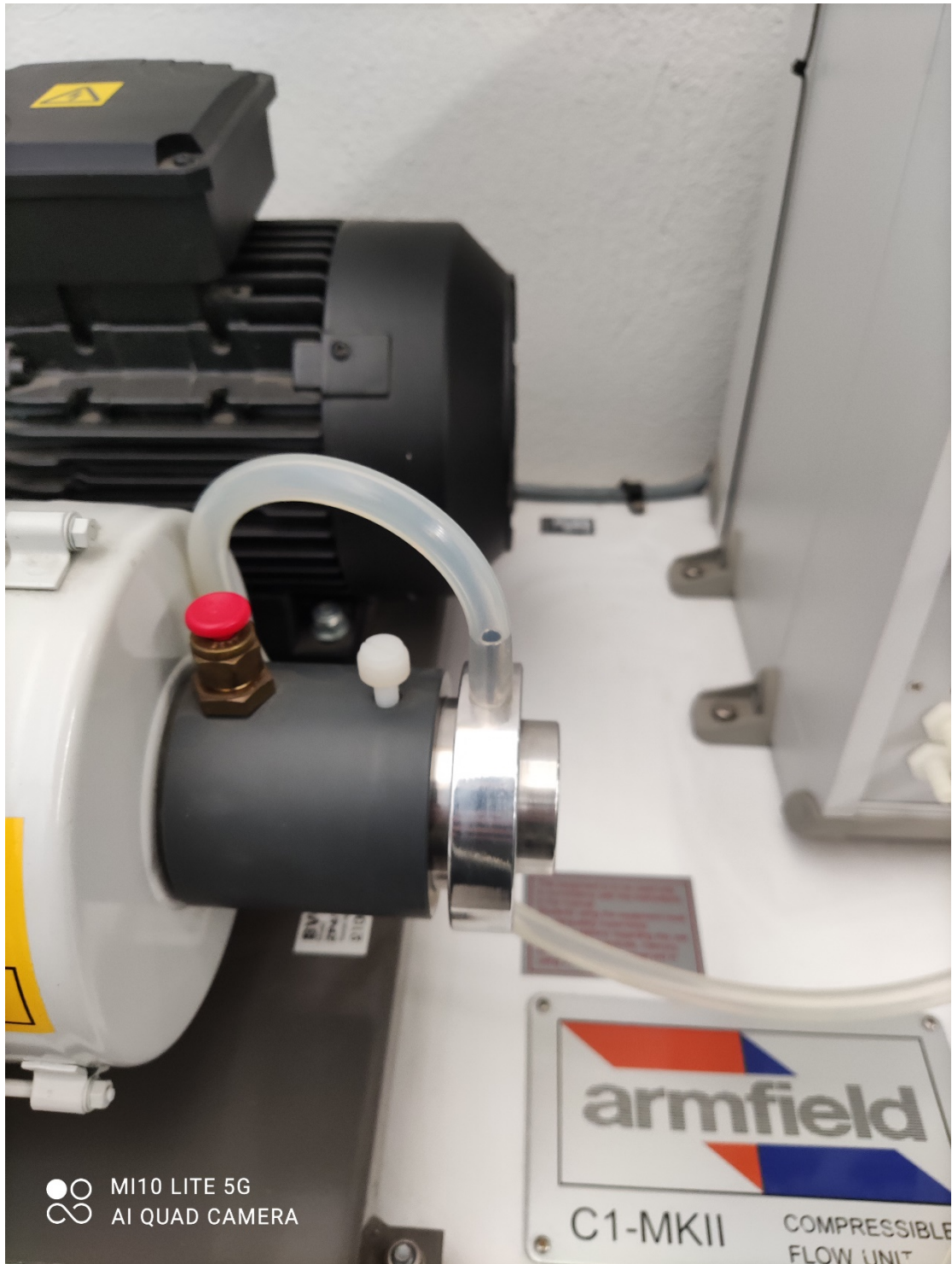
Η μονάδα συμπιεστής ροής CIMkII περιλαμβάνει τον συμπιεστή που οδηγείται απο έναν ηλεκτροκινητήρα. Ηλεκτρικοί αισθητήρες διαφορικής πίεσης παρέχουν τη καταγραφή της πίεσης σε δύο σημεία. Επίσης, κατάλληλοι αισθητήρες καταγράφουν τη ροπή στρέψης του συμπιεστή και τις στροφές. Με θερμομέτρα ακρίβειας 0,1 °C, μετράται η θερμοκρασία στην είσοδο, την έξοδο και η θερμοκρασία δωματίου. Προαιρετικά, παρέχεται ένα καταγραφικό (data logger) το οποίο μπορεί να συνδεθεί με τον υπολογιστή για την καταγραφή των μετρήσεων.



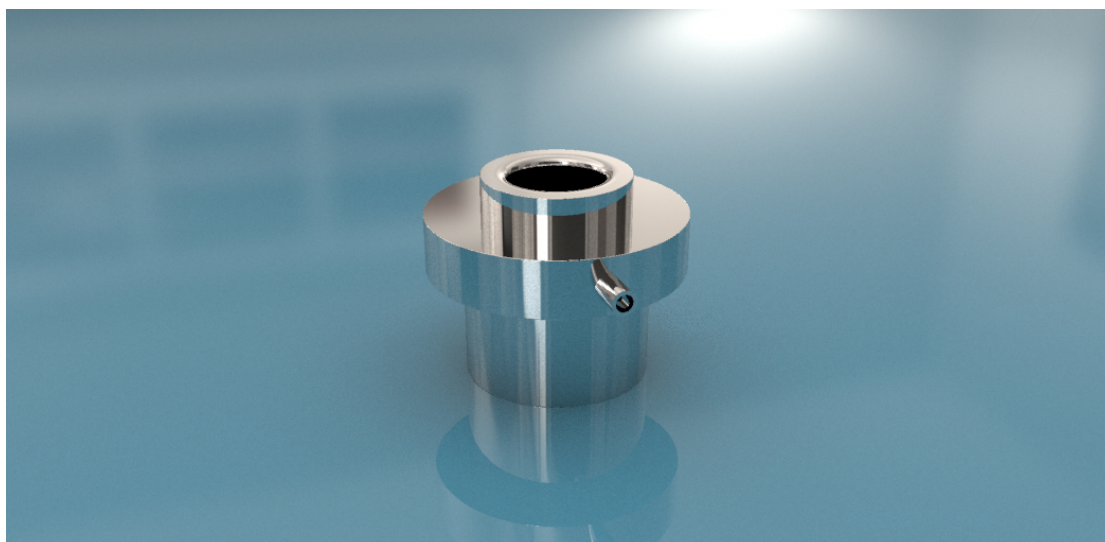
Εικόνα 3.2: Γενική απεικόνιση της μονάδας



Εικόνα 3.3: Δεξιά πλάγια όψη όπου διακρίνεται και το καταγραφικό (data logger)



Εικόνα 3.4: Ο αγωγός και το εξάρτημα της εισαγωγής



Εικόνα 3.5: Το εξάρτημα της εισαγωγής σχεδιασμένο στο Rhinoceros

Συμπιεστής

Ο συμπιεστής οδηγείται από ένα τριφασικό ηλεκτροκινητήρα μέσω ενός ιμάντα μετάδοσης της κίνησης. Για την προστασία του χειριστή από τα στρεφόμενα μέρη, υπάρχει προφυλακτήρας γύρω από αυτά. Η ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα ελέγχεται από έναν επιλογέα στην κεντρική μονάδα ελέγχου. Ως εκ τούτου, η ροή του αέρα μπορεί να μεταβάλλεται όσο μεταβάλλονται και οι στροφές. Επίσης, η ροή μπορεί να ρυθμιστεί και με την ειδική βαλβίδα στην έξοδο του συμπιεστή. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας υπάρχουν ειδικές υποδοχές στους αγωγούς εισόδου και εξόδου όπου τοποθετούνται θερμομέτρα ή αισθητήρες θερμοκρασίας. Στην κεντρική μονάδα εμφανίζονται οι ενδείξεις για την ταχύτητα περιστροφής και για τη ροπή στρέψης.



Εικόνα 3.6: Ο συμπιεστής



Εικόνα 3.7: Αριστερή όψη. Διακρίνεται ο προφυλακτήρας και η βάση στήριξης



Εικόνα 3.8: Ρυθμιστική βαλβίδα στην έξοδο του συμπιεστή



Εικόνα 3.9: Ηλεκτροκινητήρας



Εικόνα 3.10: Κεντρική μονάδα ελέγχου. Διακρίνονται οι ενδείξεις πίεσης, η ροπή στρέψης, η ταχύτητα περιστροφής και ο ρυθμιστής της και οι υποδοχές για τη καταγραφή της πίεσης

Τεχνικές Προδιαγραφές

Ηλεκτρική Παροχή

Πράσινο – Κίτρινο καλώδιο	Γείωση
Καφέ ή μαύρο καλώδιο	Φάση
Μπλε καλώδιο	Ουδέτερο
Ασφάλεια	6 ^A
Τάση	230V
Συχνότητα	50Hz

Συμπιεστής

Τύπος	Μονοβάθμιος
Αριθμός βαθμίδων	1
Διάμετρος εισαγωγής	25.4 mm
Διάμετρος εξαγωγής	51 mm
Στροφές κινητήρα	0 – 3050
Ισχύς κινητήρα	0.75 hp (0.56kW)
Στροφές συμπιεστή	12200 rpm (max)

Αερισμός

Η συσκευή απαιτεί μια ανεμπόδιστη παροχή αέρα στην είσοδο και την έξοδο, πρέπει να είναι τοποθετημένη με σωστό προσανατολισμό, ώστε η λειτουργία της να μην αποτελεί κίνδυνο για τον χειριστή.

Κεφάλαιο 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σκοπός

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι να ερευνήσουμε την απόδοση της εργαστηριακής εγκατάστασης, καθώς επίσης και η διερεύνηση της μεταβολής της πίεσης ισχύος εισόδου και της ισοθερμικής απόδοσης του φυγοκεντρικού συμπιεστή σε σταθερές ταχύτητες περιστροφής.

Μεθοδολογία

Η διερεύνηση θα πραγματοποιηθεί με μέτρηση και επεξεργασία των πιέσεων και θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου και της ροπής στρέψης, για δεδομένες στροφές, αλλάζοντας τη θέση της βαλβίδας στην έξοδο από πλήρως ανοιχτή έως και πλήρως κλειστή. Η διαδικασία θα επαναληφθεί για ένα εύρος στροφών. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων, θα καταλήξουμε στον υπολογισμό της παροχής μάζας, των κατάλληλων λόγων πίεσης και του ισηντροπικού βαθμού απόδοσης, ώστε να κατασκευαστούν τα κατάλληλα διαγράμματα.

Μαθηματικές σχέσεις και μεγέθη

Τα άμεσα μετρούμενα μεγέθη είναι:

- Στροφές του άξονα N [rpm]
- Ροπή του άξονα M_r ή M [Nm]
- Πίεση εισόδου P_{in} ή P_1 [Pa]
- Πίεση εξόδου P_{out} ή P_2 [Pa]
- Θερμοκρασία εισόδου T_{in} ή T_1 [°C]
- Θερμοκρασία εξόδου T_{out} ή T_2 [°C]
- Θερμοκρασία δωματίου T_0 [°C]

Η σχέση (4.1) μας δίνει τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε [rad/s]

- $$\omega = \frac{\pi N}{30} \quad (4.1)$$

Απο τις ενδείξεις των πιέσεων θα πρέπει να προστεθεί η ατμοσφαιρική πίεση, αφού η ένδειξη αναφέρεται σε διαφορά των πιέσεων, σχέσεις (4.3), (4.4)

- $p_1 = P_0 + P_{in}$ (4.3)

- $p_2 = P_0 + P_{out}$ (4.4) , όπου $P_0 = 101325 Pa$

Χρήσιμο μέγεθος είναι και η διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο, θεωρώντας αμελητέα μεταβολή κινητικής ενέργειας ($V_2 \cong V_1$)

- $\Delta P_{12} = P_2 - P_1$ (4.5)

Δεδομένα μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν αναγράφονται παρακάτω

- Σταθερά των αερίων $R_g = 287 \left[\frac{J}{kgK} \right]$

- Από την καταστατική εξίσωση τελείου αερίου:

$$P = \rho RT \rightarrow \rho = \frac{P}{RT}$$

Συνεπώς η Πυκνότητα είναι:

$$\rho_o = \frac{P_o}{R_g T_o} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (4.6)$$

- Ειδική θερμοχωρητικότητα και ισεντροπικός εκθέτης

$$\gamma = 1.4 \quad c_p = \pi \frac{\gamma R_g}{\gamma - 1} \quad (4.7)$$

- Διάμετρος εισόδου και επιφάνεια

$$d_1 = 25.4 \quad [mm] \quad A_1 = \pi \frac{d_1^2}{4 \cdot 10^6} \quad [m^2] \quad (4.8)$$

Από την Ατμόσφαιρα (θέση 0) ως τη διατομή εισόδου (θέση 1) θεωρούμε ισεντροπική και ασυμπίεστη ροή, οπότε ισχύει το θεώρημα Bernoulli:

$$p_{t_0} = p_{t_1} \rightarrow p_0 + \frac{1}{2} \rho_0 0^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho_0 V_1^2 \rightarrow V_1 = \sqrt{2 \left(\frac{p_0 - p_1}{\rho_0} \right)}$$

Η οποία ανάλογα με τον αριθμό Reynolds και την διάμετρο του στομίου μεταβάλλεται ελαφρά:

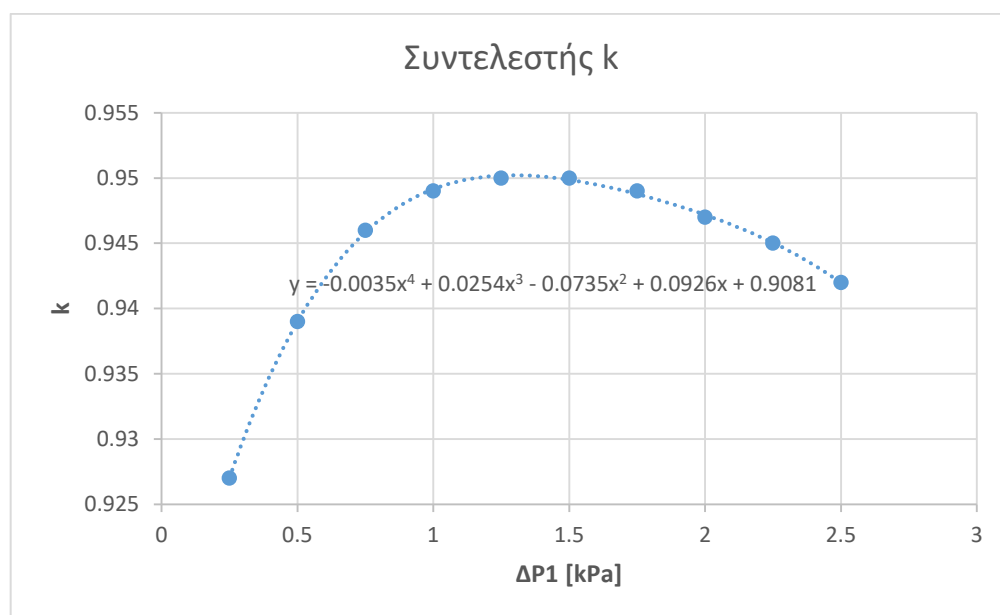
- $V_1 = \sqrt{2k \left(\frac{P_o - p_1}{\rho_0} \right)} \left[\frac{m}{s} \right]$ (4.9)

Για να βρεθεί η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο, θα πρέπει να υπολογισθεί ο συντελεστής k ανάλογα την πίεση, μετρούμενη σε kPa. Από το εγχειρίδιο λαμβάνουμε τον πίνακα παρακάτω

ΔP_1 [kPa]	k
0.25	0.927
0.5	0.939
0.75	0.946
1	0.949
1.25	0.95
1.5	0.95
1.75	0.949
2	0.947
2.25	0.945
2.5	0.942

Τοποθετώντας τα στοιχεία αυτά σε μία συνάρτηση στο excel παρατηρούμε πως το k μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

- $$k = -0.0035P_1^4 + 0.0254P_1^3 - 0.0735P_1^2 + 0.0926P_1 - 0.9081 \quad (4.10)$$



Η παροχή μάζας μπορεί να υπολογιστεί παρακάτω

- $$m = \rho_0 A_1 V_1 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (4.11)$$

Η θερμοκρασία ισεντροπικής μεταβολής στην έξοδο είναι:

- $$T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [^\circ C] \quad (4.12)$$

Ισχύς Ηλεκτροκινητήρα:

$$\bullet W_H = \omega M \quad [W] \quad (4.13)$$

Ισχύς που περιλαμβάνει ο αέρας:

$$\bullet W_c = mc_p (T_2 - T_1) = \Delta H_{12} \quad [W] \quad (4.14)$$

Ισχύς για ισεντροπική μεταβολή:

$$\bullet W_s = mc_p (T_{2s} - T_1) \quad [W] \quad (4.15)$$

Ισχύς για ισοθερμοκρασιακή μεταβολή:

$$\bullet W_t = mRT_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad [W] \quad (4.16)$$

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και ο αντίστοιχος ολικός:

$$\bullet \eta_s = \frac{W_s}{W_c} \quad (4.17) \quad \eta_{os} = \frac{W_s}{W_H} \quad (4.18)$$

Ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης και ο αντίστοιχος ολικός:

$$\bullet \eta_t = \frac{W_t}{W_c} \quad (4.19) \quad \eta_{ot} = \frac{W_t}{W_H} \quad (4.20)$$

Ισχύς απωλειών:

$$\bullet W_f = \frac{W_H}{W_c} \quad [W] \quad (4.21)$$

Συντελεστές απωλειών:

$$\bullet a_c = \frac{W_c}{W_H} \quad (4.22) \quad a_f = 1 - a_c \quad (4.23)$$

Ισολογισμός ενέργειας

Το μοτέρ παρέχει W_H

1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος (Διατήρηση Ενέργειας):

$$W_H - W_f - Q_c = m\Delta h_{12} = mc_p(T_2 - T_1) = W_c \rightarrow W_f = W_H - (W_c + Q_c)$$

Το έργο που χάνεται λόγω θερμότητας έχει ως εξής:

$$\bullet Q_c = A_s U \left(\frac{T_1 + T_2}{2} + T_0 \right) \quad [W] \quad (4.24)$$

$$\text{όπου } A_s = 0.5 \quad [m^2] \quad \text{και} \quad U = 11 \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

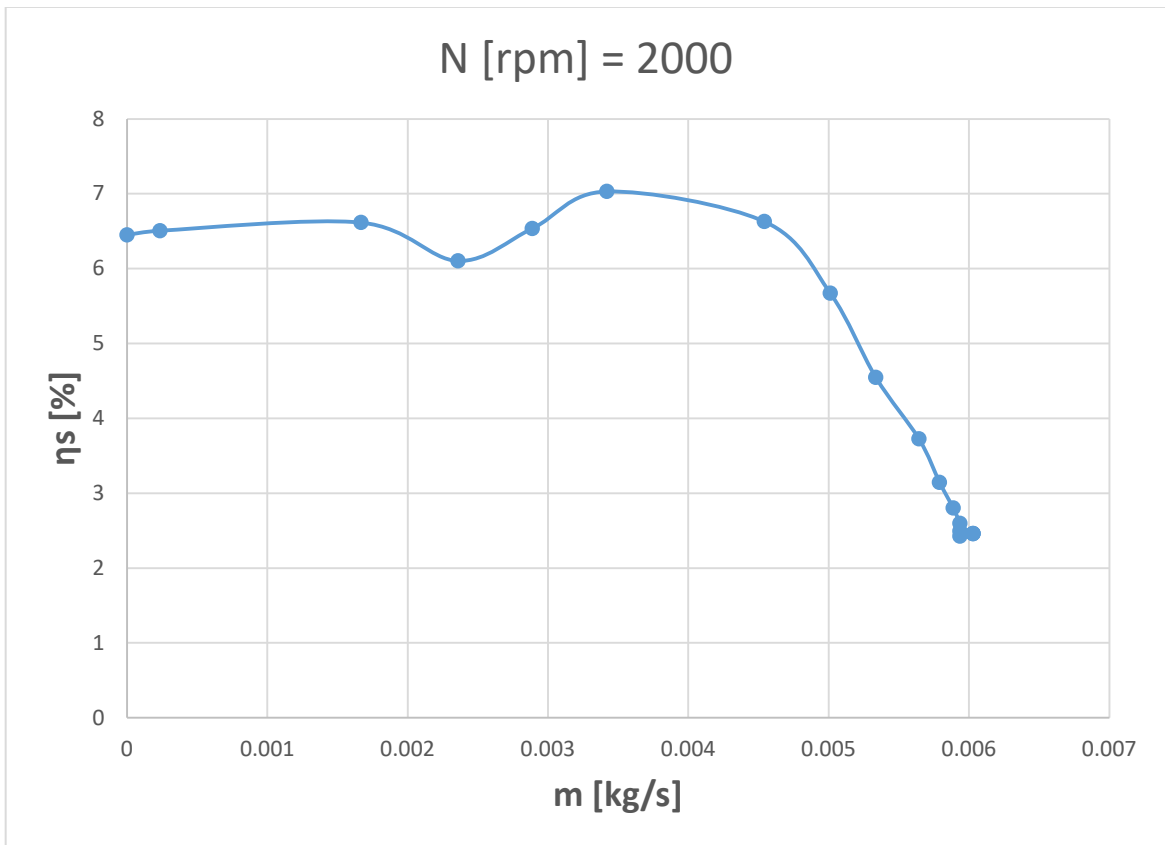
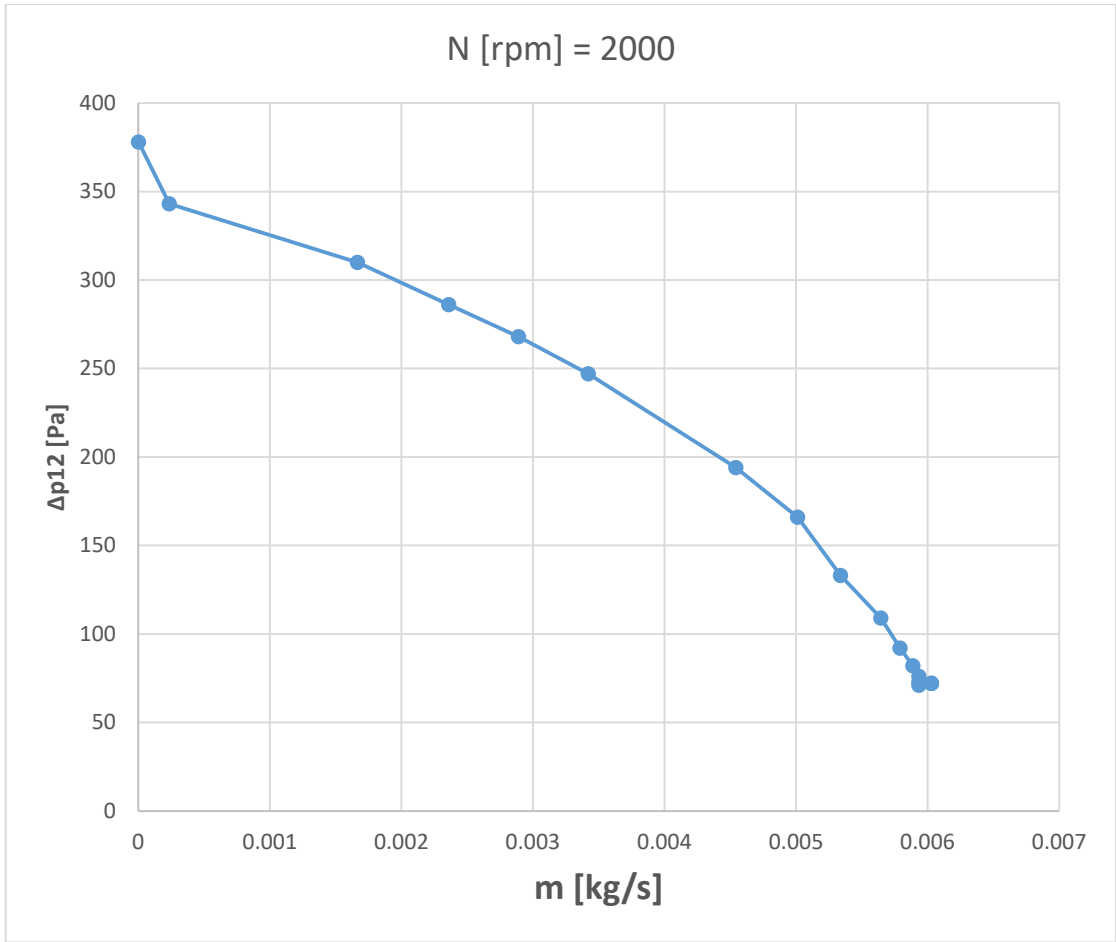
Μετρήσεις και Διαγράμματα

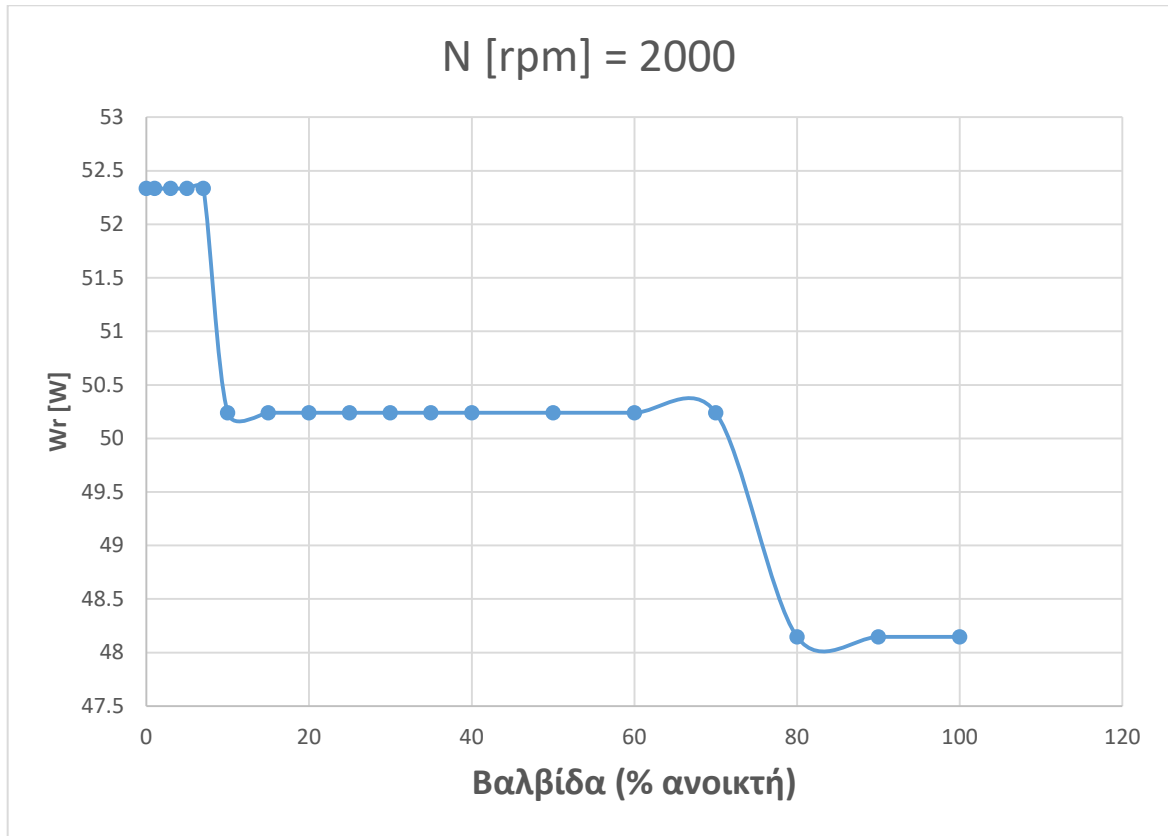
N[rpm]=	2000	Βαλβίδα (% ανοικτή)	P1 [Pa]	P2 [Pa]	T1 [C]	T2 [C]	Mr [Nm]
ω [rad/s]	209.333	100	-65	7	30.0	32.5	0.23
		90	-65	7	30.0	32.5	0.23
		80	-65	7	30.0	32.5	0.23
		70	-63	8	30.0	32.5	0.24
		60	-63	10	30.0	32.5	0.24
		50	-63	13	30.0	32.5	0.24
		40	-62	20	30.0	32.5	0.24
		35	-60	32	30.0	32.5	0.24
		30	-57	52	30.0	32.5	0.24
		25	-51	82	30.0	32.5	0.24
		20	-45	121	30.0	32.5	0.24
		15	-37	157	30.0	32.5	0.24
		10	-21	226	30.0	33.0	0.24
		7	-15	253	30.0	33.5	0.25
		5	-10	276	30.0	34	0.25
		3	-5	305	30.0	34	0.25
		1	-0.1	343	30.0	34.5	0.25
		0	-0.000001	378	30.0	35	0.25

P1 [kPa]	k	p1 [Pa]	p2 [Pa]	Δp_{12} [Pa]	V1 [m/s]	T2s [C]	m [kg/s]
0.065	0.913815	101260	101332	72	9.979973874	30.0615402	0.006028503
0.065	0.913815	101260	101332	72	9.979973874	30.0615402	0.006028503
0.065	0.913815	101260	101332	72	9.979973874	30.0615402	0.006028503
0.063	0.913648	101262	101333	71	9.824338397	30.06068449	0.00593449
0.063	0.913648	101262	101335	73	9.824338397	30.06239347	0.00593449
0.063	0.913648	101262	101338	76	9.824338397	30.0649569	0.00593449
0.062	0.913565	101263	101345	82	9.7456091	30.0700829	0.005886933
0.06	0.913397	101265	101357	92	9.586252706	30.07862528	0.005790672
0.057	0.913144	101268	101377	109	9.342230402	30.09314552	0.005643268
0.051	0.912635	101274	101407	133	8.834400616	30.11363829	0.005336508
0.045	0.91212	101280	101446	166	8.296135789	30.14180937	0.005011364
0.037	0.911427	101288	101482	194	7.519782317	30.1656996	0.0045424
0.021	0.910012	101304	101551	247	5.660786858	30.21089541	0.003419455
0.015	0.909473	101310	101578	268	4.782818742	30.22879534	0.00288911
0.01	0.909019	101315	101601	286	3.904180593	30.2441347	0.002358359
0.005	0.908561	101320	101630	310	2.759977761	30.26458615	0.001667192
0.0001	0.908109	101324.9	101668	343.1	0.390222716	30.2927889	0.000235718
1E-09	0.9081	101325	101703	378	0.001233982	30.32253139	7.45399E-07

Wr [W]	Wc [W]	Ws [W]	Wt [W]	η_s [%]	η_t [%]	η_{os} [%]	η_{ot} [%]
48.1466667	15.1390788	0.3726648	0.3726269	2.461608	2.461358	0.774019883	0.773941
48.1466667	15.1390788	0.3726648	0.3726269	2.461608	2.461358	0.774019883	0.773941
48.1466667	15.1390788	0.3726648	0.3726269	2.461608	2.461358	0.774019883	0.773941
50.24	14.9029882	0.3617521	0.3617159	2.4273796	2.427137	0.720047966	0.719976
50.24	14.9029882	0.3719397	0.3719014	2.4957389	2.495482	0.740325788	0.74025
50.24	14.9029882	0.3872208	0.3871793	2.5982761	2.597998	0.770741985	0.770659
50.24	14.7835601	0.4144299	0.414382	2.8033161	2.802992	0.824900334	0.824805
50.24	14.5418251	0.457342	0.4572827	3.145011	3.144603	0.910314497	0.910196
50.24	14.1716565	0.5280105	0.5279294	3.7258208	3.725248	1.050976368	1.050815
50.24	13.4013063	0.6091606	0.6090464	4.5455314	4.544679	1.212501169	1.212274
50.24	12.5847878	0.7138563	0.7136893	5.6723747	5.671048	1.420892361	1.42056
50.24	11.4071017	0.7560609	0.7558542	6.6279841	6.626172	1.504898252	1.504487
50.24	10.3045278	0.7243925	0.7241406	7.029847	7.027402	1.44186412	1.441363
52.3333333	10.1573871	0.6639894	0.6637388	6.5370098	6.534543	1.268769535	1.268291
52.3333333	9.47588814	0.5783483	0.5781154	6.1033675	6.10091	1.105124091	1.104679
52.3333333	6.69877838	0.443101	0.4429076	6.6146537	6.611767	0.846689795	0.84632
52.3333333	1.06550403	0.0693262	0.0692927	6.50642	6.503278	0.132470384	0.132406
52.3333333	0.00374377	0.0002415	0.0002414	6.4506278	6.447197	0.000461458	0.000461

Wf [W]	α_c [%]	α_f [%]	Qc [W]	Wf' [W]	Tm [C]
33.00759	31.44367	68.55633	45.375	-12.3674	83.0138
33.00759	31.44367	68.55633	45.375	-12.3674	83.0138
33.00759	31.44367	68.55633	45.375	-12.3674	83.0138
35.33701	29.66359	70.33641	45.375	-10.038	87.24911
35.33701	29.66359	70.33641	45.375	-10.038	87.24911
35.33701	29.66359	70.33641	45.375	-10.038	87.24911
35.45644	29.42588	70.57412	45.375	-9.91856	87.46625
35.69817	28.94472	71.05528	45.375	-9.67683	87.90577
36.06834	28.20792	71.79208	45.375	-9.30666	88.57881
36.83869	26.67457	73.32543	45.375	-8.53631	89.97944
37.65521	25.04934	74.95066	45.375	-7.71979	91.46402
38.8329	22.70522	77.29478	45.375	-6.5421	93.60527
39.93547	20.5106	79.4894	46.75	-6.81453	95.60995
42.17595	19.40902	80.59098	48.125	-5.94905	99.68354
42.85745	18.10679	81.89321	49.5	-6.64255	100.9226
45.63455	12.80021	87.19979	49.5	-3.86545	105.9719
51.26783	2.035995	97.96401	50.875	0.392829	116.2142
52.32959	0.007154	99.99285	52.25	0.07959	118.1447



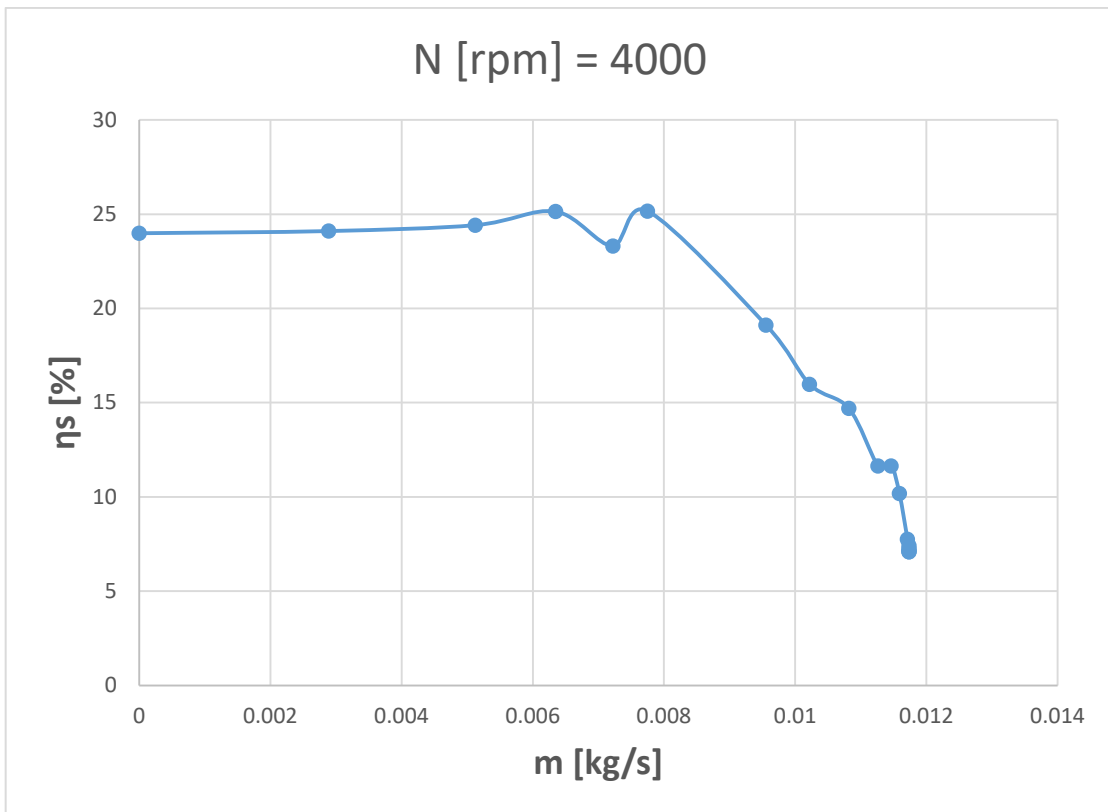
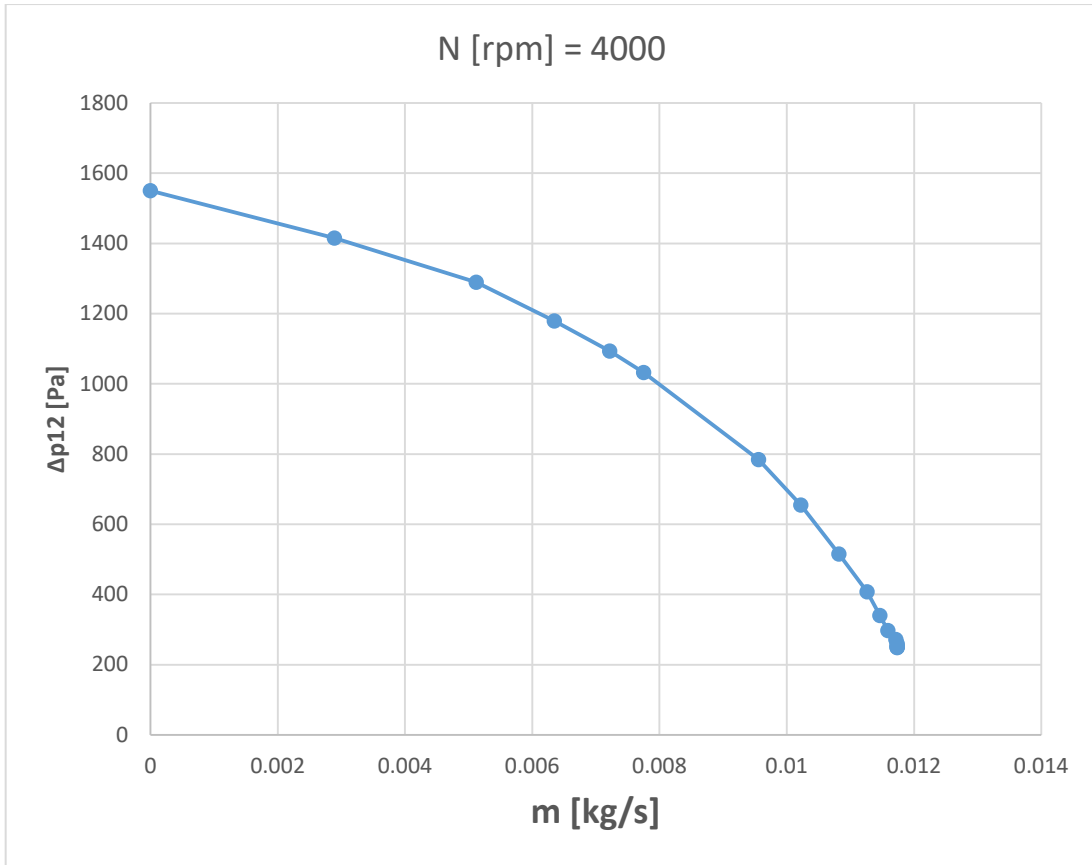


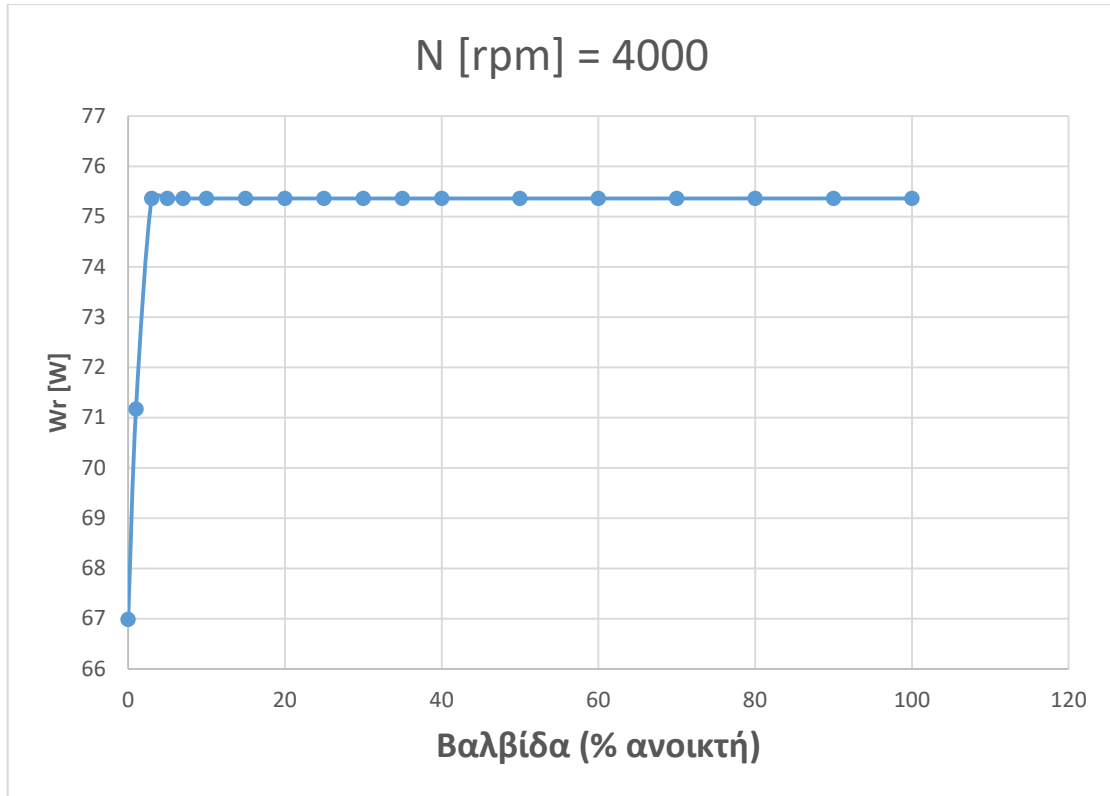
N[rpm]=	4000	Βαλβίδα (% ανοικτή)	P1 [Pa]	P2 [Pa]	T1 [C]	T2 [C]	Mr [Nm]
ω [rad/s]	418.667	100	-243	6	30.0	33	0.18
		90	-243	6	30.0	33	0.18
		80	-243	9	30.0	33	0.18
		70	-243	12	30.0	33	0.18
		60	-243	17	30.0	33	0.18
		50	-242	30	30.0	33	0.18
		40	-237	60	30.5	33	0.18
		35	-232	108	30.5	33	0.18
		30	-224	184	30.5	33.5	0.18
		25	-207	308	30.5	33.5	0.18
		20	-185	470	30.0	33.5	0.18
		15	-162	622	30.0	33.5	0.18
		10	-107	925	30.5	34	0.18
		7	-93	1000	30.5	34.5	0.18
		5	-72	1107	30.5	34.5	0.18
		3	-47	1242	30.5	35	0.18
		1	-15	1400	30.5	35.5	0.17
		0	-0.000001	1550	30.5	36	0.16

P1 [kPa]	k	p1 [Pa]	p2 [Pa]	Δp_{12} [Pa]	V1 [m/s]	T2s [C]	m [kg/s]
0.243	0.926614	101082	101331	249	19.43104023	30.21306808	0.011737515
0.243	0.926614	101082	101331	249	19.43104023	30.21306808	0.011737515
0.243	0.926614	101082	101334	252	19.43104023	30.21563289	0.011737515
0.243	0.926614	101082	101337	255	19.43104023	30.21819764	0.011737515
0.243	0.926614	101082	101342	260	19.43104023	30.2224721	0.011737515
0.242	0.926553	101083	101355	272	19.39037673	30.23272789	0.011712951
0.237	0.926245	101088	101385	297	19.18582923	30.75450265	0.011589392
0.232	0.925934	101093	101433	340	18.97918433	30.7912913	0.011464567
0.224	0.925431	101101	101509	408	18.6440199	30.84943823	0.011262107
0.207	0.924338	101118	101633	515	17.91199639	30.94084003	0.010819921
0.185	0.922872	101140	101795	655	16.91999141	30.55935947	0.01022069
0.162	0.921278	101163	101947	784	15.8196298	30.66906844	0.009556006
0.107	0.917197	101218	102250	1032	12.82823128	31.38092203	0.007749022
0.093	0.916096	101232	102325	1093	11.95241122	31.43266437	0.007219974
0.072	0.914396	101253	102432	1179	10.50695322	31.5055385	0.00634683
0.047	0.912292	101278	102567	1289	8.479289572	31.59866218	0.005122
0.015	0.909473	101310	102725	1415	4.782818742	31.70514751	0.00288911
1E-09	0.9081	101325	102875	1550	0.001233982	31.81931099	7.45399E-07

Wr [W]	Wc [W]	Ws [W]	Wt [W]	η_s [%]	η_t [%]	η_{os} [%]	η_{ot} [%]
75.36	35.3710003	2.5121437	2.5112609	7.1022694	7.099773	3.333524055	3.332353
75.36	35.3710003	2.5121437	2.5112609	7.1022694	7.099773	3.333524055	3.332353
75.36	35.3710003	2.5423836	2.5414794	7.1877629	7.185206	3.373651305	3.372451
75.36	35.3710003	2.5726229	2.571697	7.2732545	7.270637	3.413777707	3.412549
75.36	35.3710003	2.6230202	2.6220577	7.4157366	7.413016	3.480653158	3.479376
75.36	35.2969791	2.7381972	2.7371462	7.7575965	7.754619	3.633488858	3.632094
75.36	29.1038618	2.962804	2.9615625	10.180106	10.17584	3.931534014	3.929887
75.36	28.7903927	3.3545564	3.3529476	11.651652	11.64606	4.451375233	4.44924
75.36	33.9383597	3.9531201	3.9508461	11.647941	11.64124	5.245647691	5.24263
75.36	32.6058318	4.7913186	4.7878423	14.694668	14.68401	6.357906897	6.353294
75.36	35.9333923	5.7427666	5.7374724	15.981699	15.96697	7.620444027	7.613419
75.36	33.5965279	6.4223933	6.4153129	19.116241	19.09517	8.5222841	8.512889
75.36	27.243623	6.8570022	6.84707	25.169201	25.13274	9.098994401	9.085815
75.36	29.0098547	6.7641145	6.7537426	23.316609	23.28086	8.975735793	8.961973
75.36	25.5015645	6.4107012	6.4001049	25.138462	25.09691	8.506769157	8.492708
75.36	23.1527198	5.6526706	5.6424639	24.414715	24.37063	7.500889825	7.487346
71.1733333	14.510553	3.4974714	3.4905458	24.10295	24.05522	4.914019334	4.904289
66.9866667	0.00411814	0.0009878	0.0009857	23.987473	23.93549	0.00147468	0.001471

Wf [W]	α_c [%]	α_f [%]	Qc [W]	Wf' [W]	Tm [C]
39.989	46.93604	53.06396	46.75	-6.761	95.70727
39.989	46.93604	53.06396	46.75	-6.761	95.70727
39.989	46.93604	53.06396	46.75	-6.761	95.70727
39.989	46.93604	53.06396	46.75	-6.761	95.70727
39.989	46.93604	53.06396	46.75	-6.761	95.70727
40.06302	46.83782	53.16218	46.75	-6.68698	95.84186
46.25614	38.61977	61.38023	48.125	-1.86886	107.1021
46.56961	38.20381	61.79619	48.125	-1.55539	107.672
41.42164	45.03498	54.96502	49.5	-8.07836	98.31207
42.75417	43.26676	56.73324	49.5	-6.74583	100.7349
39.42661	47.68231	52.31769	48.125	-8.69839	94.68474
41.76347	44.58138	55.41862	48.125	-6.36153	98.93359
48.11638	36.1513	63.8487	50.875	-2.75862	110.4843
46.35015	38.49503	61.50497	52.25	-5.89985	107.273
49.85844	33.83966	66.16034	52.25	-2.39156	113.6517
52.20728	30.72282	69.27718	53.625	-1.41772	117.9223
56.66278	20.38763	79.61237	55	1.66278	126.0232
66.98255	0.006148	99.99385	56.375	10.60755	144.7865



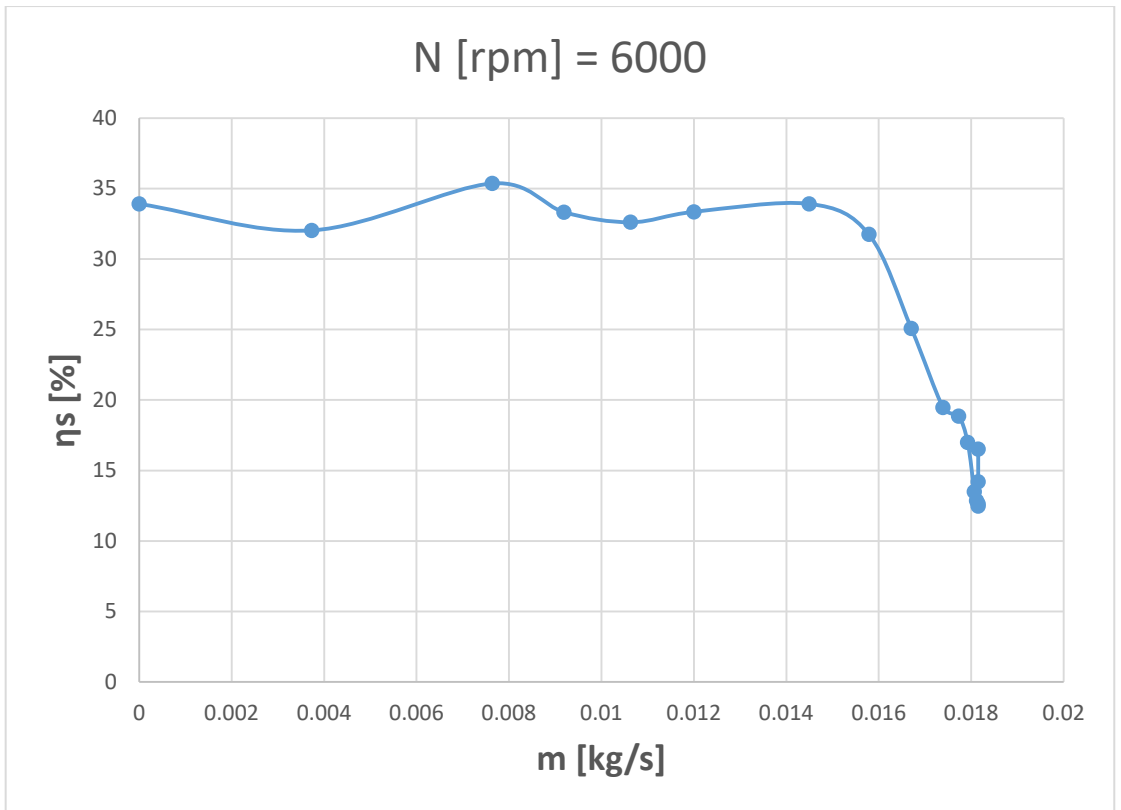
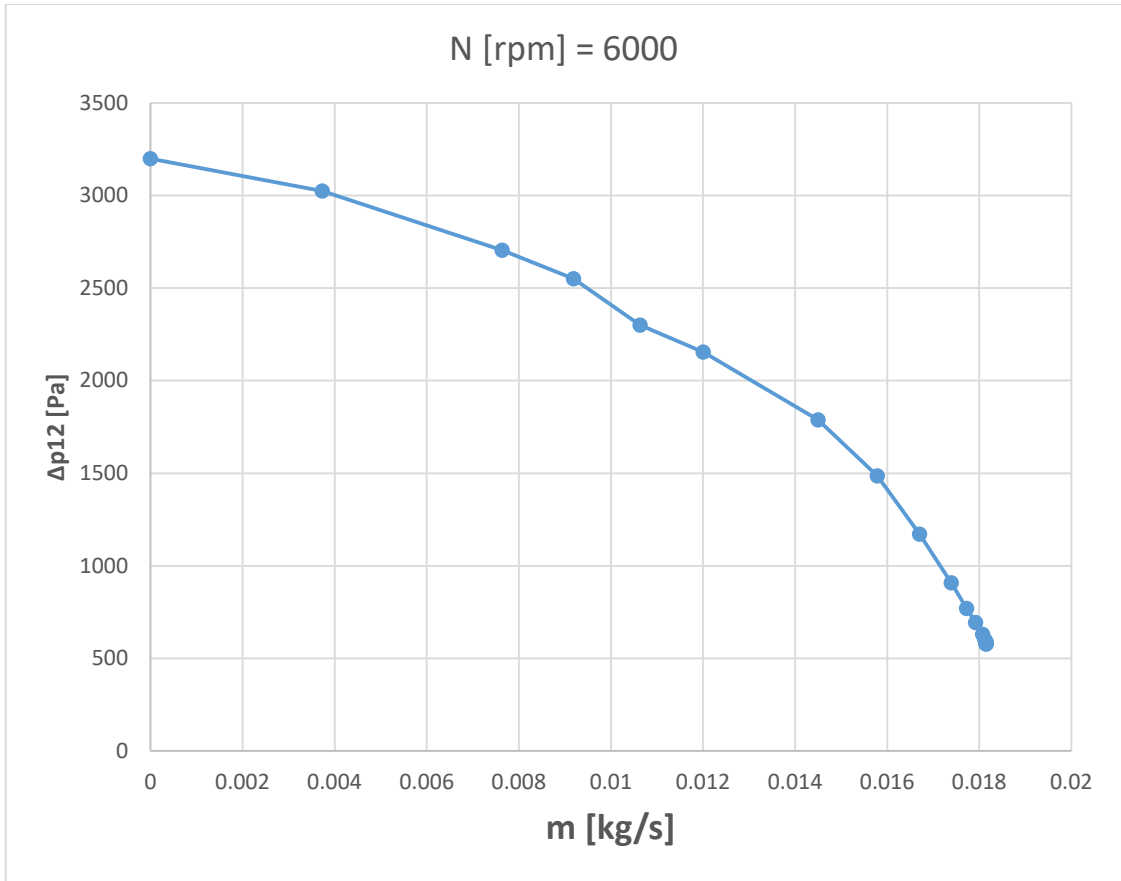


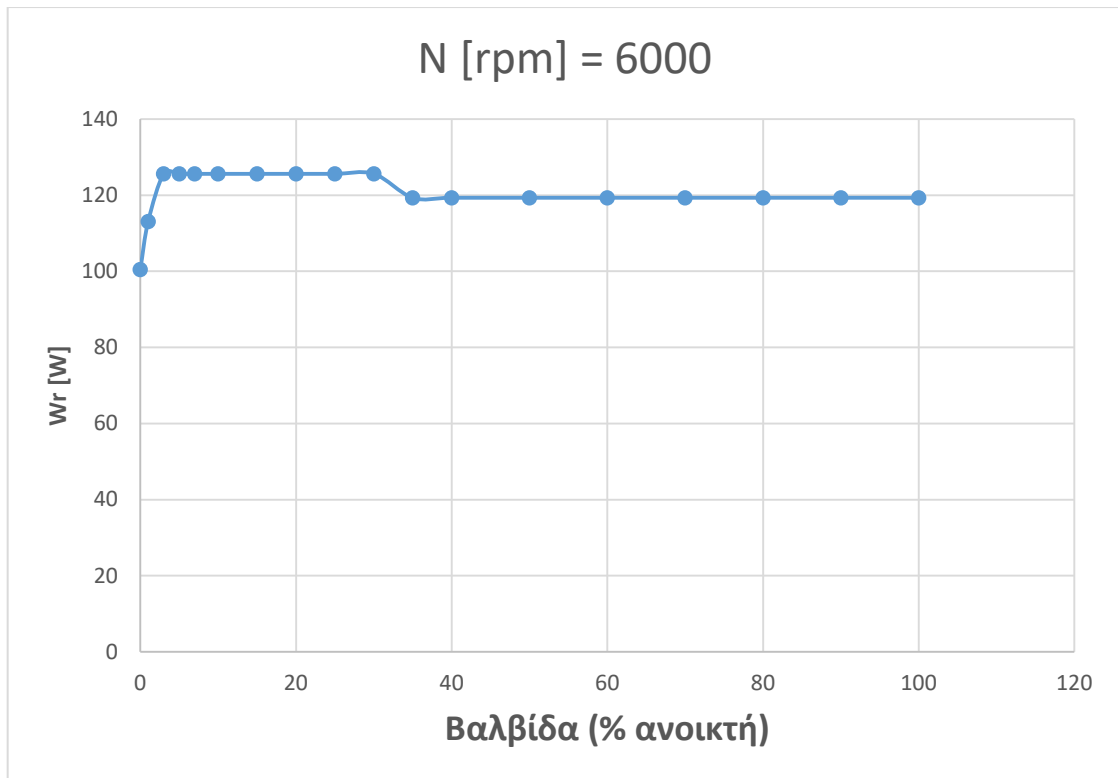
N[rpm]=	6000	Βαλβίδα (% ανοικτή)	P1 [Pa]	P2 [Pa]	T1 [C]	T2 [C]	Mr [Nm]
ω [rad/s]	628.000	100	-572	5	30.5	33.5	0.19
		90	-572	6	30.5	34	0.19
		80	-572	10	30.0	34	0.19
		70	-572	17	30.0	34	0.19
		60	-570	30	30.0	34	0.19
		50	-567	62	30.0	34	0.19
		40	-558	135	30.5	34	0.19
		35	-546	223	30.5	34	0.19
		30	-526	382	30.5	34.5	0.2
		25	-486	685	30.5	34.5	0.2
		20	-435	1050	30.5	34.5	0.2
		15	-368	1420	30.5	35	0.2
		10	-254	1900	30.5	36	0.2
		7	-200	2100	30.5	36.5	0.2
		5	-150	2400	30.5	37	0.2
		3	-104	2600	31.0	37.5	0.2
		1	-25	3000	30.5	38.5	0.18
		0	-0.000001	3200	31.0	39	0.16

P1 [kPa]	k	p1 [Pa]	p2 [Pa]	Δp_{12} [Pa]	V1 [m/s]	T2s [C]	m [kg/s]
0.572	0.941398	100753	101330	577	30.04887155	30.99558962	0.018151322
0.572	0.941398	100753	101331	578	30.04887155	30.99644678	0.018151322
0.572	0.941398	100753	101335	582	30.04887155	30.49905182	0.018151322
0.572	0.941398	100753	101342	589	30.04887155	30.50504169	0.018151322
0.57	0.941336	100755	101355	600	29.99530793	30.51444355	0.018118966
0.567	0.941243	100758	101387	629	29.91478686	30.53923713	0.018070327
0.558	0.940959	100767	101460	693	29.67194422	31.09489693	0.017923635
0.546	0.940571	100779	101548	769	29.34510742	31.159883	0.017726206
0.526	0.9399	100799	101707	908	28.79236281	31.27862439	0.017392315
0.486	0.938464	100839	102010	1171	27.65478929	31.50282698	0.016705153
0.435	0.936438	100890	102375	1485	26.13531437	31.76969404	0.015787299
0.368	0.933425	100957	102745	1788	23.99976938	32.02613748	0.014497301
0.254	0.92728	101071	103225	2154	19.87310982	32.33413613	0.012004551
0.2	0.923878	101125	103425	2300	17.60214978	32.45642559	0.010632755
0.15	0.92042	101175	103725	2550	15.21535874	32.66614002	0.00919099
0.104	0.916964	101221	103925	2704	12.64550594	33.29848132	0.007638645
0.025	0.910369	101300	104325	3025	6.177636346	33.06229003	0.003731663
1E-09	0.9081	101325	104525	3200	0.001233982	33.71268982	7.45399E-07

Wr [W]	Wc [W]	Ws [W]	Wt [W]	η_s [%]	η_t [%]	η_{os} [%]	η_{ot} [%]
119.32	54.6990089	9.036087	9.0287175	16.519654	16.50618	7.572986101	7.56681
119.32	63.8155104	9.0517155	9.0443205	14.184194	14.17261	7.58608409	7.579886
119.32	72.9320119	9.0992133	9.0917282	12.476295	12.46603	7.625891144	7.619618
119.32	72.9320119	9.2084266	9.2007608	12.626042	12.61553	7.717420859	7.710996
119.32	72.8020069	9.3631307	9.3551911	12.861089	12.85018	7.847075642	7.840422
119.32	72.6065732	9.78804	9.7793406	13.480928	13.46895	8.203184684	8.195894
119.32	63.0150208	10.710698	10.700214	16.997055	16.98042	8.976448111	8.967662
119.32	62.3209096	11.74986	11.737105	18.8538	18.83333	9.847351363	9.836662
125.6	69.882323	13.60302	13.585601	19.46561	19.44068	10.83043016	10.81656
125.6	67.1213033	16.827763	16.800023	25.070674	25.02935	13.39790083	13.37581
125.6	63.4333657	20.135242	20.093241	31.742351	31.67614	16.03124328	15.9978
125.6	65.5314259	22.224437	22.168746	33.914166	33.82918	17.69461517	17.65028
125.6	66.3221441	22.117062	22.0505	33.34793	33.24757	17.60912572	17.55613
125.6	64.0836143	20.895804	20.828742	32.607093	32.50245	16.6367865	16.58339
125.6	60.0102711	19.998561	19.927532	33.325231	33.20687	15.92242156	15.86587
125.6	49.8746203	17.63629	17.569952	35.361251	35.22824	14.04163191	13.98882
113.04	29.9876451	9.6046305	9.5643138	32.028625	31.89418	8.496665336	8.461
100.48	0.00599003	0.0020311	0.0020221	33.908623	33.75823	0.002021433	0.002012

Wf [W]	α_c [%]	α_f [%]		Qc [W]	Wf' [W]	Tm [C]
64.62099	45.84228	54.15772		49.5	15.12099	140.4927
55.50449	53.48266	46.51734		50.875	4.62949	123.9173
46.38799	61.12304	38.87696		49.5	-3.11201	107.3418
46.38799	61.12304	38.87696		49.5	-3.11201	107.3418
46.51799	61.01409	38.98591		49.5	-2.98201	107.5782
46.71343	60.8503	39.1497		49.5	-2.78657	107.9335
56.30498	52.81178	47.18822		50.875	5.429979	125.3727
56.99909	52.23006	47.76994		50.875	6.12409	126.6347
55.71768	55.63879	44.36121		52.25	3.467677	124.3049
58.4787	53.44053	46.55947		52.25	6.228697	129.3249
62.16663	50.50427	49.49573		52.25	9.916634	136.0302
60.06857	52.1747	47.8253		53.625	6.443574	132.2156
59.27786	52.80425	47.19575		56.375	2.902856	130.7779
61.51639	51.02199	48.97801		57.75	3.766386	134.848
65.58973	47.77888	52.22112		59.125	6.464729	142.2541
75.72538	39.70909	60.29091		61.875	13.85038	160.6825
83.05235	26.52835	73.47165		63.25	19.80235	174.0043
100.474	0.005961	99.99404		66	34.47401	205.68



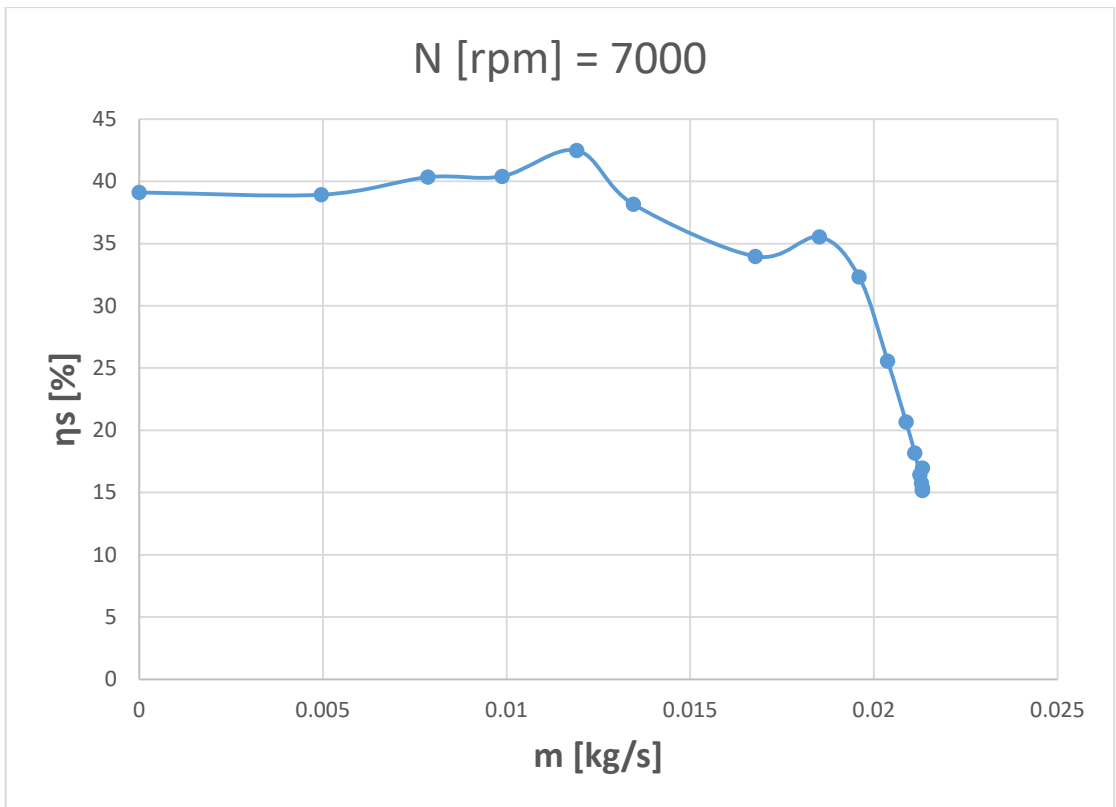
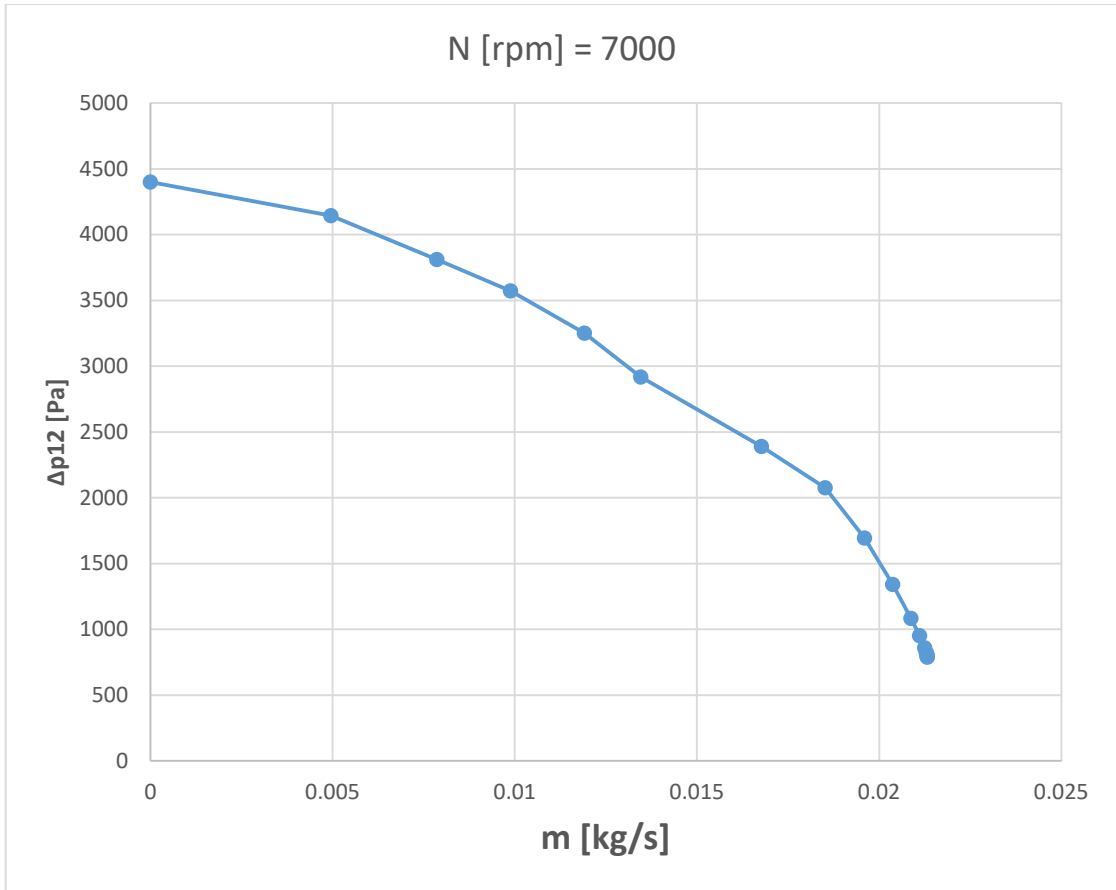


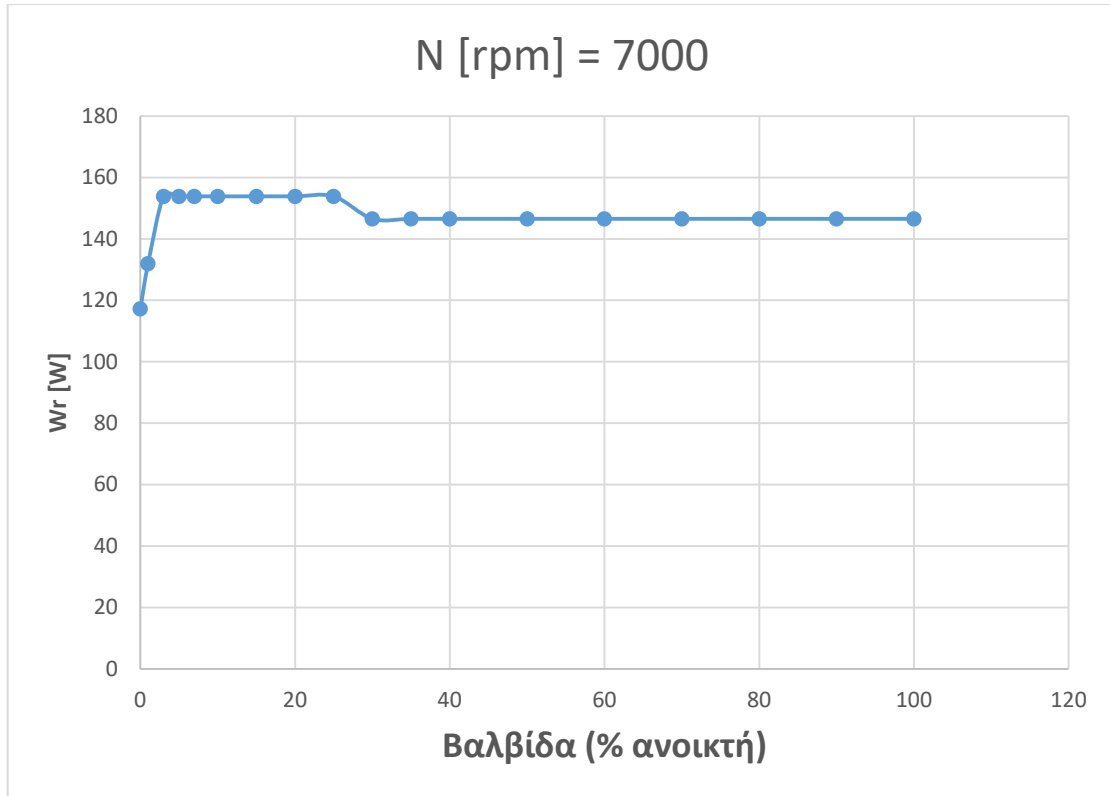
N[rpm]=	7000	Βαλβίδα (% ανοικτή)	P1 [Pa]	P2 [Pa]	T1 [C]	T2 [C]	Mr [Nm]
ω [rad/s]	732.667	100	-785	4	30.5	34.5	0.2
		90	-785	8	30.5	35	0.2
		80	-785	10	30.5	35	0.2
		70	-785	18	31.0	35.5	0.2
		60	-783	40	31.0	35.5	0.2
		50	-780	80	30.5	35	0.2
		40	-770	182	30.5	35	0.2
		35	-753	330	30.5	35	0.2
		30	-718	622	30.5	35	0.2
		25	-665	1030	31.0	35.5	0.21
		20	-595	1480	31.0	36	0.21
		15	-490	1900	30.5	36.5	0.21
		10	-318	2600	30.5	37	0.21
		7	-250	3000	31.0	37.5	0.21
		5	-173	3400	31.0	38.5	0.21
		3	-110	3700	31.0	39	0.21
		1	-44	4100	31.0	40	0.18
		0	-0.000001	4400	31.0	40.5	0.16

P1 [kPa]	k	p1 [Pa]	p2 [Pa]	Δp_{12} [Pa]	V1 [m/s]	T2s [C]	m [kg/s]
0.785	0.946456	100540	101329	789	35.29625339	31.17860226	0.021321056
0.785	0.946456	100540	101333	793	35.29625339	31.18203295	0.021321056
0.785	0.946456	100540	101335	795	35.29625339	31.18374825	0.021321056
0.785	0.946456	100540	101343	803	35.29625339	31.69174697	0.021321056
0.783	0.946421	100542	101365	823	35.25061168	31.70891193	0.021293485
0.78	0.946369	100545	101405	860	35.18203688	31.23944587	0.021252062
0.77	0.946189	100555	101507	952	34.95247265	31.3182027	0.021113391
0.753	0.945872	100572	101655	1083	34.55868396	31.4302053	0.020875519
0.718	0.945167	100607	101947	1340	33.73339618	31.64950829	0.020376996
0.665	0.943961	100660	102355	1695	32.44376562	32.4538635	0.019597982
0.595	0.942088	100730	102805	2075	30.65827288	32.77621385	0.018519437
0.49	0.938613	100835	103225	2390	27.77057401	32.53814325	0.016775094
0.318	0.930895	101007	103925	2918	22.27960308	32.97966861	0.013458218
0.25	0.927039	101075	104325	3250	19.71344877	33.76133886	0.011908106
0.173	0.922048	101152	104725	3573	16.35473102	34.03011986	0.009879239
0.11	0.91743	101215	105025	3810	13.00847222	34.22649936	0.007857898
0.044	0.912034	101281	105425	4144	8.203050946	34.50308531	0.004955135
1E-09	0.9081	101325	105725	4400	0.001233982	34.71465369	7.45399E-07

Wr [W]	Wc [W]	Ws [W]	Wt [W]	η_s [%]	η_t [%]	η_{os} [%]	η_{ot} [%]
146.533333	85.6680015	14.533625	14.517401	16.965057	16.94612	9.91830633	9.907235
146.533333	96.3765017	14.6071	14.590712	15.156288	15.13928	9.968448479	9.957265
146.533333	96.3765017	14.643837	14.627366	15.194406	15.17732	9.993519023	9.982279
146.533333	96.3765017	14.815145	14.798315	15.372155	15.35469	10.11042666	10.09894
146.533333	96.2518769	15.163134	15.145482	15.753598	15.73526	10.34790774	10.33586
146.533333	96.0646332	15.785466	15.766267	16.43213	16.41215	10.77261086	10.75951
146.533333	95.4378076	17.352772	17.329423	18.182282	18.15782	11.84220081	11.82627
146.533333	94.3625667	19.505902	19.476071	20.671229	20.63962	13.31158012	13.29122
146.533333	92.1091164	23.528932	23.484486	25.544629	25.49638	16.05705082	16.02672
153.86	88.5877772	28.621008	28.552786	32.308078	32.23107	18.60198098	18.55764
153.86	93.0138724	33.042506	32.94635	35.524277	35.4209	21.47569591	21.4132
153.86	101.103489	34.343899	34.229095	33.969054	33.8555	22.32152538	22.24691
153.86	87.8720669	33.522093	33.385893	38.148748	37.99375	21.78739972	21.69888
153.86	77.7510031	33.030287	32.881176	42.482136	42.29036	21.4677545	21.37084
153.86	74.4277182	30.069988	29.921115	40.401598	40.20157	19.54373301	19.44697
153.86	63.1460685	25.467594	25.333393	40.331242	40.11872	16.55244621	16.46522
131.88	44.7968992	17.436373	17.336676	38.92317	38.70062	13.22139317	13.1458
117.226667	0.00711316	0.0027814	0.0027645	39.101618	38.86465	0.002372634	0.002358

Wf [W]	α_c [%]	α_f [%]	Qc [W]	Wf' [W]	Tm [C]
60.86533	58.46315	41.53685	52.25	8.615332	133.6642
50.15683	65.77104	34.22896	53.625	-3.46817	114.1942
50.15683	65.77104	34.22896	53.625	-3.46817	114.1942
50.15683	65.77104	34.22896	56.375	-6.21817	114.1942
50.28146	65.68599	34.31401	56.375	-6.09354	114.4208
50.4687	65.55821	34.44179	53.625	-3.1563	114.7613
51.09553	65.13044	34.86956	53.625	-2.52947	115.901
52.17077	64.39666	35.60334	53.625	-1.45423	117.8559
54.42422	62.85881	37.14119	53.625	0.799217	121.9531
65.27222	57.57687	42.42313	56.375	8.897223	141.6768
60.84613	60.45358	39.54642	57.75	3.096128	133.6293
52.75651	65.71135	34.28865	57.75	-4.99349	118.9209
65.98793	57.1117	42.8883	59.125	6.862933	142.9781
76.109	50.5336	49.4664	61.875	14.234	161.38
79.43228	48.37366	51.62634	64.625	14.80728	167.4223
90.71393	41.04125	58.95875	66	24.71393	187.9344
87.0831	33.96792	66.03208	68.75	18.3331	181.3329
117.2196	0.006068	99.99393	70.125	47.09455	236.1265



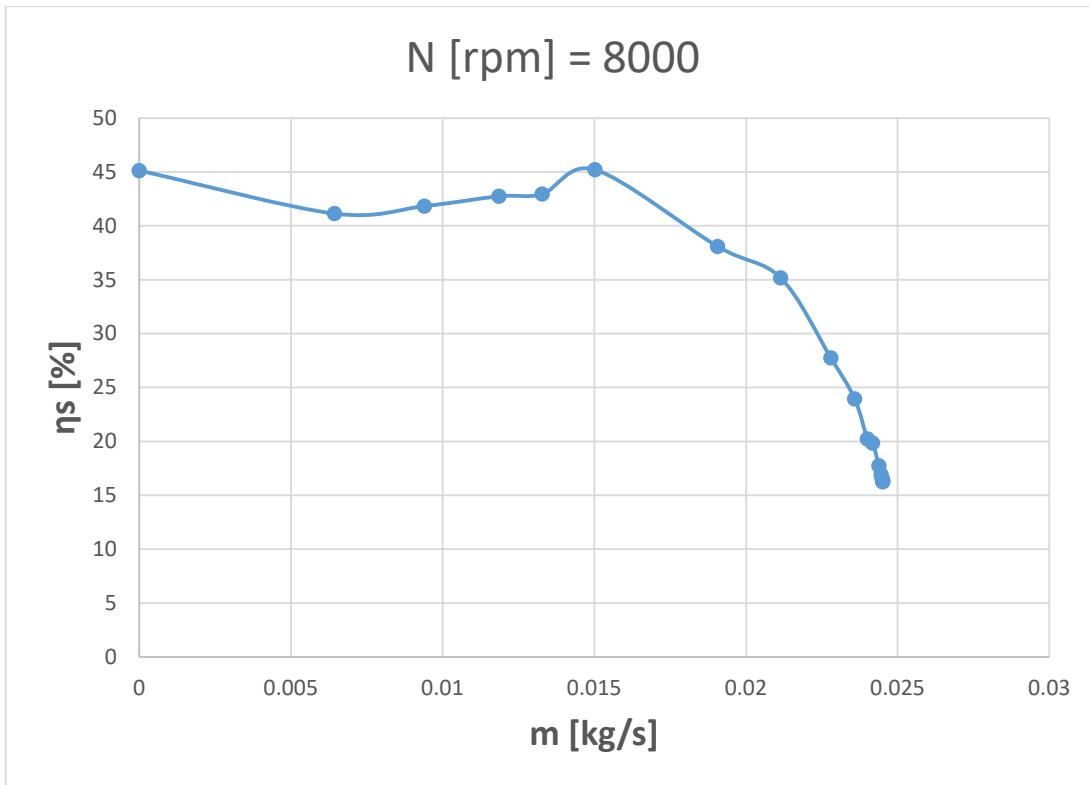
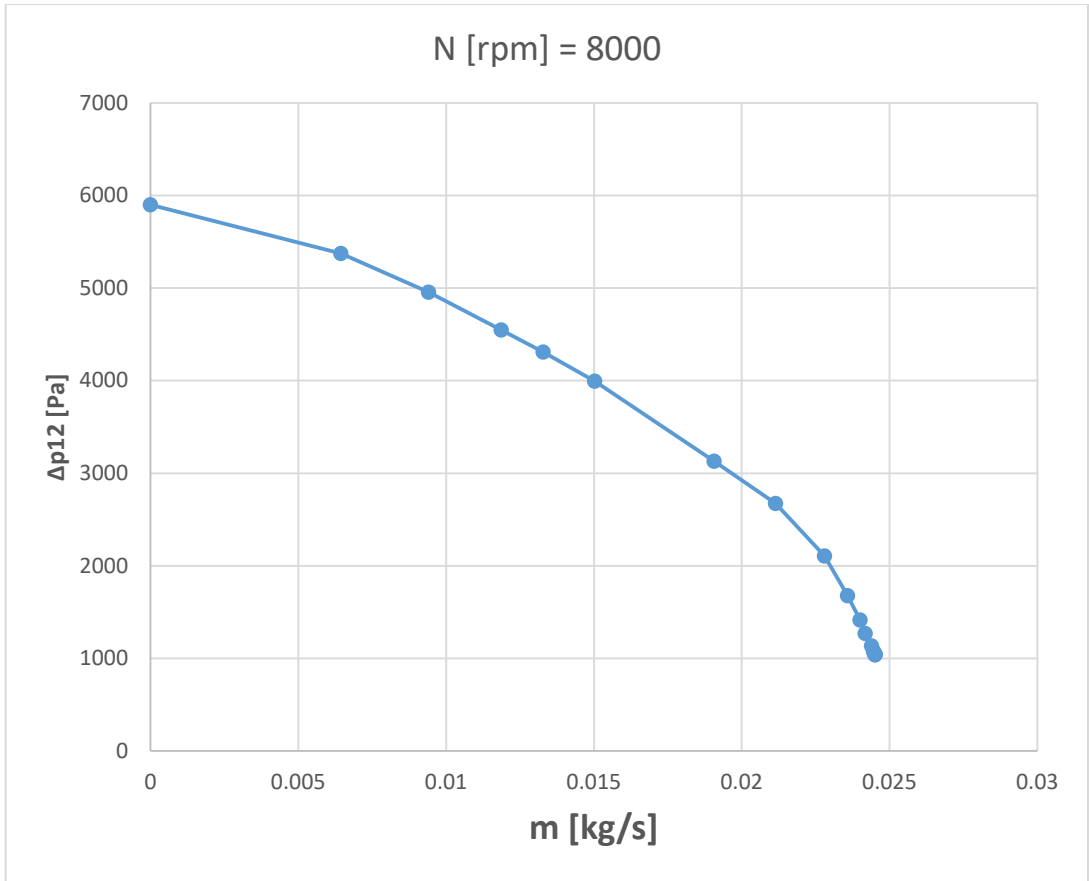


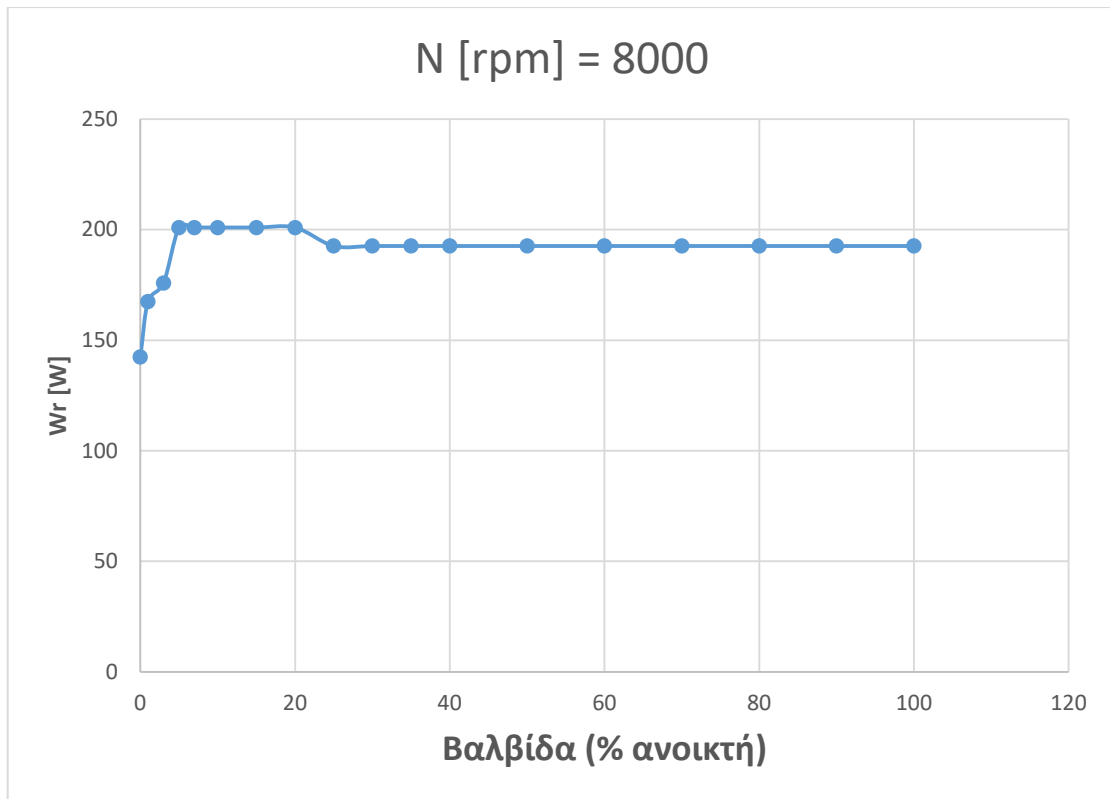
N[rpm]=	8000	Βαλβίδα (% ανοικτή)	P1 [Pa]	P2 [Pa]	T1 [C]	T2 [C]	Mr [Nm]
ω [rad/s]	837.333	100	-1034	4	30.0	35.5	0.23
		90	-1034	7	30.0	35.5	0.23
		80	-1034	14	30.0	35.5	0.23
		70	-1032	25	30.0	35.5	0.23
		60	-1030	50	30.0	35.5	0.23
		50	-1024	110	30.0	35.5	0.23
		40	-1006	265	30.0	35.5	0.23
		35	-992	422	30.0	36	0.23
		30	-958	718	30.0	36	0.23
		25	-896	1212	30.0	36.5	0.23
		20	-772	1900	31.0	37.5	0.24
		15	-630	2500	30.5	37.5	0.24
		10	-395	3600	31.0	38.5	0.24
		7	-310	4000	31.0	39.5	0.24
		5	-248	4300	31.0	40	0.24
		3	-157	4800	31.0	41	0.21
		1	-74	5300	31.0	42	0.2
		0	-0.000001	5900	31.5	42.5	0.17

P1 [kPa]	k	p1 [Pa]	p2 [Pa]	Δp_{12} [Pa]	V1 [m/s]	T2s [C]	m [kg/s]
1.034	0.949344	100291	101329	1038	40.57099713	30.89271153	0.024507317
1.034	0.949344	100291	101332	1041	40.57099713	30.89528213	0.024507317
1.034	0.949344	100291	101339	1048	40.57099713	30.90128	0.024507317
1.032	0.949331	100293	101350	1057	40.53145817	30.90897304	0.024483434
1.03	0.949318	100295	101375	1080	40.49187877	30.92865814	0.024459525
1.024	0.949277	100301	101435	1134	40.37289673	30.97484709	0.024387653
1.006	0.949146	100319	101590	1271	40.01372929	31.09189665	0.024170694
0.992	0.949036	100333	101747	1414	39.73203157	31.21396535	0.024000532
0.958	0.948739	100367	102043	1676	39.03909013	31.43709152	0.023581954
0.896	0.948078	100429	102537	2108	37.74152557	31.80366936	0.022798147
0.772	0.946226	100553	103225	2672	34.99850711	33.28648167	0.021141199
0.63	0.943066	100695	103825	3130	31.56347003	33.16602146	0.01906623
0.395	0.934689	100930	104925	3995	24.88145037	34.39043984	0.015029889
0.31	0.930467	101015	105325	4310	21.99251183	34.65079426	0.013284797
0.248	0.926918	101077	105625	4548	19.6331551	34.84693543	0.011859604
0.157	0.920923	101168	106125	4957	15.57058405	35.18334604	0.009405567
0.074	0.91456	101251	106625	5374	10.65284188	35.52520341	0.006434956
1E-09	0.9081	101325	107225	5900	0.001233982	36.4639003	7.45399E-07

Wr [W]	Wc [W]	Ws [W]	Wt [W]	η_s [%]	η_t [%]	η_{os} [%]	η_{ot} [%]
192.586667	135.396802	21.976416	21.944105	16.231119	16.20726	11.41118235	11.39441
192.586667	135.396802	22.039698	22.007201	16.277857	16.25386	11.44404137	11.42717
192.586667	135.396802	22.187351	22.154418	16.386909	16.36259	11.52070972	11.50361
192.586667	135.264849	22.354928	22.321463	16.526783	16.50204	11.60772344	11.59035
192.586667	135.132762	22.816753	22.781859	16.884693	16.85887	11.84752456	11.82941
192.586667	134.735685	23.881217	23.842882	17.724493	17.69604	12.40024398	12.38034
192.586667	133.537043	26.510664	26.463011	19.852666	19.81698	13.76557578	13.74083
192.586667	144.651206	29.266925	29.208453	20.232756	20.19233	15.19675577	15.16639
192.586667	142.128435	34.041928	33.961454	23.951525	23.8949	17.67616042	17.63437
192.586667	148.8548	41.30536	41.182907	27.748759	27.6665	21.44767395	21.38409
200.96	138.036174	48.556489	48.374795	35.176641	35.04501	24.16226576	24.07185
200.96	134.064199	51.059719	50.836763	38.086021	37.91972	25.40790156	25.29696
200.96	113.23143	51.187247	50.903912	45.205864	44.95564	25.47136082	25.33037
200.96	113.42892	48.718312	48.428099	42.950521	42.69467	24.24279043	24.09838
200.96	107.216751	45.828435	45.540893	42.743727	42.47554	22.80475487	22.66167
175.84	94.478924	39.523803	39.254329	41.83346	41.54824	22.47714016	22.32389
167.466667	71.1030453	29.250522	29.034954	41.138213	40.83504	17.46647419	17.33775
142.346667	0.00823629	0.0037167	0.0036868	45.126366	44.76249	0.002611047	0.00259

Wf [W]	α_c [%]	α_f [%]	Qc [W]	Wf' [W]	Tm [C]
57.18986	70.30435	29.69565	53.625	3.564865	126.9816
57.18986	70.30435	29.69565	53.625	3.564865	126.9816
57.18986	70.30435	29.69565	53.625	3.564865	126.9816
57.32182	70.23583	29.76417	53.625	3.696817	127.2215
57.4539	70.16725	29.83275	53.625	3.828905	127.4616
57.85098	69.96107	30.03893	53.625	4.225981	128.1836
59.04962	69.33868	30.66132	53.625	5.424624	130.363
47.93546	75.10967	24.89033	55	-7.06454	110.1554
50.45823	73.79973	26.20027	55	-4.54177	114.7422
43.73187	77.29237	22.70763	56.375	-12.6431	102.5125
62.92383	68.68838	31.31162	61.875	1.048826	137.407
66.8958	66.71188	33.28812	60.5	6.395801	144.6287
87.72857	56.34526	43.65474	64.625	23.10357	182.5065
87.53108	56.44353	43.55647	67.375	20.15608	182.1474
93.74325	53.35228	46.64772	68.75	24.99325	193.4423
81.36108	53.73005	46.26995	71.5	9.861076	170.9292
96.36362	42.45803	57.54197	74.25	22.11362	198.2066
142.3384	0.005786	99.99421	77	65.33843	281.7971



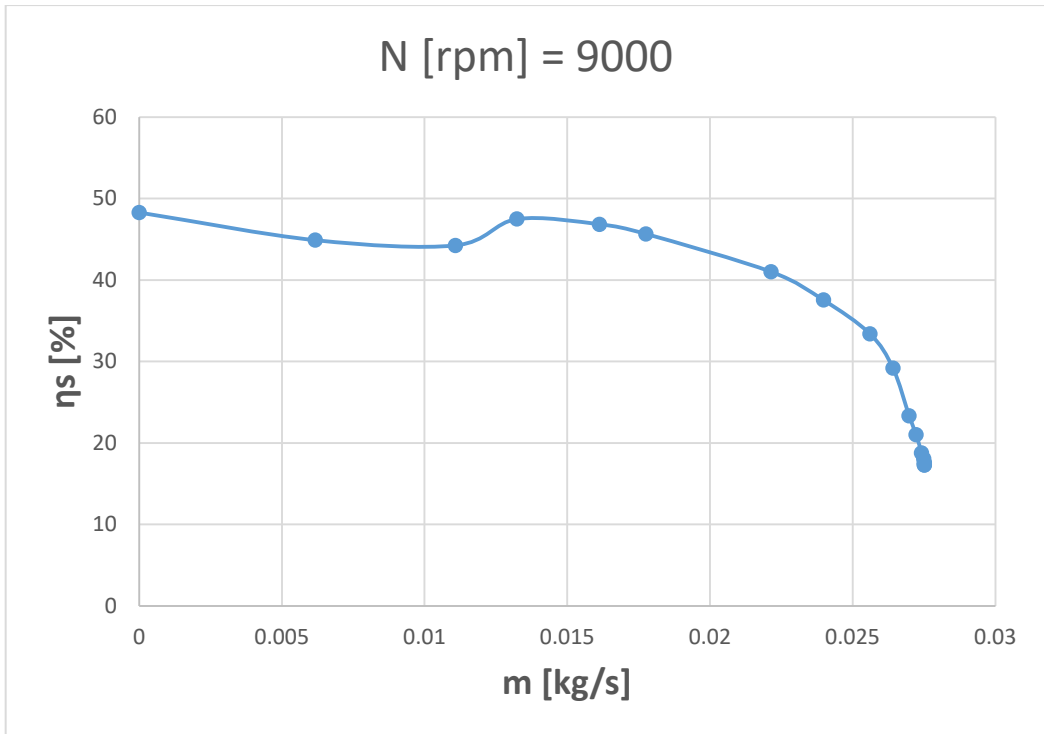
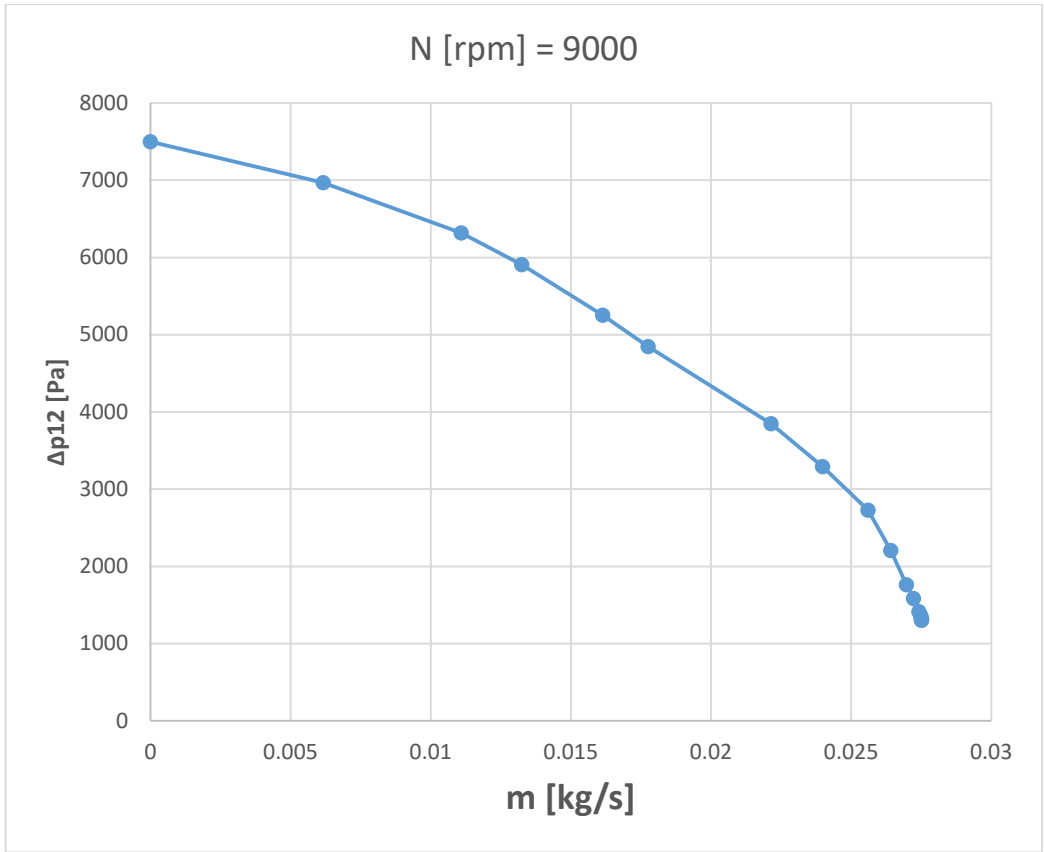


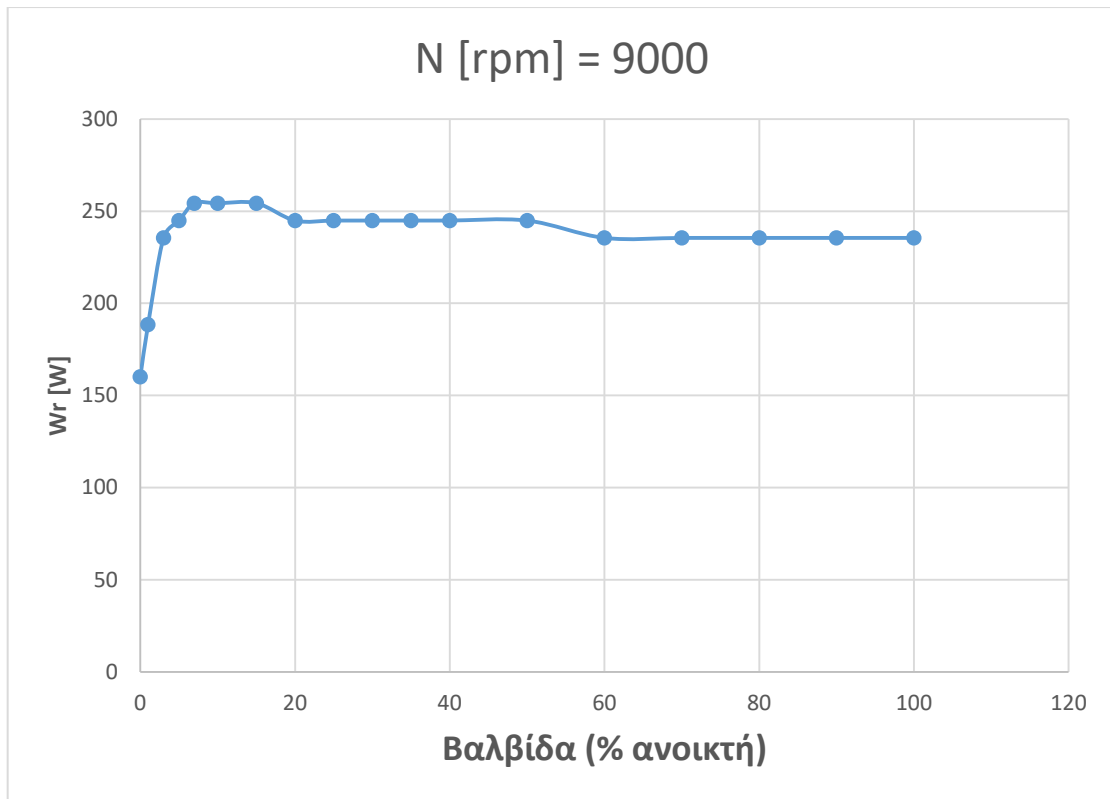
N[rpm]=	9000	Βαλβίδα (% ανοικτή)	P1 [Pa]	P2 [Pa]	T1 [C]	T2 [C]	Mr [Nm]
ω [rad/s]	942.000	100	-1302	2	30.0	36.5	0.25
		90	-1302	5	30.0	36.5	0.25
		80	-1302	15	30.0	36.5	0.25
		70	-1302	26	30.0	36.5	0.25
		60	-1300	62	30.5	37	0.25
		50	-1293	122	30.5	37	0.26
		40	-1275	310	30.5	37	0.26
		35	-1252	510	30.5	37	0.26
		30	-1200	1005	31.0	37.5	0.26
		25	-1128	1600	30.5	37.5	0.26
		20	-990	2300	31.0	38.5	0.26
		15	-846	3000	31.0	39	0.27
		10	-548	4300	31.0	40	0.27
		7	-454	4800	31.5	41	0.27
		5	-308	5600	31.5	42	0.26
		3	-217	6100	31.0	43	0.25
		1	-68	6900	31.0	44	0.2
		0	-0.000001	7500	31.5	44.5	0.17

P1 [kPa]	k	p1 [Pa]	p2 [Pa]	Δp_{12} [Pa]	V1 [m/s]	T2s [C]	m [kg/s]
1.302	0.950071	100023	101327	1304	45.54357536	31.12341566	0.027511053
1.302	0.950071	100023	101330	1307	45.54357536	31.12598826	0.027511053
1.302	0.950071	100023	101340	1317	45.54357536	31.13456322	0.027511053
1.302	0.950071	100023	101351	1328	45.54357536	31.14399498	0.027511053
1.3	0.950072	100025	101387	1362	45.50860615	31.67505557	0.02748993
1.293	0.950075	100032	101447	1415	45.38598617	31.72046744	0.02741586
1.275	0.950078	100050	101635	1585	45.06903388	31.86603174	0.027224402
1.252	0.950072	100073	101835	1762	44.66053003	32.01728574	0.026977641
1.2	0.950014	100125	102330	2205	43.72190032	32.89795096	0.026410652
1.128	0.949822	100197	102925	2728	42.38567001	32.83830858	0.025603489
0.99	0.94902	100335	103625	3290	39.69161879	33.81531741	0.02397612
0.846	0.947421	100479	104325	3846	36.66065539	34.28012176	0.022145236
0.548	0.940637	100777	105625	4848	29.39982596	35.10849188	0.01775926
0.454	0.937219	100871	106125	5254	26.71111214	35.94963779	0.016135115
0.308	0.930359	101017	106925	5908	21.92018025	36.48534925	0.013241105
0.217	0.924985	101108	107425	6317	18.34597064	36.3096992	0.011082067
0.068	0.914065	101257	108225	6968	10.20907644	36.83569641	0.006166895
1E-09	0.9081	101325	108825	7500	0.001233982	37.77629621	7.45399E-07

Wr [W]	Wc [W]	Ws [W]	Wt [W]	η_s [%]	η_t [%]	η_{os} [%]	η_{ot} [%]
235.5	179.626544	31.045426	30.988016	17.283318	17.25136	13.18277131	13.15839
235.5	179.626544	31.11652	31.058846	17.322896	17.29079	13.21295967	13.18847
235.5	179.626544	31.353488	31.294933	17.454819	17.42222	13.31358293	13.28872
235.5	179.626544	31.614133	31.554602	17.599923	17.56678	13.42426033	13.39898
235.5	179.488623	32.447555	32.384903	18.077778	18.04287	13.77815489	13.75155
244.92	179.005003	33.610735	33.543336	18.776422	18.73877	13.72314836	13.69563
244.92	177.754924	37.356749	37.27293	21.015873	20.96872	15.25263313	15.21841
244.92	176.143761	41.116987	41.014551	23.342858	23.2847	16.78792557	16.7461
244.92	172.44175	50.35169	50.195162	29.199246	29.10847	20.55842323	20.49451
244.92	180.030931	60.138267	59.907783	33.404408	33.27638	24.55424924	24.46014
244.92	180.630095	67.80414	67.492101	37.537565	37.36482	27.684199	27.55679
254.34	177.959119	72.965947	72.575109	41.001522	40.7819	28.68834917	28.53468
254.34	160.552586	73.292111	72.801265	45.64991	45.34419	28.81658826	28.6236
254.34	153.973369	72.118497	71.596643	46.838293	46.49937	28.35515327	28.14997
244.92	139.65724	66.308583	65.771625	47.479517	47.09503	27.07356799	26.85433
235.5	133.583241	59.107236	58.596982	44.247493	43.86552	25.09861384	24.88195
188.4	80.5303977	36.150073	35.807476	44.889972	44.46455	19.18793697	19.00609
160.14	0.0097338	0.0046994	0.0046516	48.279202	47.78837	0.002934556	0.002905

Wf [W]	α_c [%]	α_f [%]		Qc [W]	Wf' [W]	Tm [C]
55.87346	76.27454	23.72546		56.375	-0.50154	124.5881
55.87346	76.27454	23.72546		56.375	-0.50154	124.5881
55.87346	76.27454	23.72546		56.375	-0.50154	124.5881
55.87346	76.27454	23.72546		56.375	-0.50154	124.5881
56.01138	76.21598	23.78402		59.125	-3.11362	124.8389
65.915	73.08713	26.91287		59.125	6.789997	142.8454
67.16508	72.57673	27.42327		59.125	8.040076	145.1183
68.77624	71.9189	28.0811		59.125	9.651239	148.0477
72.47825	70.40738	29.59262		61.875	10.60325	154.7786
64.88907	73.50601	26.49399		60.5	4.389069	140.9801
64.2899	73.75065	26.24935		64.625	-0.3351	139.8907
76.38088	69.96899	30.03101		66	10.38088	161.8743
93.78741	63.12518	36.87482		68.75	25.03741	193.5226
100.3666	60.5384	39.4616		72.875	27.49163	205.4848
105.2628	57.02157	42.97843		75.625	29.63776	214.3868
101.9168	56.72324	43.27676		77	24.91676	208.3032
107.8696	42.74437	57.25563		79.75	28.1196	219.1265
160.1303	0.006078	99.99392		82.5	77.63027	314.1459



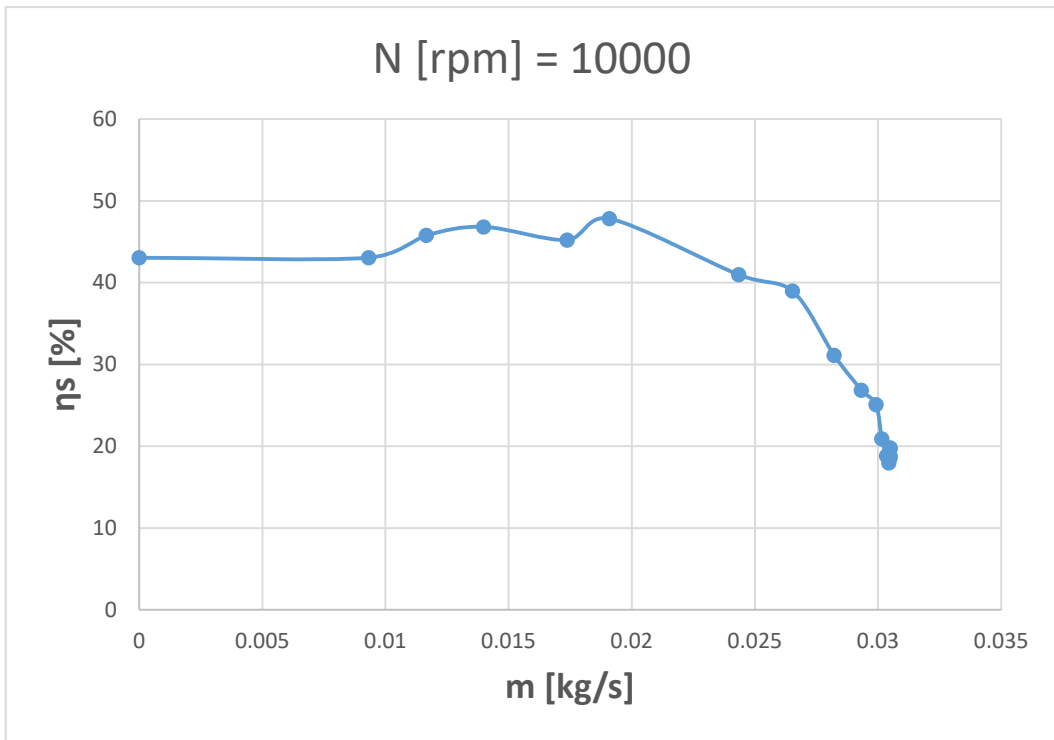
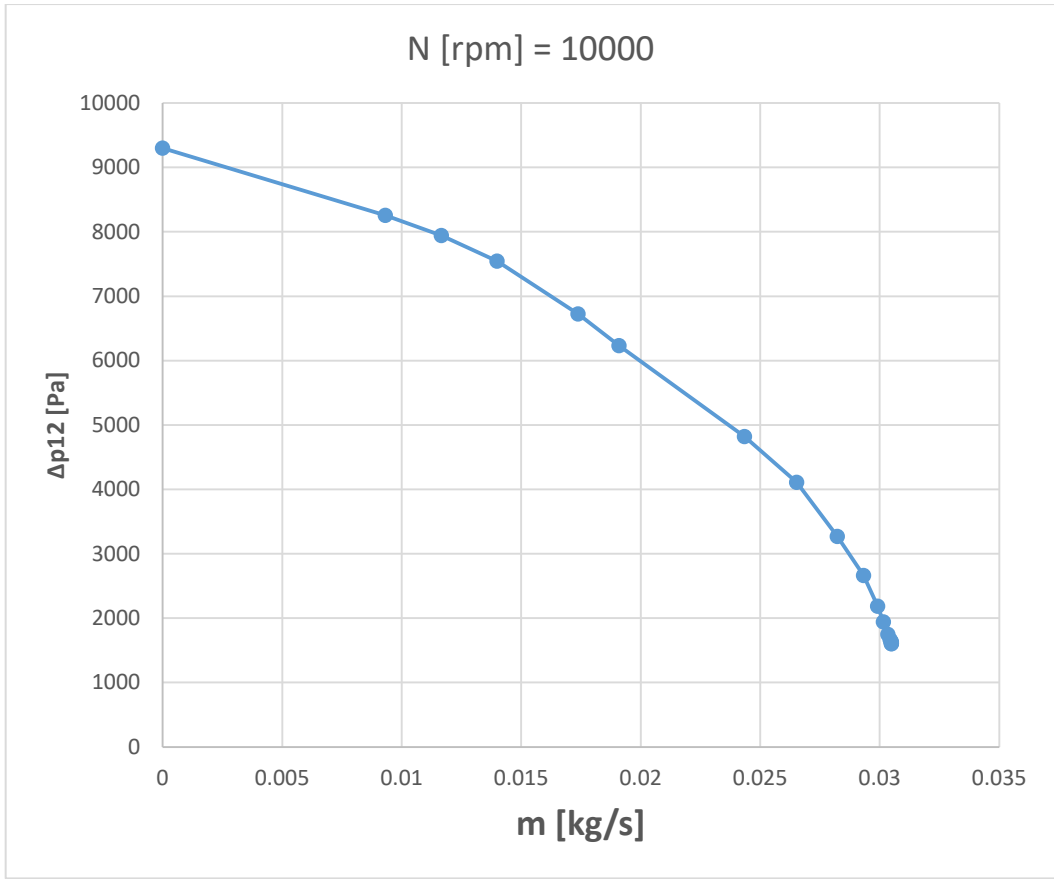


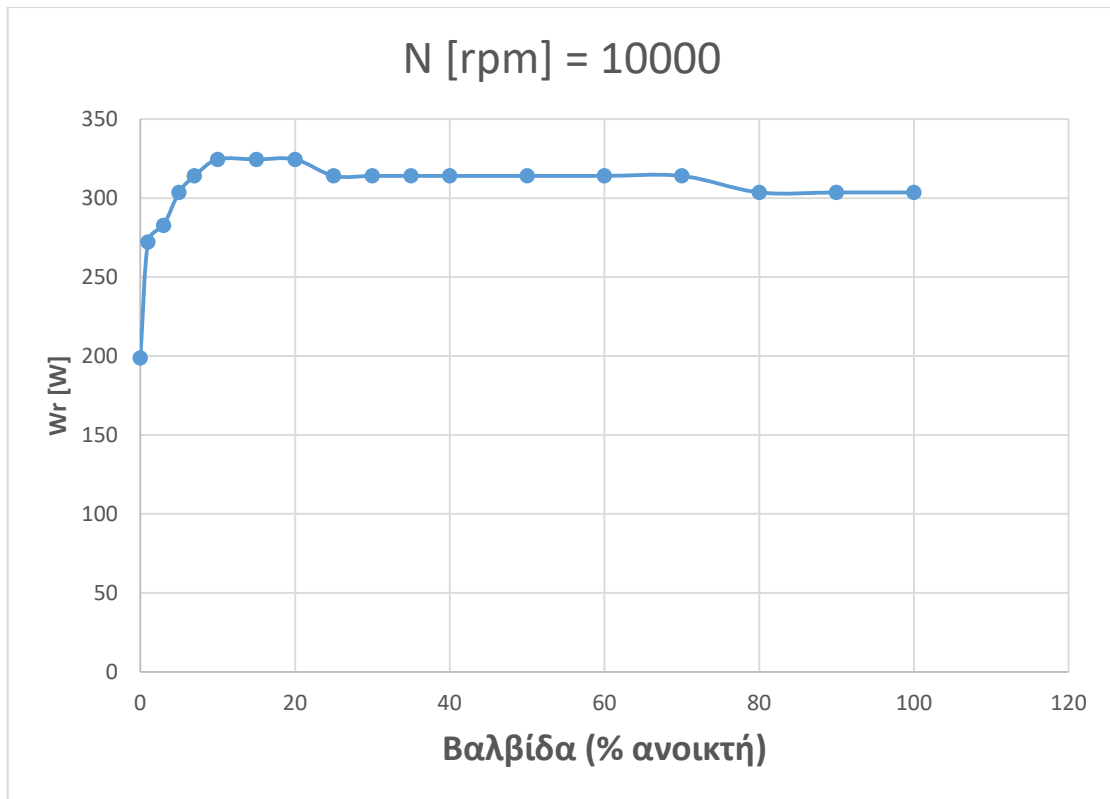
N[rpm]=	10000	Βαλβίδα (% ανοικτή)	P1 [Pa]	P2 [Pa]	T1 [C]	T2 [C]	Mr [Nm]
ω [rad/s]	1046.667	100	-1600	1	30.0	37	0.29
		90	-1600	5	30.5	37.5	0.29
		80	-1600	18	30.0	37.5	0.29
		70	-1600	35	30.5	38	0.3
		60	-1595	72	30.0	38	0.3
		50	-1585	162	30.0	38	0.3
		40	-1565	375	30.0	38	0.3
		35	-1540	643	30.5	38	0.3
		30	-1480	1180	30.0	38.5	0.3
		25	-1370	1900	30.0	39	0.3
		20	-1210	2900	30.5	39.5	0.31
		15	-1020	3800	30.5	40.5	0.31
		10	-632	5600	31.0	42	0.31
		7	-525	6200	30.5	43	0.3
		5	-343	7200	31.0	44.5	0.29
		3	-240	7700	31.0	45.5	0.27
		1	-154	8100	31.0	47	0.26
		0	-0.000001	9300	32.0	50	0.19

P1 [kPa]	k	p1 [Pa]	p2 [Pa]	Δp_{12} [Pa]	V1 [m/s]	T2s [C]	m [kg/s]
1.6	0.949201	99725	101326	1601	50.46410028	31.38193416	0.030483346
1.6	0.949201	99725	101330	1605	50.46410028	31.88765332	0.030483346
1.6	0.949201	99725	101343	1618	50.46410028	31.39652407	0.030483346
1.6	0.949201	99725	101360	1635	50.46410028	31.91344081	0.030483346
1.595	0.949225	99730	101397	1667	50.3858314	31.43849589	0.030436066
1.585	0.949273	99740	101487	1747	50.2288942	31.50695361	0.030341267
1.565	0.949365	99760	101700	1940	49.91340452	31.67196193	0.030150692
1.54	0.949473	99785	101968	2183	49.51596097	32.38241201	0.029910613
1.48	0.949703	99845	102505	2660	48.54764578	32.28475846	0.029325692
1.37	0.949993	99955	103225	3270	46.71581021	32.7996749	0.028219153
1.21	0.95003	100115	104225	4110	43.90406986	34.00886091	0.026520693
1.02	0.949249	100305	105125	4820	40.29337105	34.59730888	0.024339615
0.632	0.943119	100693	106925	6232	31.61442495	36.26089336	0.01909701
0.525	0.939866	100800	107525	6725	28.7644548	36.15243556	0.017375457
0.343	0.932191	100982	108525	7543	23.15490694	37.3218754	0.013986954
0.24	0.92643	101085	109025	7940	19.30880524	37.63920322	0.011663677
0.154	0.920708	101171	109425	8254	15.41930615	37.88885877	0.009314186
1E-09	0.9081	101325	110625	9300	0.001233982	39.74907303	7.45399E-07

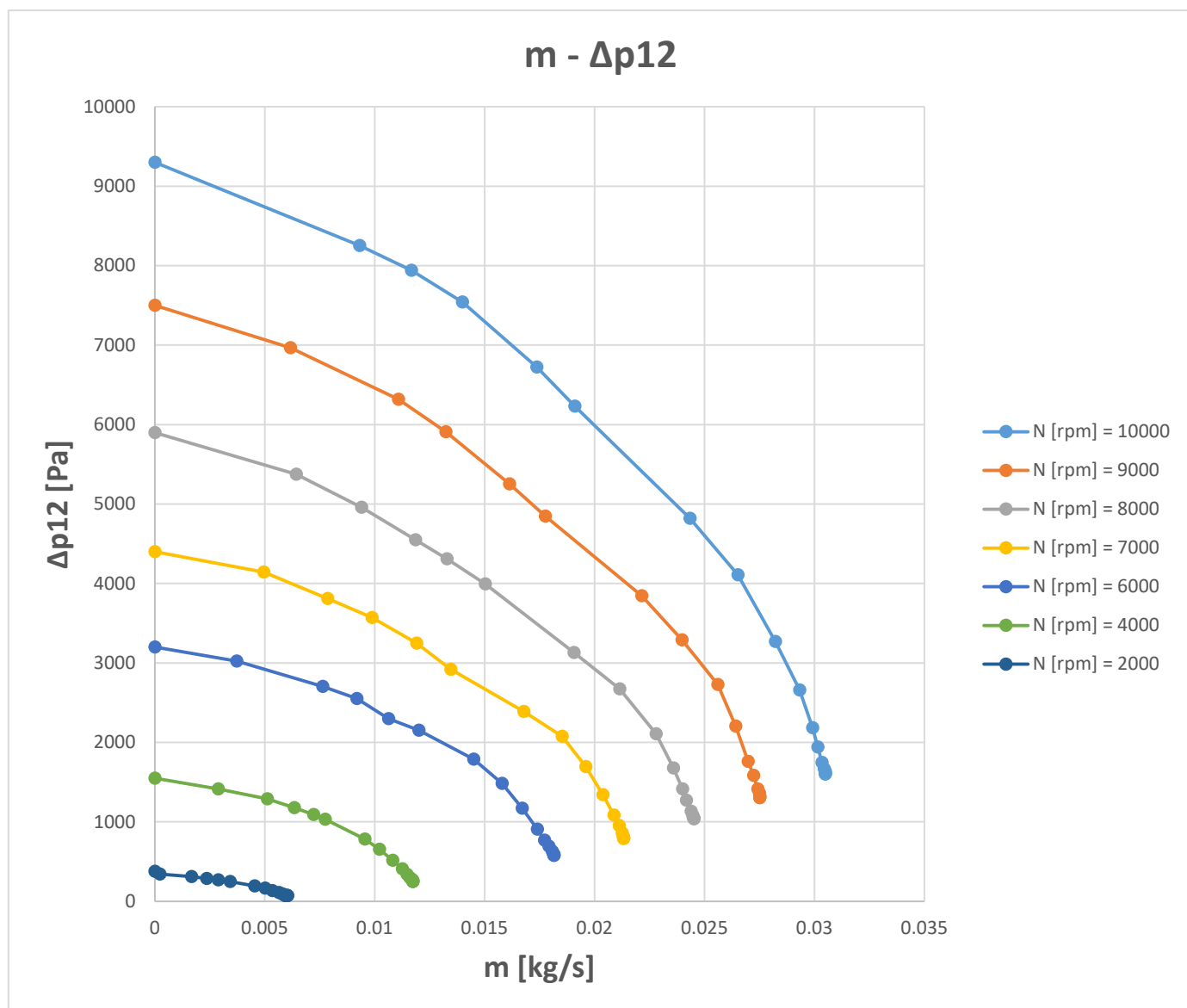
Wr [W]	Wc [W]	Ws [W]	Wt [W]	η_s [%]	η_t [%]	η_{os} [%]	η_{ot} [%]
303.533333	214.343644	42.315543	42.219339	19.741917	19.69703	13.94098725	13.90929
303.533333	214.343644	42.490667	42.393825	19.823619	19.77844	13.99868232	13.96678
303.533333	229.653905	42.762294	42.66405	18.620321	18.57754	14.08817071	14.0558
314	229.653905	43.280293	43.179824	18.845877	18.80213	13.78353295	13.75154
314	244.58423	43.979176	43.87511	17.981199	17.93865	14.00610704	13.97296
314	243.822421	45.928635	45.8148	18.83692	18.79023	14.62695371	14.5907
314	242.290963	50.637658	50.49846	20.899524	20.84207	16.12664272	16.08231
314	225.339077	56.557465	56.382792	25.098827	25.02131	18.01193142	17.9563
314	250.39009	67.303632	67.051151	26.879511	26.77868	21.43427784	21.35387
314	255.115256	79.359975	78.995581	31.107499	30.96466	25.27387754	25.15783
324.466667	239.760329	93.476183	92.939958	38.987343	38.76369	28.80917905	28.64392
324.466667	244.491429	100.17569	99.505519	40.973089	40.69898	30.87395425	30.66741
324.466667	211.012415	100.91944	100.05615	47.826303	47.41719	31.10317572	30.83711
314	218.170585	98.655614	97.748174	45.219484	44.80355	31.41898525	31.12999
303.533333	189.673581	88.821685	87.91074	46.828707	46.34844	29.26258017	28.96247
282.6	169.884376	77.785993	76.948758	45.787608	45.29478	27.52512135	27.22886
272.133333	149.697604	64.452853	63.733427	43.055367	42.57478	23.684292	23.41993
198.866667	0.01347756	0.0058021	0.0057297	43.050406	42.51261	0.002917606	0.002881

Wf [W]	α_c [%]	α_f [%]	Qc [W]	Wf' [W]	Tm [C]
89.18969	70.61618	29.38382	57.75	31.43969	185.1631
89.18969	70.61618	29.38382	60.5	28.68969	185.1631
73.87943	75.66019	24.33981	59.125	14.75443	157.3262
84.3461	73.13819	26.86181	61.875	22.4711	176.3565
69.41577	77.89307	22.10693	60.5	8.91577	149.2105
70.17758	77.65045	22.34955	60.5	9.677579	150.5956
71.70904	77.16273	22.83727	60.5	11.20904	153.3801
88.66092	71.76404	28.23596	61.875	26.78592	184.2017
63.60991	79.74207	20.25793	61.875	1.73491	138.6544
58.88474	81.2469	18.7531	63.25	-4.36526	130.0632
84.70634	73.89367	26.10633	66	18.70634	177.0115
79.97524	75.35179	24.64821	68.75	11.22524	168.4095
113.4543	65.03362	34.96638	74.25	39.20425	229.2805
95.82942	69.48108	30.51892	75.625	20.20442	197.2353
113.8598	62.48855	37.51145	81.125	32.73475	230.0177
112.7156	60.11478	39.88522	83.875	28.84062	227.9375
122.4357	55.00892	44.99108	88	34.43573	245.6104
198.8532	0.006777	99.99322	99	99.85319	384.5513





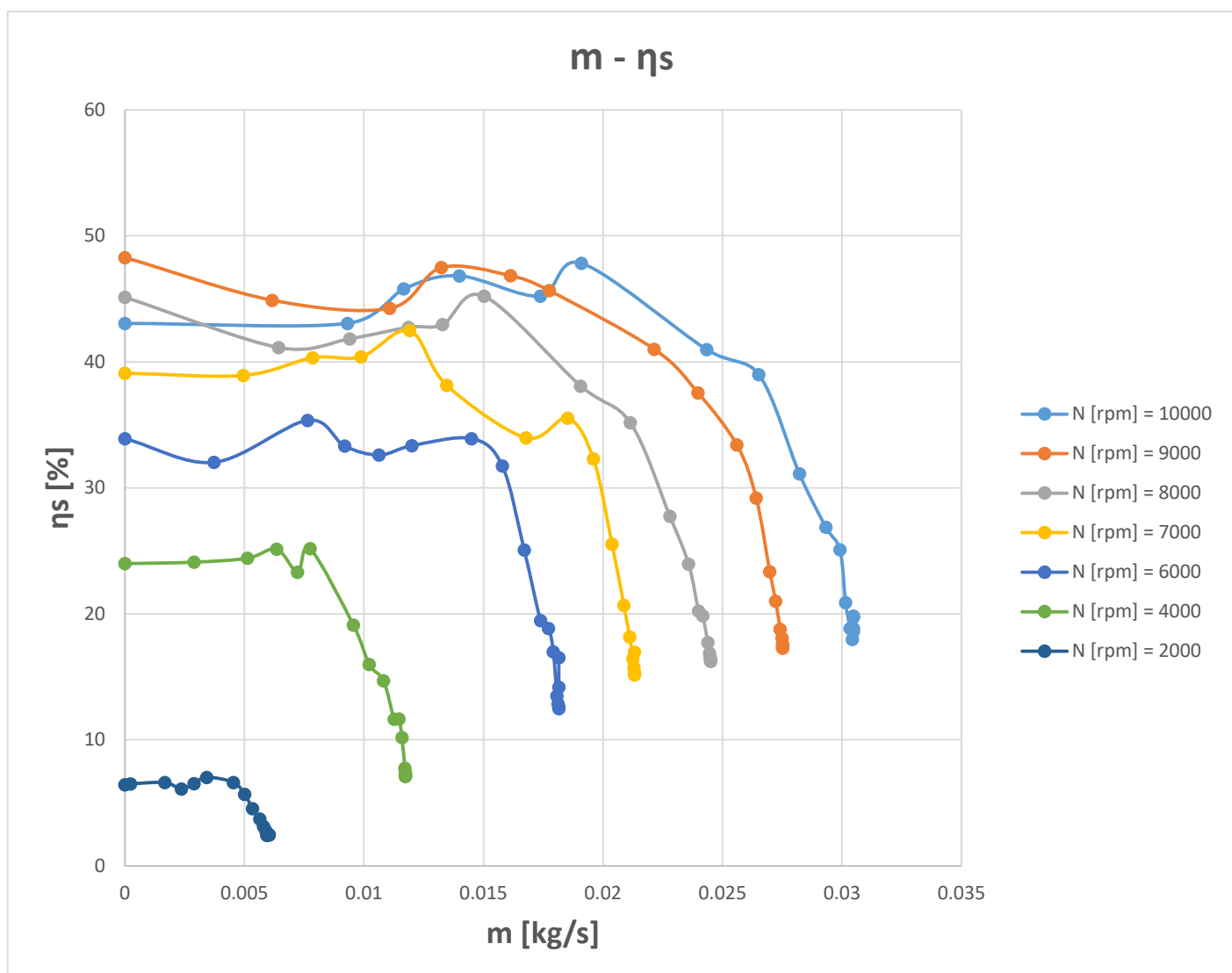
Συνοπτικό διάγραμμα $m - \Delta p_{12}$ για όλες τις στροφές



Σχόλια:

- Για μεγαλύτερες στροφές επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη διαφορά πίεσης
- Όσο μειώνεται η παροχή μάζας, αυξάνεται η διαφορά πίεσης
- Οι καμπύλες φαίνονται να τείνουν στο μηδέν αλλά δεν το φτάνουν λόγω διαρροής αέρα ακόμη και στη τελείως κλειστή θέση
- Οι καμπύλες έχουν ελλειπτική μορφή
- Οι καμπύλες πλησιάζουν τις θεωρητικές

Συνοπτικό διάγραμμα $m - \eta_s$ για όλες τις στροφές



Σχόλια:

- Ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται στη μεγαλύτερη ομάδα στροφών (10000 rpm), αλλά αρκετά κοντά στον μέγιστο βαθμό απόδοσης έρχεται και η αμέσως προηγούμενη ομάδα (9000 rpm)
- Επίσης, παρατηρείται ξανά η αύξηση του βαθμού απόδοσης για μικρές παροχές μάζας

Κεφάλαιο 5: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Πρώτη Προσέγγιση

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρατέθηκαν τα πραγματικά αποτελέσματα καθώς και η διαγραμματική απεικόνιση των σχετικών καμπυλών. Σε αυτό το κεφάλαιο, ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας προσέγγισης των πραγματικών δεδομένων μέσω μαθηματικών σχέσεων. Μια διαδικασία που απλοποιεί τον υπολογισμό της διαφοράς πίεσης, χωρίς τη χρήση του συμπιεστή.

Πιο συγκεκριμένα:

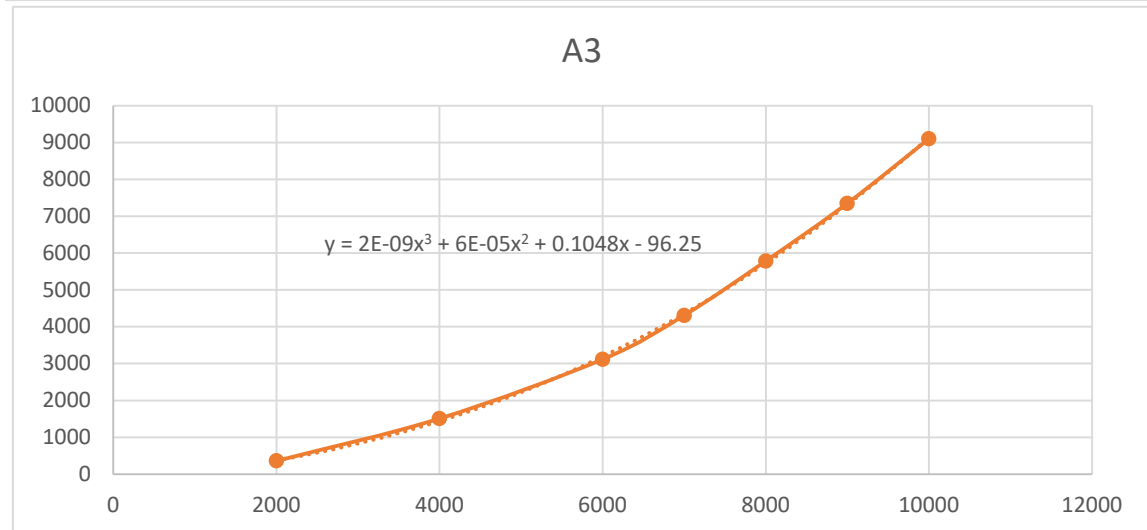
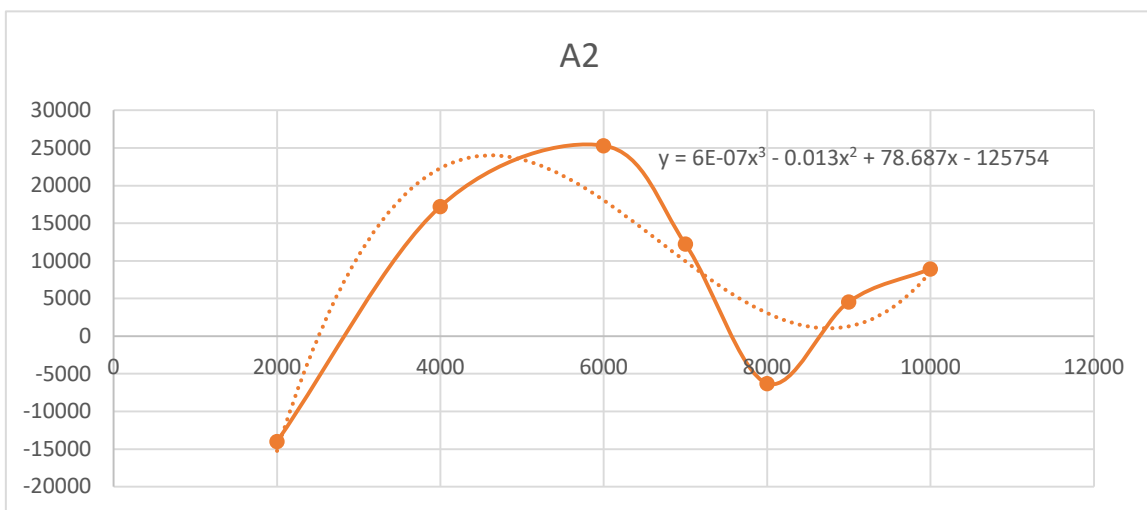
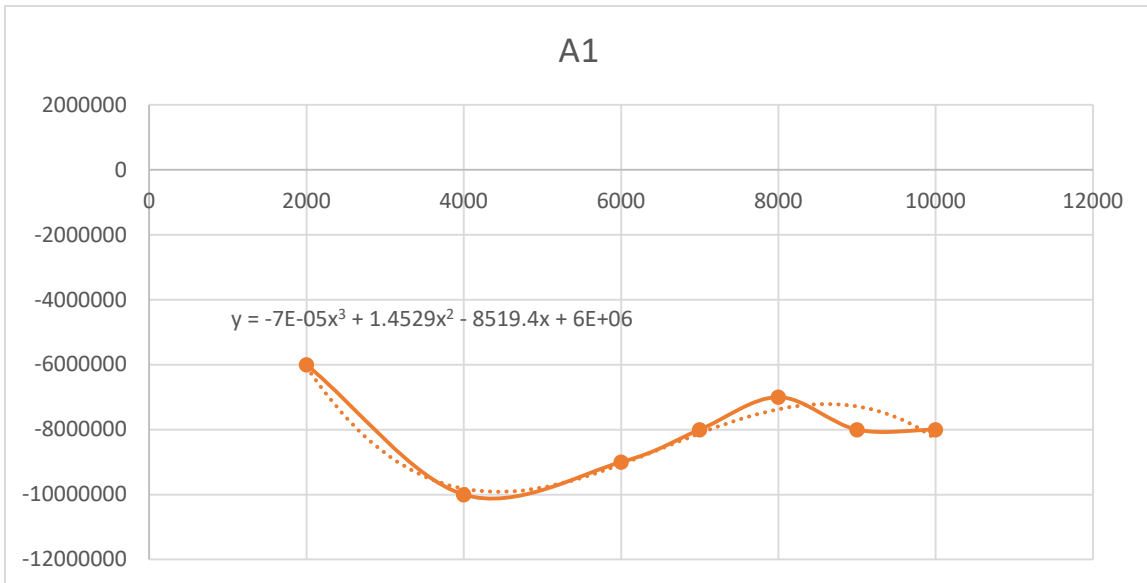
- Για κάθε καμπύλη $\Delta p - m$ κατασκευάζεται πολυώνυμο δευτέρου βαθμού που την προσεγγίζει. Δηλαδή, για την i - καμπύλη:

$$A_1 m^2 + A_2 m + A_3 = A1(N_i)m^2 + A2(N_i)m + A3(N_i)$$

- Δημιουργείται πίνακας με τους συντελεστές $A1, A2, A3$ για τις διάφορες στροφές

N	A1	A2	A3
2000	-6000000	-13984	358.75
4000	-10000000	17227	1508.5
6000	-9000000	25308	3118.1
7000	-8000000	12223	4311.4
8000	-7000000	-6282.2	5785.9
9000	-8000000	4562.1	7350.7
10000	-8000000	8934.1	9102.2

- Γίνονται νέα διαγράμματα με τους συντελεστές A1, A2, A3 συναρτήσεων των στροφών και ακολουθείται η ίδια διαδικασία προσέγγισης με πολυώνυμο τρίτου βαθμού αυτή τη φορά



- Ο νέος πίνακας με τους συντελεστές που σχηματίζεται, παρουσιάζεται παρακάτω

Δp	α	β	γ	δ
1	-7.00E-05	1.4529	-8519.4	6.00E+06
2	6.00E-07	-0.013	78.687	-125754
3	2.00E-09	6.00E-05	0.1048	-96.25

- Καταγραφή ενιαίου πολυωνύμου, για οποιοσδήποτε στροφές και οποιαδήποτε παροχή μάζας, της μορφής

$$\Delta p = f(m, N) = A_1(N)m^2 + A_2(N)m + A_3(N)$$

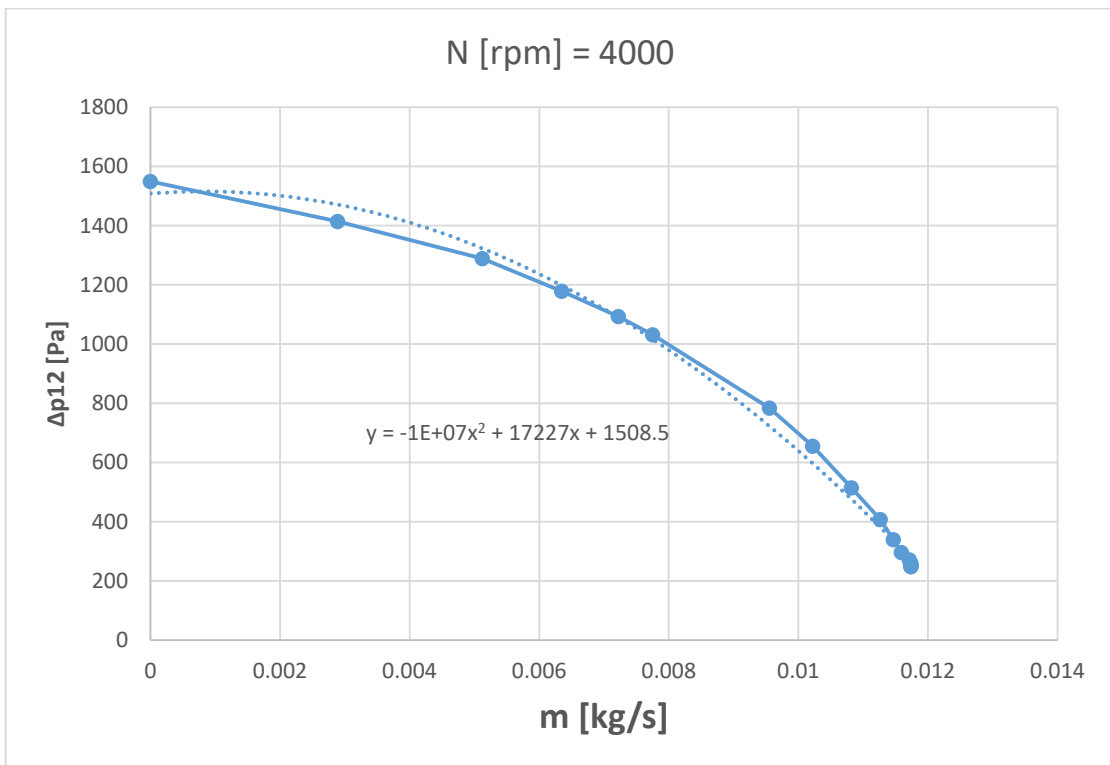
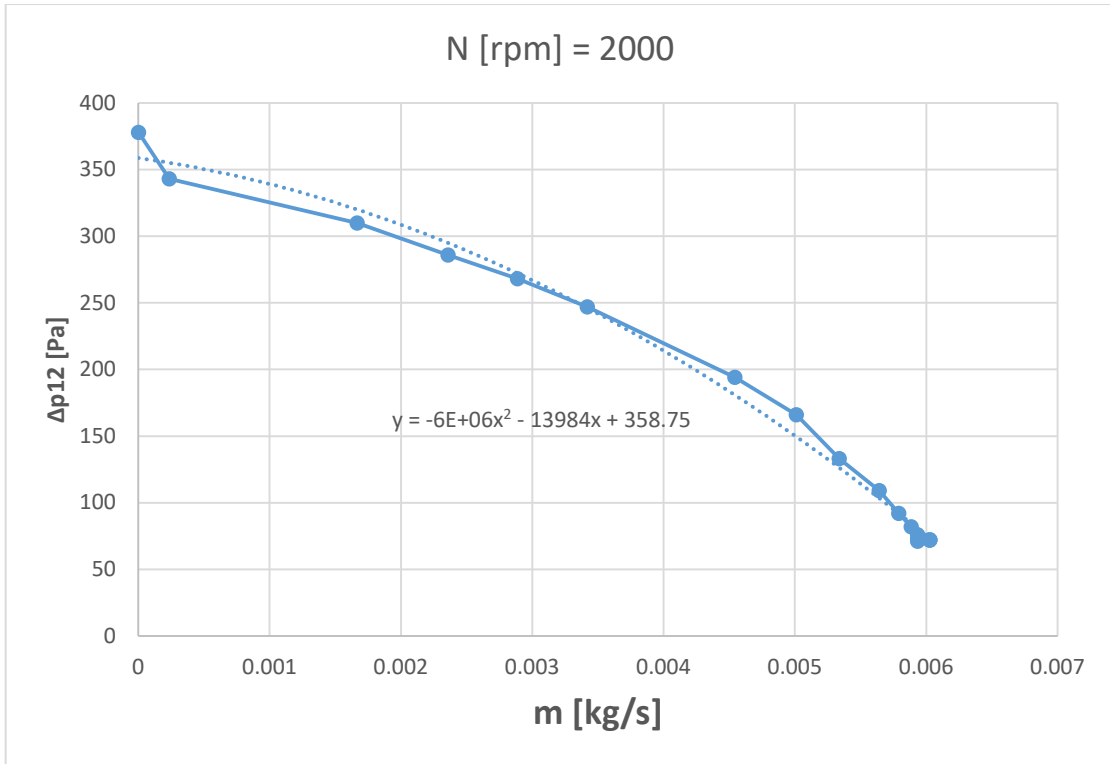
$$A_1(N) = \alpha_1 N^3 + \beta_1 N^2 + \gamma_1 N + \delta_1$$

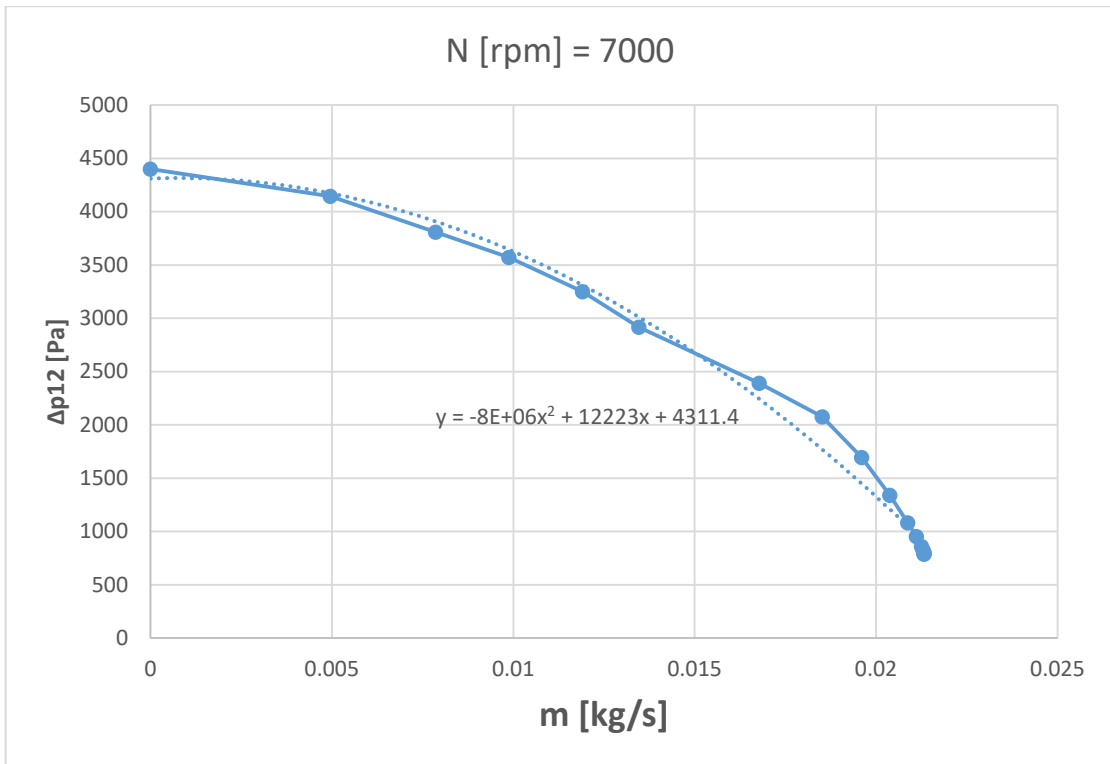
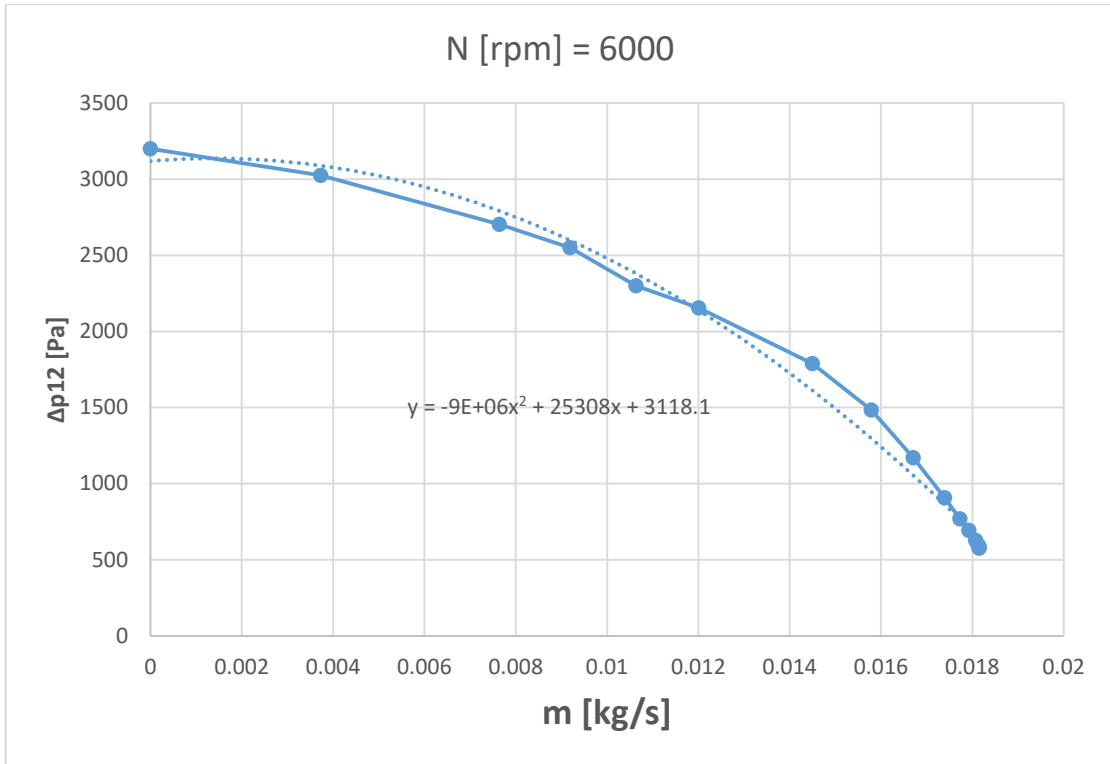
$$A_2(N) = \alpha_2 N^3 + \beta_2 N^2 + \gamma_2 N + \delta_2$$

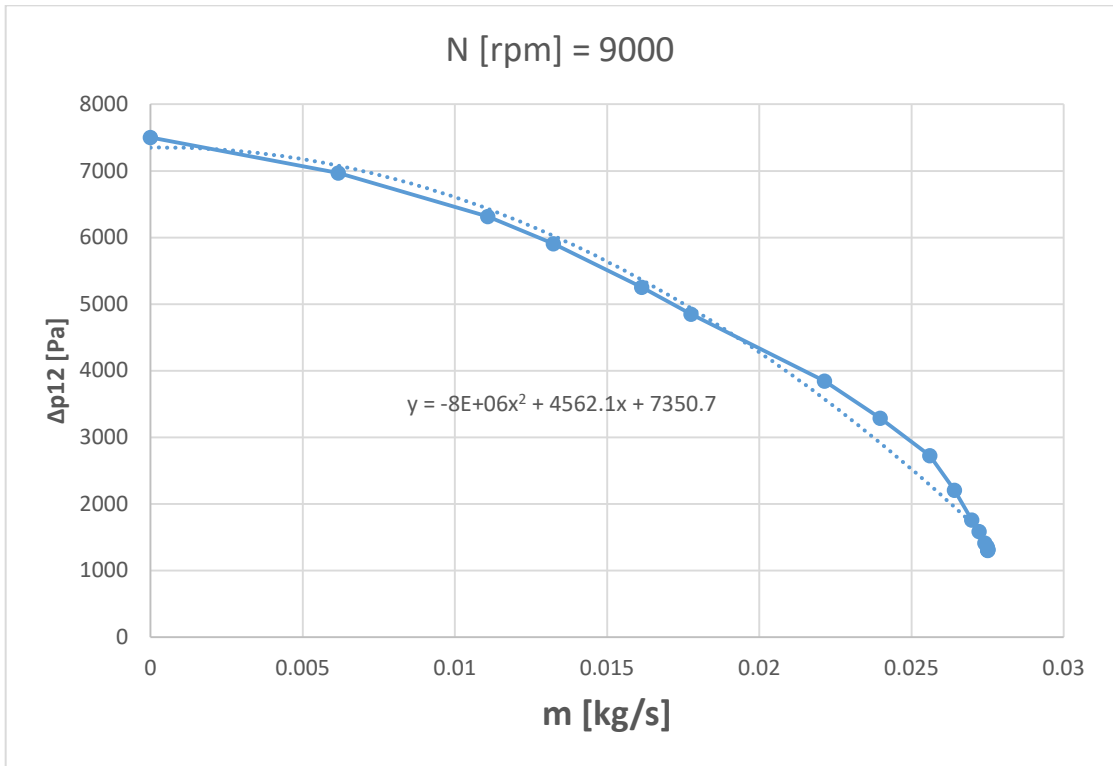
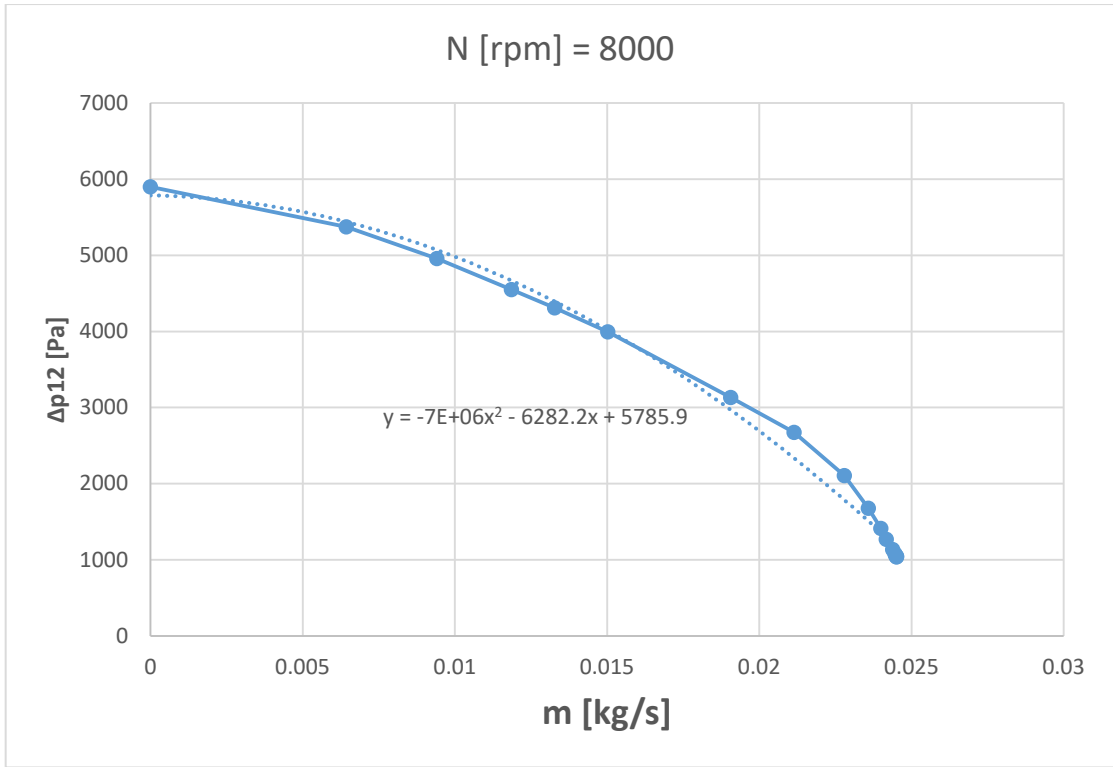
$$A_3(N) = \alpha_3 N^3 + \beta_3 N^2 + \gamma_3 N + \delta_3$$

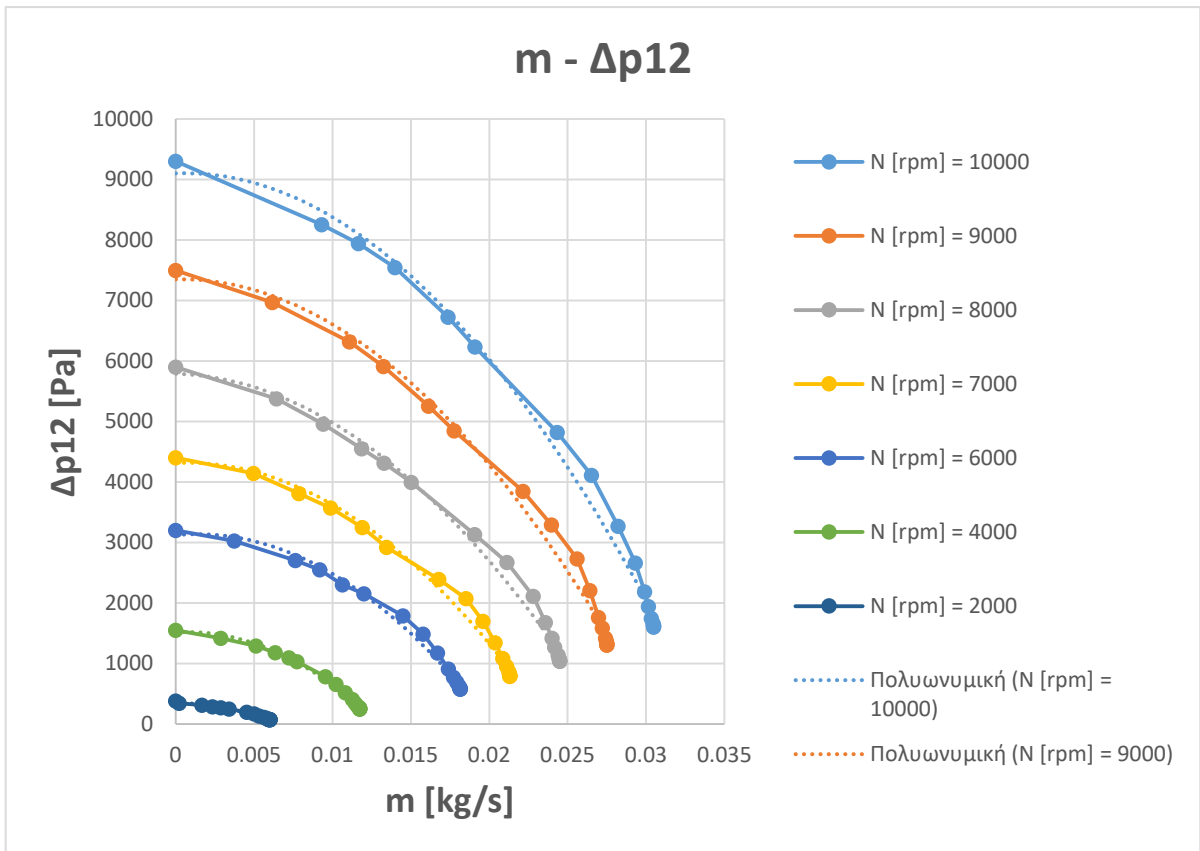
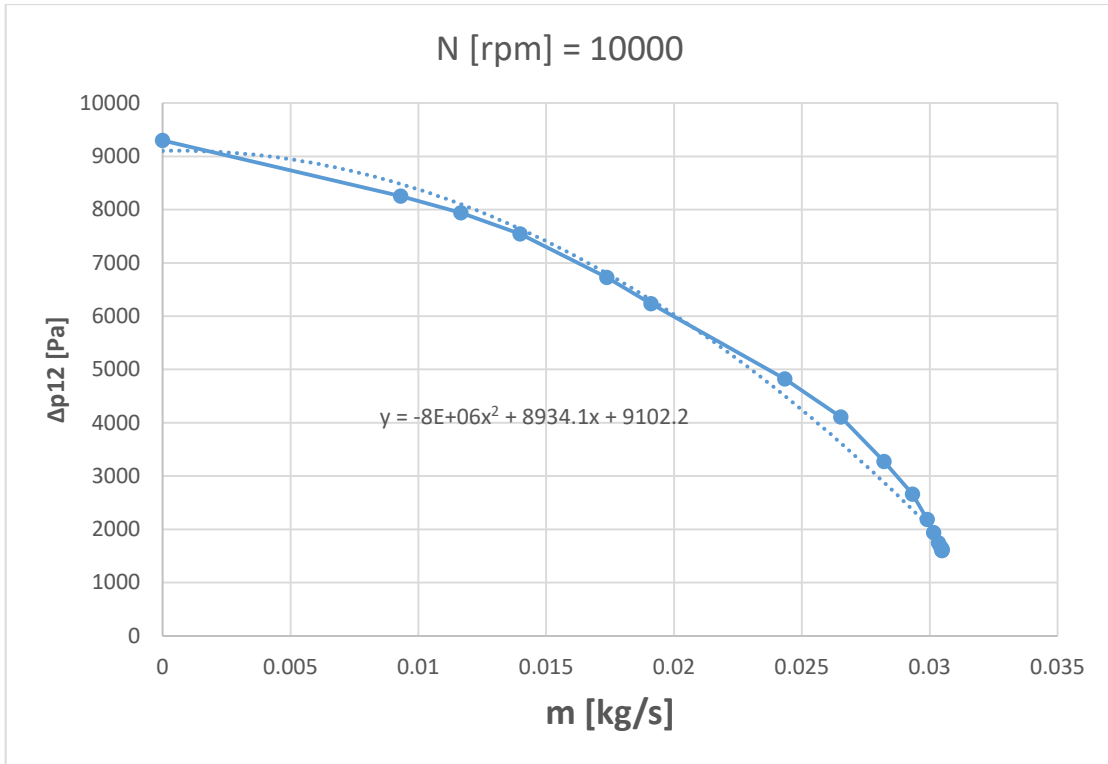
Άρα, για κάθε m και N , υπάρχει εκτίμηση του Δp , χωρίς τη διαδικασία του πειράματος.

Παρακάτω είναι τα διαγράμματα απο τα πειραματικά δεδομένα και οι καμπύλες που τα προσεγγίζουν:





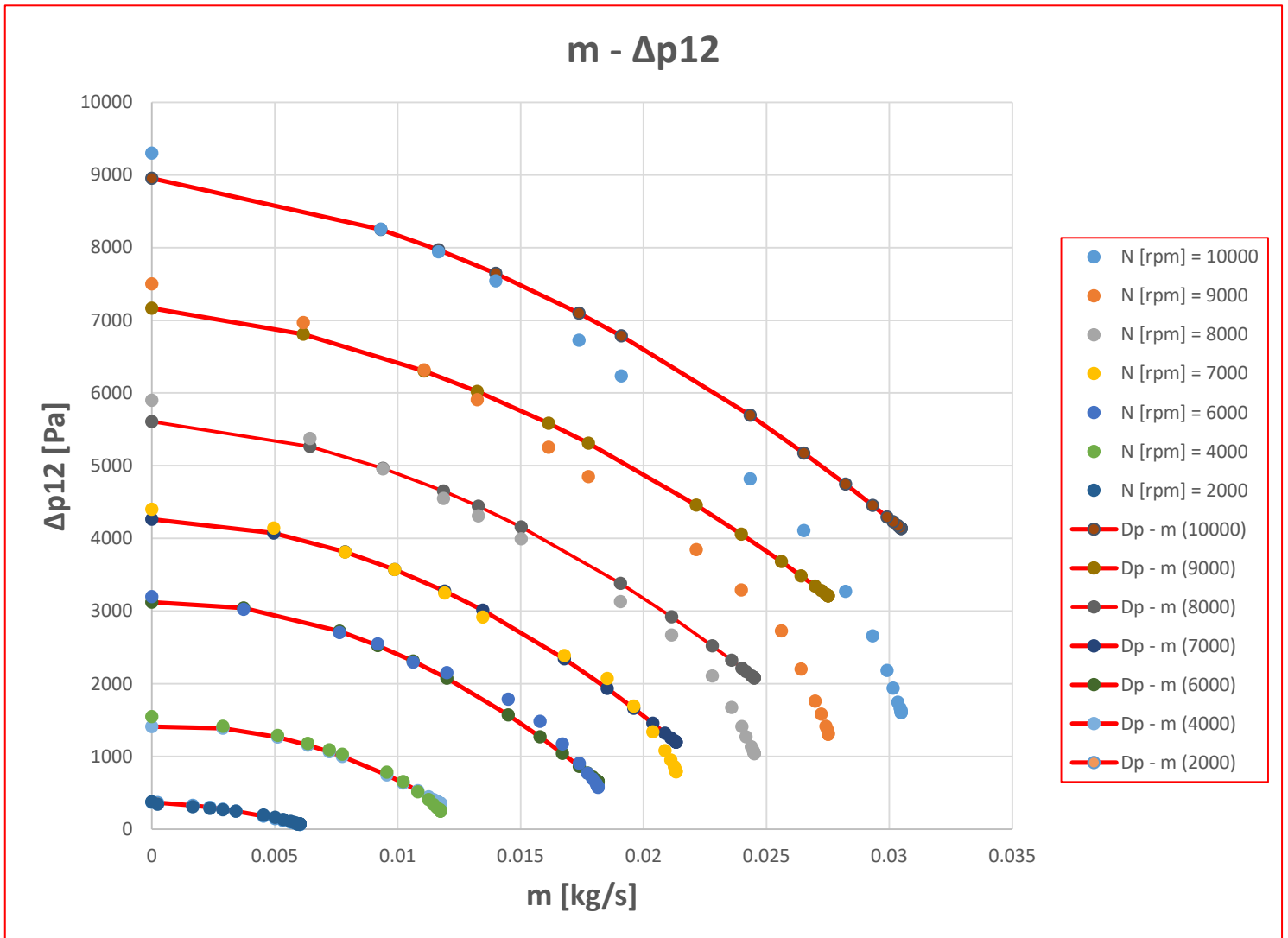




- Εφαρμόζοντας τα παραπάνω βήματα και τις σχέσεις, δημιουργείται νέα στήλη Dp που εμπεριέχει τις προσεγγιστικές τιμές του Δρ

Dp
65.10257002
65.10257002
65.10257002
73.07603707
73.07603707
73.07603707
77.07050778
85.07561931
97.12597926
121.3974673
145.9345461
179.1698169
248.4070547
276.0321787
300.419169
327.2894495
365.3559606
369.3383835

Στο διάγραμμα παρουσιάζονται τα συγκεντροτικά αποτελέσματα:



Είναι εύκολα διακριτό πως **υπάρχει απόκλιση** ανάμεσα στα πειραματικά δεδομένα και αυτά της προσέγγισης, **ιδίως όταν αυξάνεται** η παροχή μάζας, και ακόμα πιο έντονο γίνεται **σε υψηλότερες στροφές**.

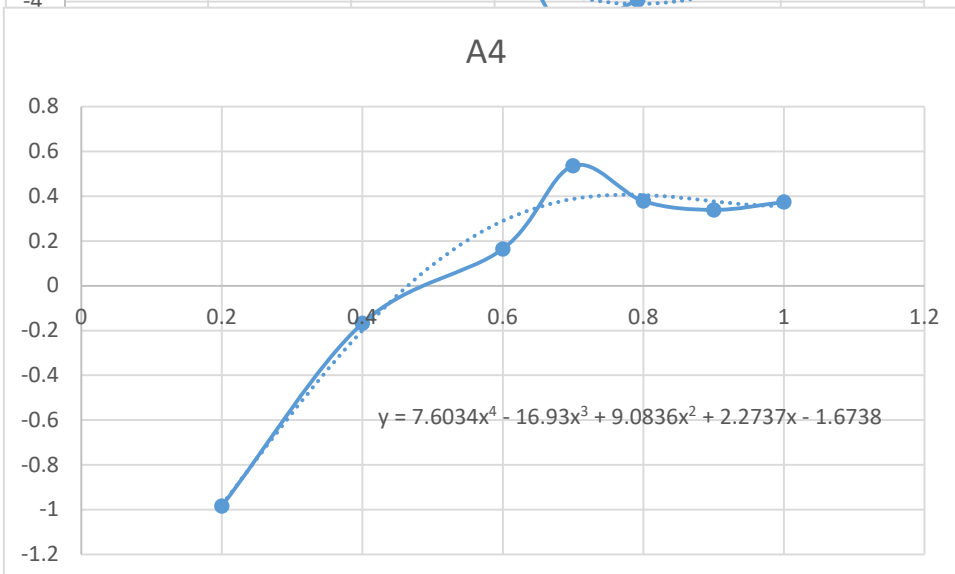
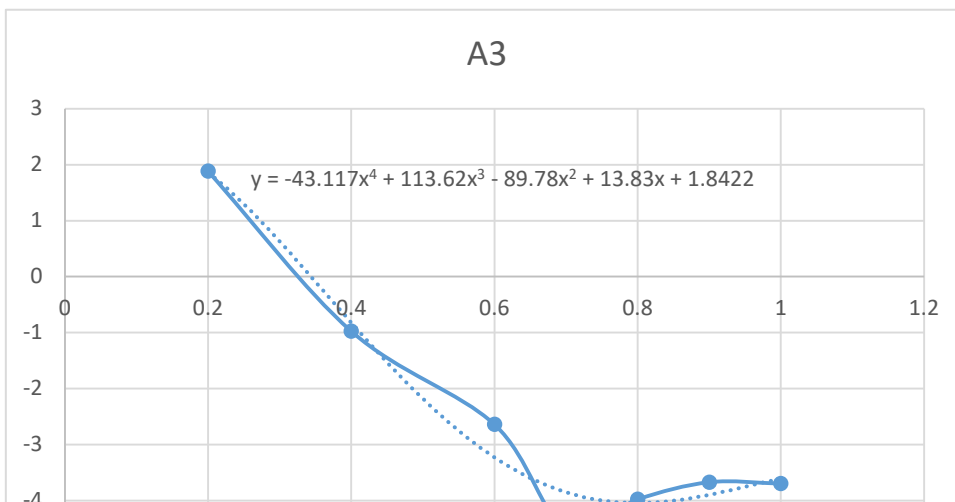
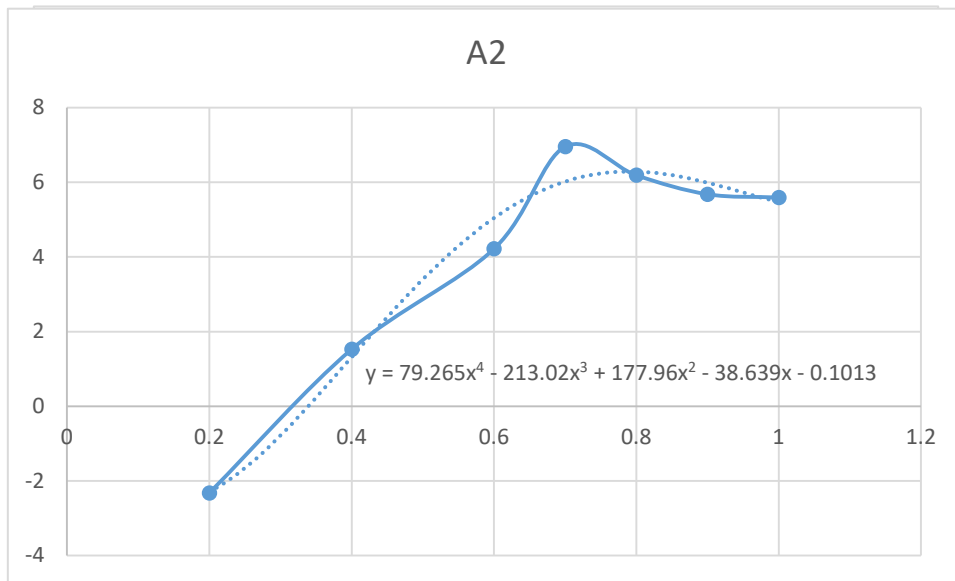
Βελτιστοποίηση

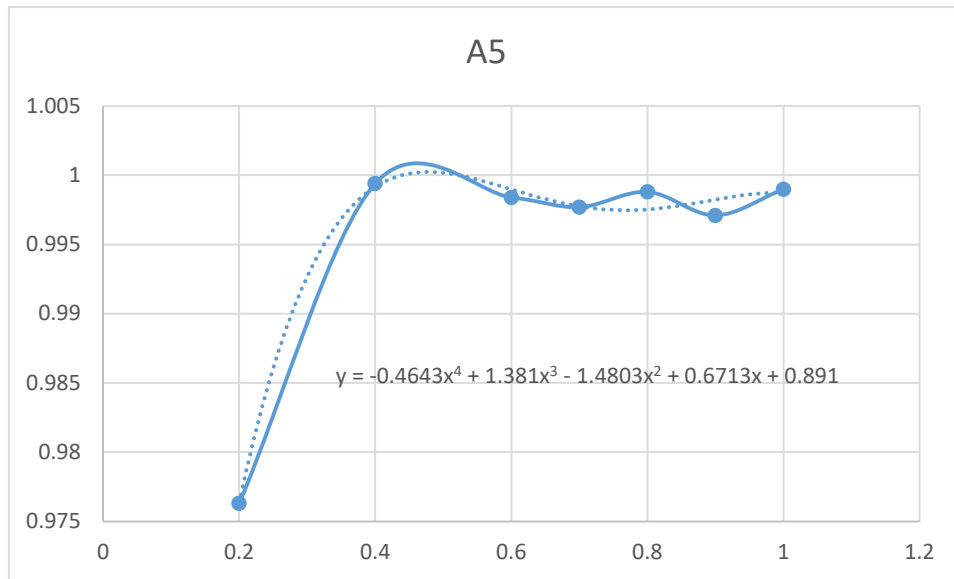
Λόγω των μεγάλων αποκλίσεων, θα ξαναγίνει η διαδικασία της προσέγγισης με πολυώνυμου τετάρτου βαθμού και στα δύο στάδια προσέγγισης, αφού προηγηθεί η κατάλληλη αδιαστατοποίηση των αξόνων.

- Αρχικά γίνεται η αδιαστατοποίηση των αξόνων με τη μέγιστη τιμή, και δημιουργούνται οι στήλες $\Delta p_{12}/\Delta p_{12,max}$ $m/m,max$ $\eta s/\eta s,max$ $N/N,max$
- Έπειτα κατασκευάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε ομάδα στροφών $\Delta p_{12}/\Delta p_{12,max}$ ως προς $m/m,max$
- Γίνεται το πρώτο στάδιο της προσέγγισης με πολυώνυμο τετάρτου βαθμού και λαμβάνονται οι παρακάτω συντελεστές

A1	A2	A3	A4	A5
0.629	-2.322	1.8813	-0.9839	0.9763
-1.2179	1.5269	-0.9752	-0.1683	0.9994
-2.5572	4.2165	-2.6396	0.1644	0.9984
-3.7884	6.9537	-4.5124	0.5351	0.9977
-3.4056	6.1874	-3.9773	0.3778	0.9988
-3.1623	5.6796	-3.6713	0.3388	0.9971
-3.0899	5.5919	-3.6959	0.3735	0.999

- Κατασκευάζονται νέα διαγράμματα με τους συντελεστές A1, A2, A3, A4, A5 συναρτήσεων των στροφών N/N, max και ακολουθείται η ίδια διαδικασία προσέγγισης με πολυώνυμο τετάρτου βαθμού





- Κατγράφονται οι συντελεστές σε νέο πίνακα

	α	β	γ	δ	ε
1	-4.19E+01	1.11E+02	-9.23E+01	20.572	-0.6311
2	7.93E+01	-2.13E+02	1.78E+02	-38.639	-0.1013
3	-4.31E+01	1.14E+02	-8.98E+01	13.83	1.8422
4	7.60E+00	-1.69E+01	9.08E+00	2.2737	-1.6738
5	-4.64E-01	1.38E+00	-1.48E+00	6.71E-01	0.891

- Καταγραφή ενιαίου πολυωνύμου, για οποιοσδήποτε στροφές και οποιαδήποτε παροχή μάζας, της μορφής

$$\Delta p = f(m, N) = A_1(N)m^4 + A_2(N)m^3 + A_3(N)m^2 + A_4(N)m + A_5(N)$$

$$A_1(N) = \alpha_1 N^4 + \beta_1 N^3 + \gamma_1 N^2 + \delta_1 N + \varepsilon_1$$

$$A_2(N) = \alpha_2 N^4 + \beta_2 N^3 + \gamma_2 N^2 + \delta_2 N + \varepsilon_2$$

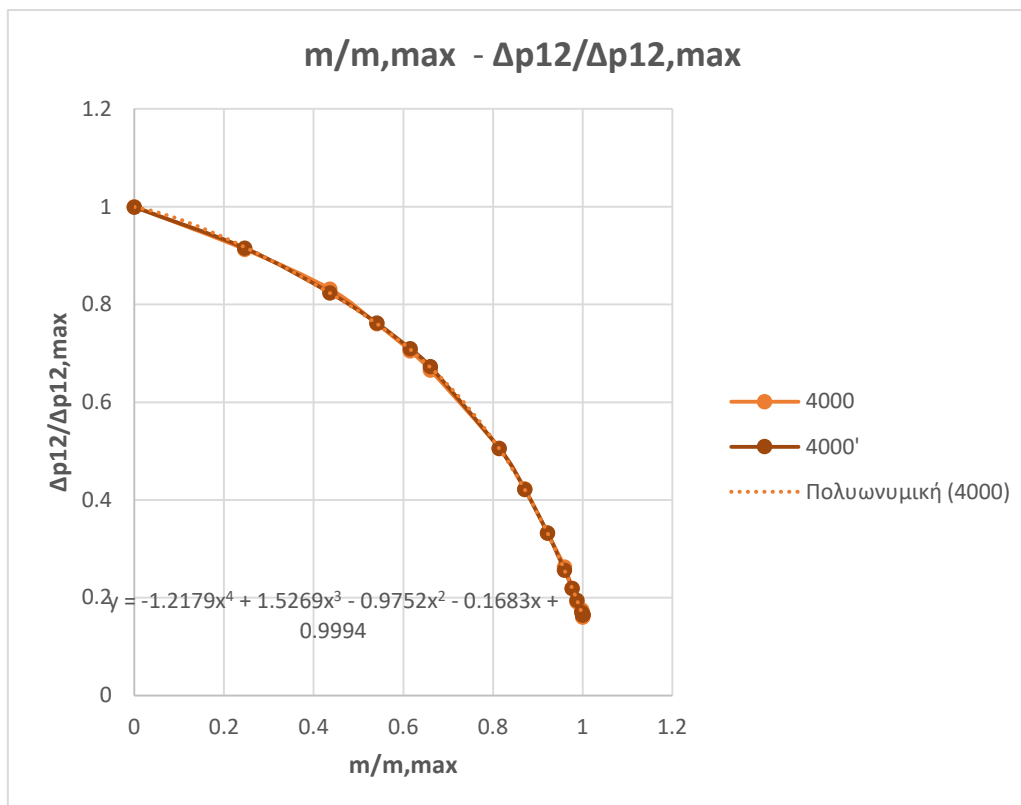
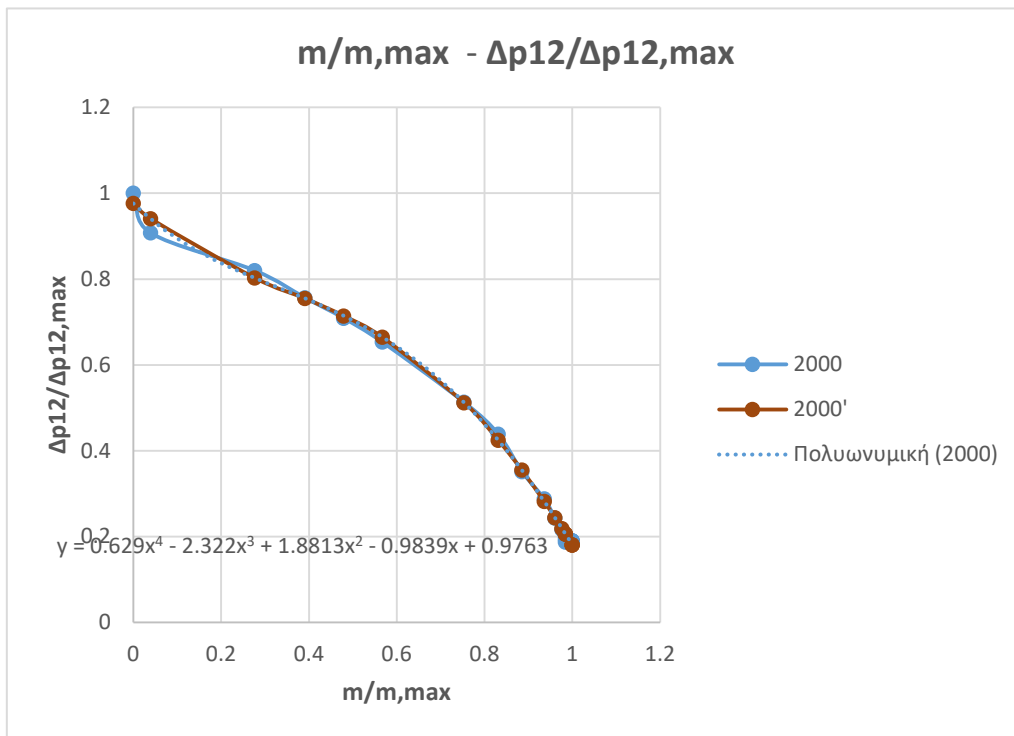
$$A_3(N) = \alpha_3 N^4 + \beta_3 N^3 + \gamma_3 N^2 + \delta_3 N + \varepsilon_3$$

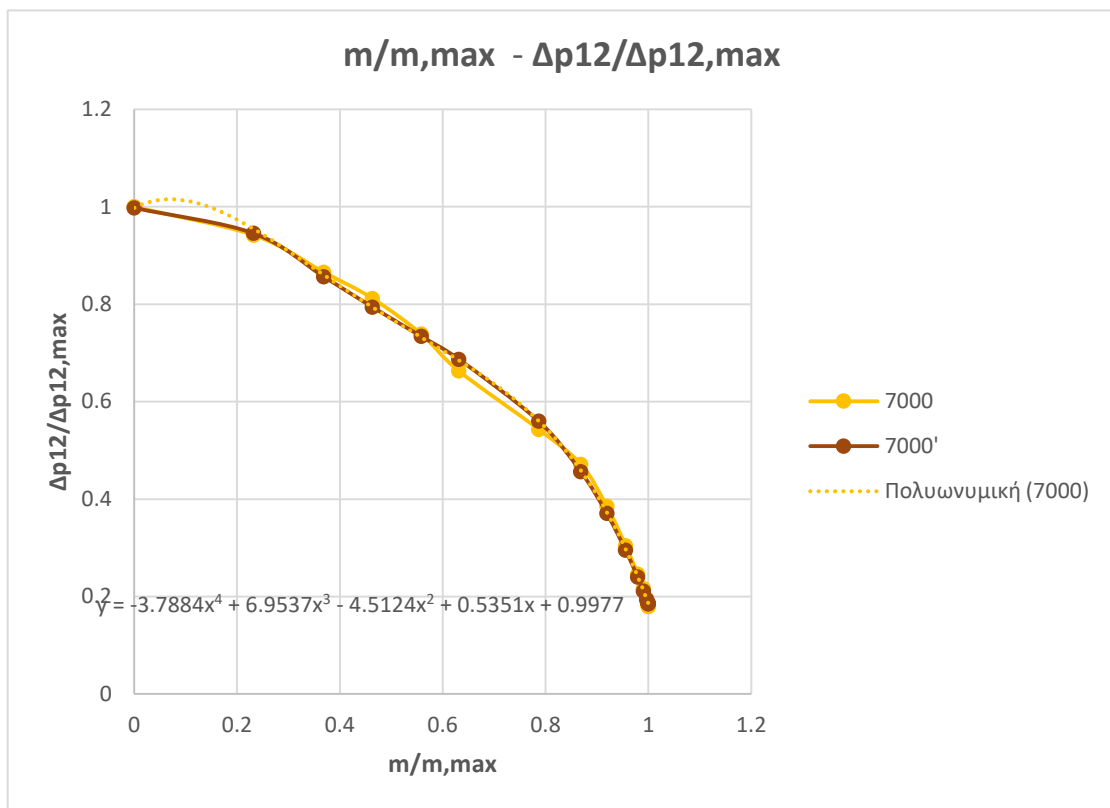
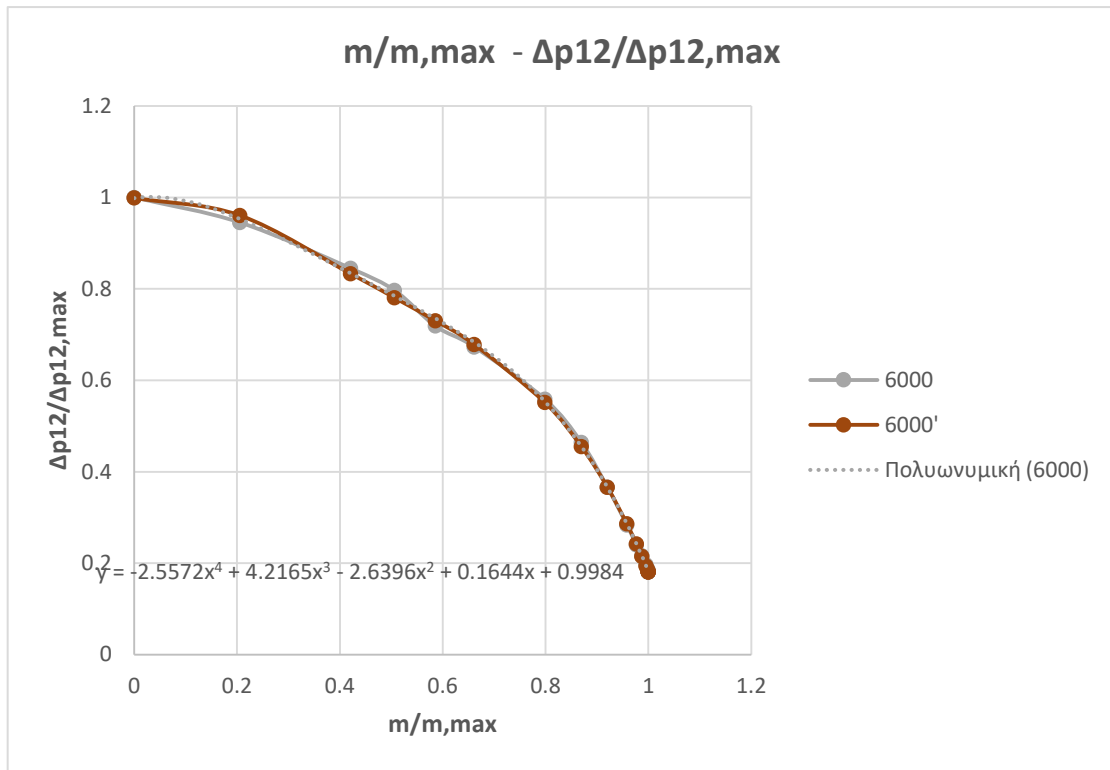
$$A_4(N) = \alpha_4 N^4 + \beta_4 N^3 + \gamma_4 N^2 + \delta_4 N + \varepsilon_4$$

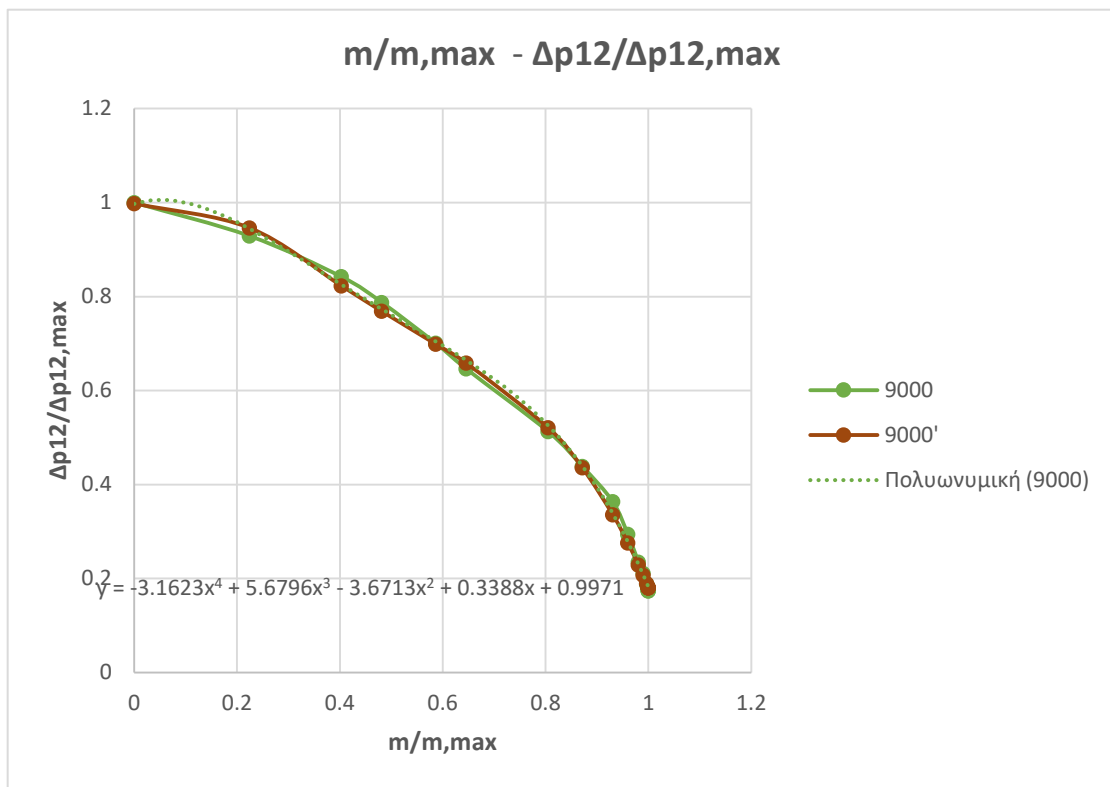
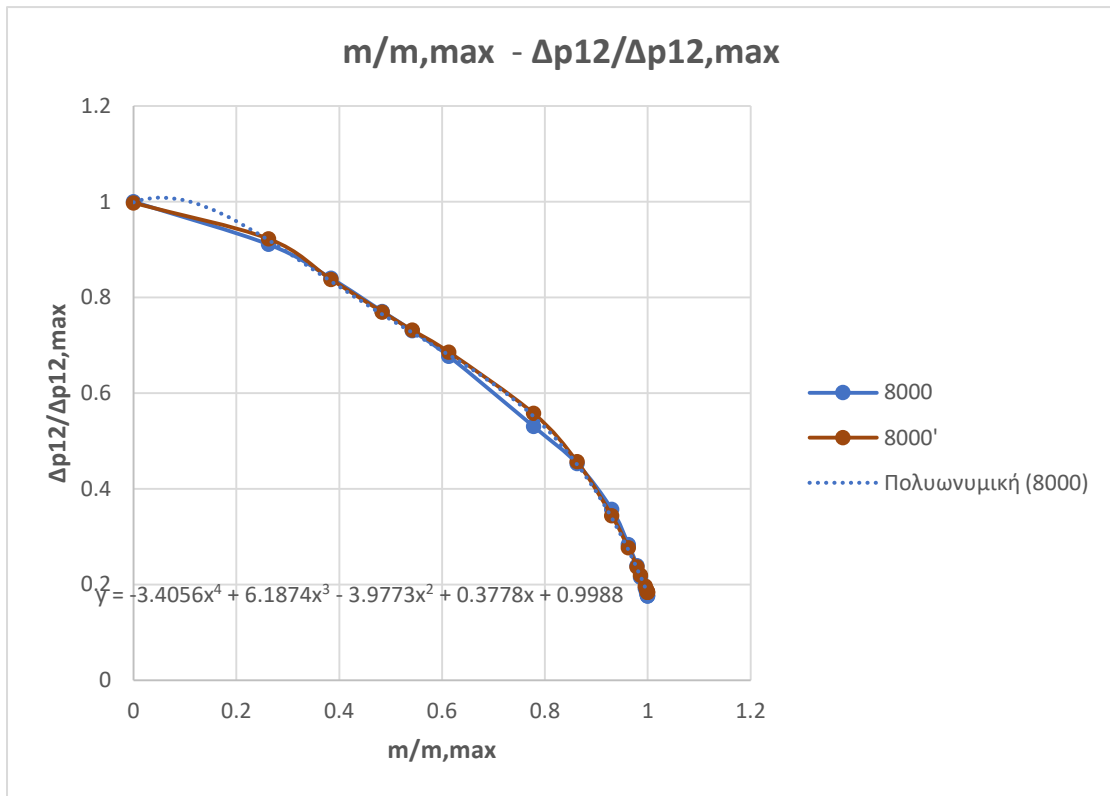
$$A_5(N) = \alpha_5 N^4 + \beta_5 N^3 + \gamma_5 N^2 + \delta_5 N + \varepsilon_5$$

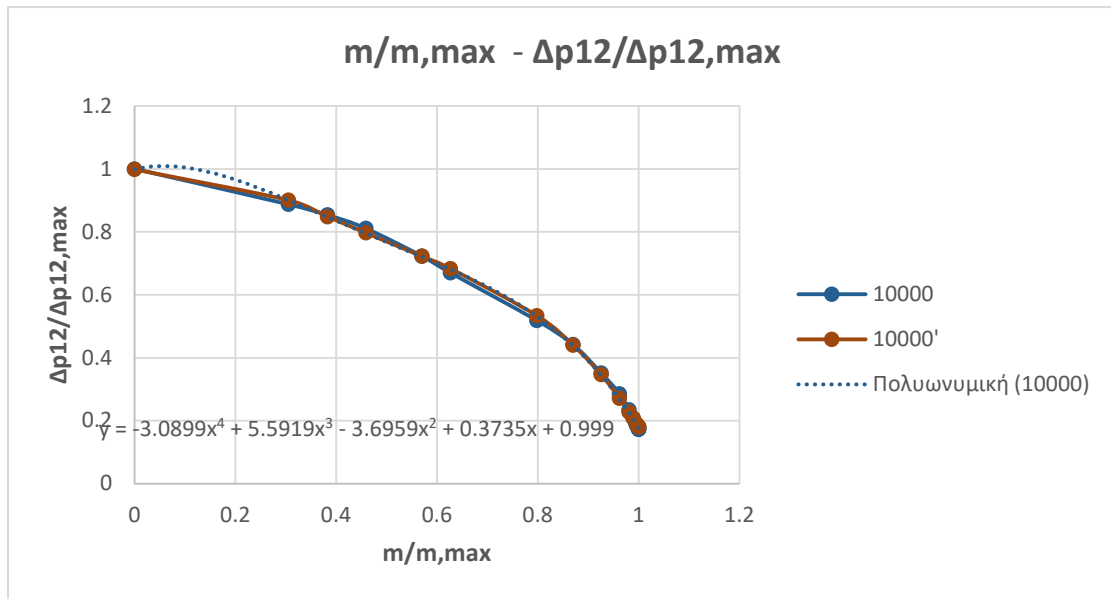
Σημείωση: Τα παραπάνω μεγέθη αναφέρονται στα αντίστοιχα αδιάστατα μεγέθη

Παρακάτω είναι τα διαγράμματα απο τα πειραματικά δεδομένα και οι καμπύλες που τα προσεγγίζουν:

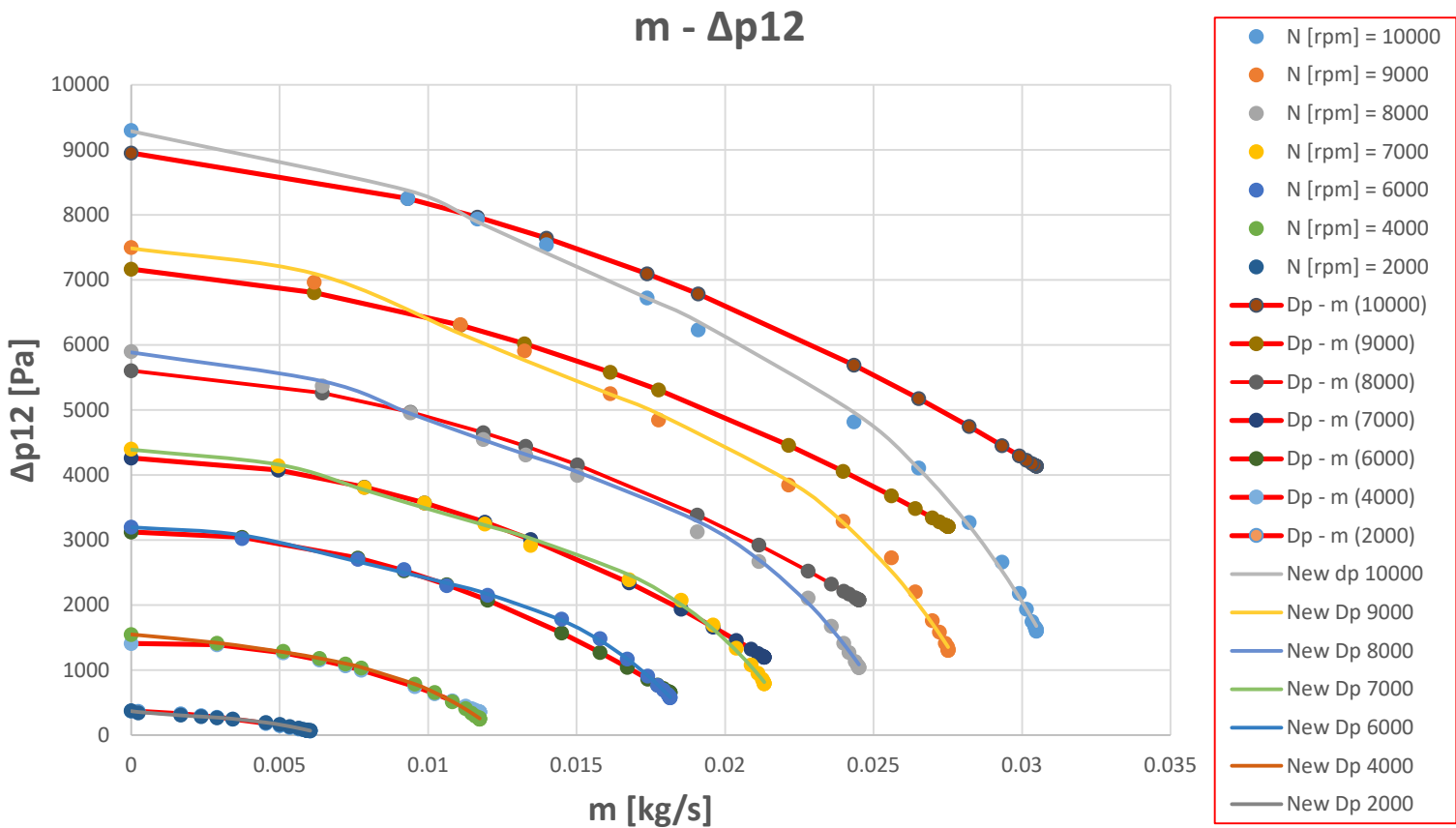








- Εφαρμόζοντας τα παραπάνω βήματα και τις σχέσεις, δημιουργείται νέα στήλη $\Delta p / \Delta p, \max$ που εμπεριέχει τις προσεγγιστικές τιμές του $\Delta p / \Delta p, \max$
- Τελικά, για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε την βελτιωμένη προσέγγιση με την πρώτη, πολλαπλασιάζουμε τις στήλες με τις μέγιστες τιμές, ώστε να μαζευτούν όλα σε ένα ενιαίο διάγραμμα

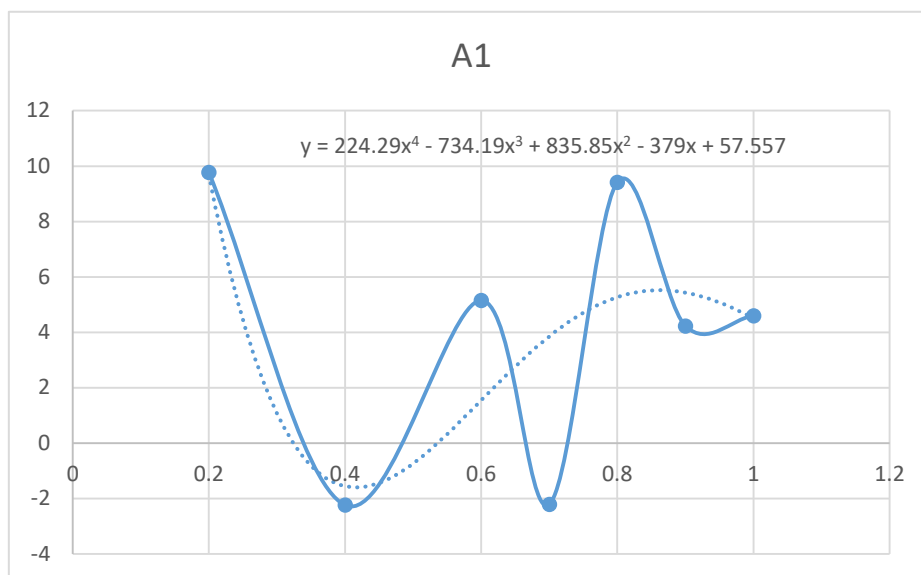


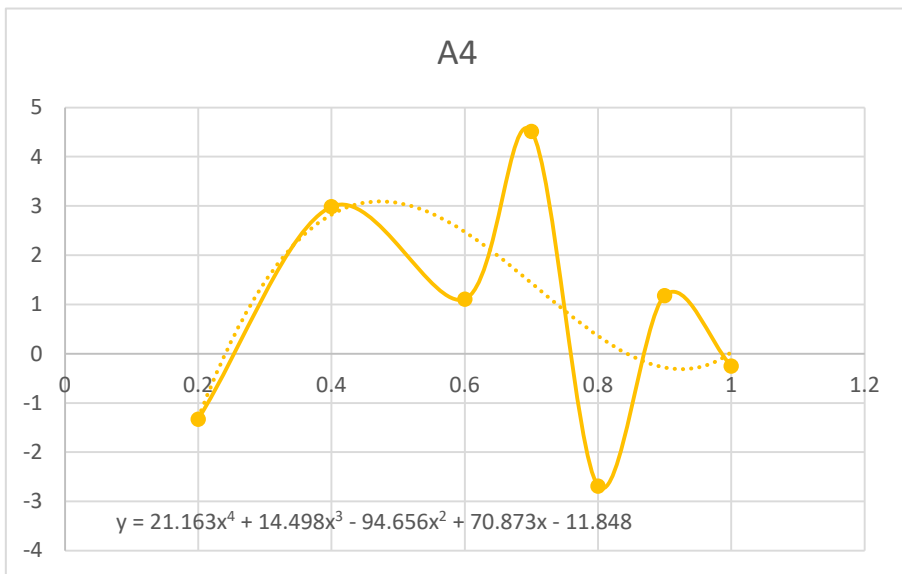
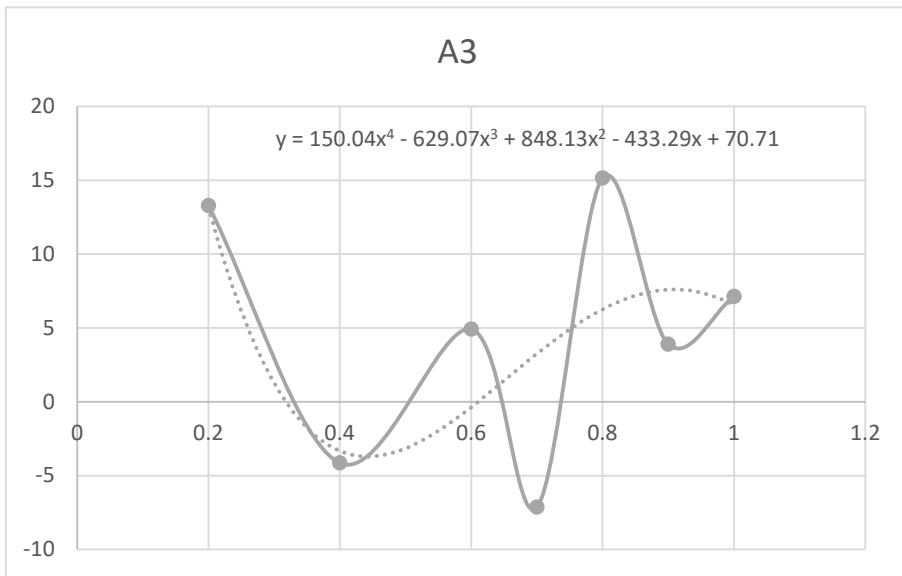
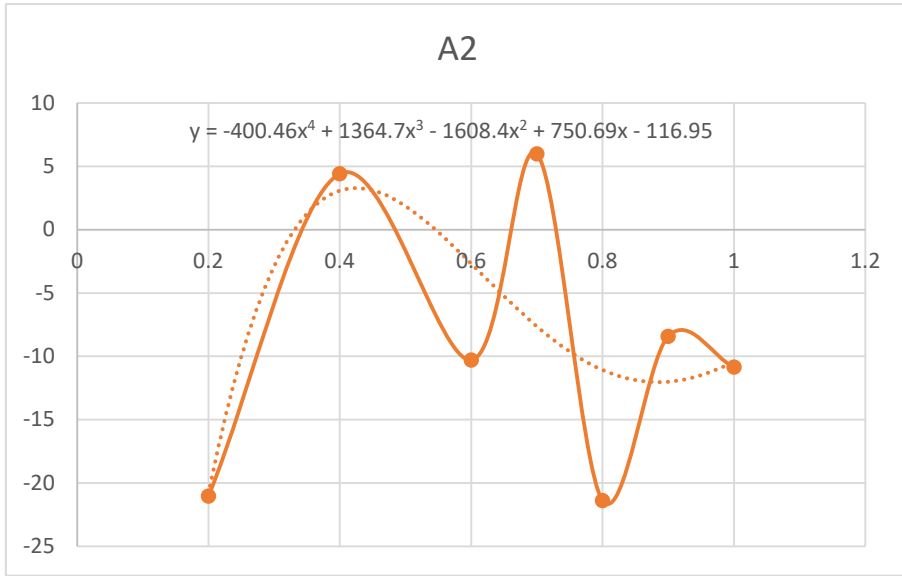
Η διαφορά ανάμεσα στις δυο προσεγγίσεις είναι εμφανής, καθώς η δεύτερη προσέγγιση φαίνεται να αγκαλιάζει τα αρχικά δεδομένα ακόμη και στις τιμές **στα άκρα των καμπυλών (μεγάλες παροχές μάζας)**, όπου υστερούσε η πρώτη.

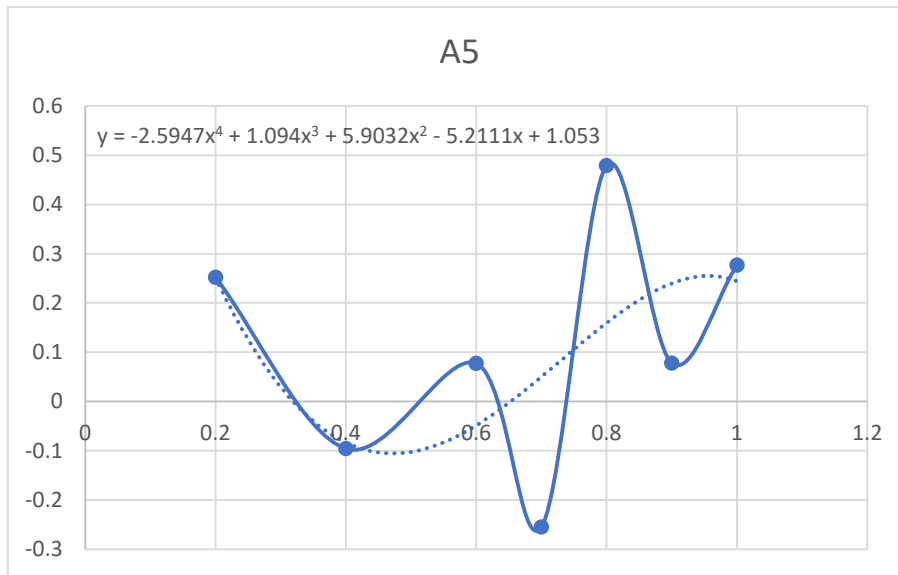
Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα διαγράμματα $\Delta\rho - \eta_s$

- Χρησιμοποιήθηκαν οι αδιάστατες ποσότητες και κατασκευάστηκαν οι καμπύλες $\eta_s/\eta_{s,max} - \Delta\rho_{12}/\Delta\rho_{12,max}$ για κάθε ομάδα στροφών $N/N,max$
- Οι καμπύλες προσεγγίστηκαν με πολυώνυμο τετάρτου βαθμού

A1	A2	A3	A4	A5
9.7718	-21.049	13.285	-1.3252	0.2523
-2.2358	4.4178	-4.1394	2.9861	-0.0956
5.1518	-10.298	4.9141	1.1095	0.0774
-2.2049	5.9868	-7.1319	4.5138	-0.2548
9.4206	-21.38	15.15	-2.6835	0.4794
4.2333	-8.4164	3.9049	1.1841	0.078
4.6041	-10.863	7.1274	-0.2509	0.2768







	α	β	γ	δ	ε
1	224.2900	-734.1900	835.8500	-379.0000	57.5570
2	-400.4600	1364.7000	-1608.4000	750.6900	-116.9500
3	150.0400	-629.0700	848.1300	-433.2900	70.7100
4	21.1630	14.4980	-94.6560	70.8730	-11.8480
5	-2.5947	1.0940	5.9032	-5.2111	1.0530

- Καταγραφή ενιαίου πολυωνύμου, για οποιεσδήποτε στροφές και οποιαδήποτε παροχή μάζας, της μορφής

$$\eta s = f(\Delta p, N) = A_1(N)\Delta p^4 + A_2(N)\Delta p^3 + A_3(N)\Delta p^2 + A_4(N)\Delta p + A_5(N)$$

$$A_1(N) = \alpha_1 N^4 + \beta_1 N^3 + \gamma_1 N^2 + \delta_1 N + \varepsilon_1$$

$$A_2(N) = \alpha_2 N^4 + \beta_2 N^3 + \gamma_2 N^2 + \delta_2 N + \varepsilon_2$$

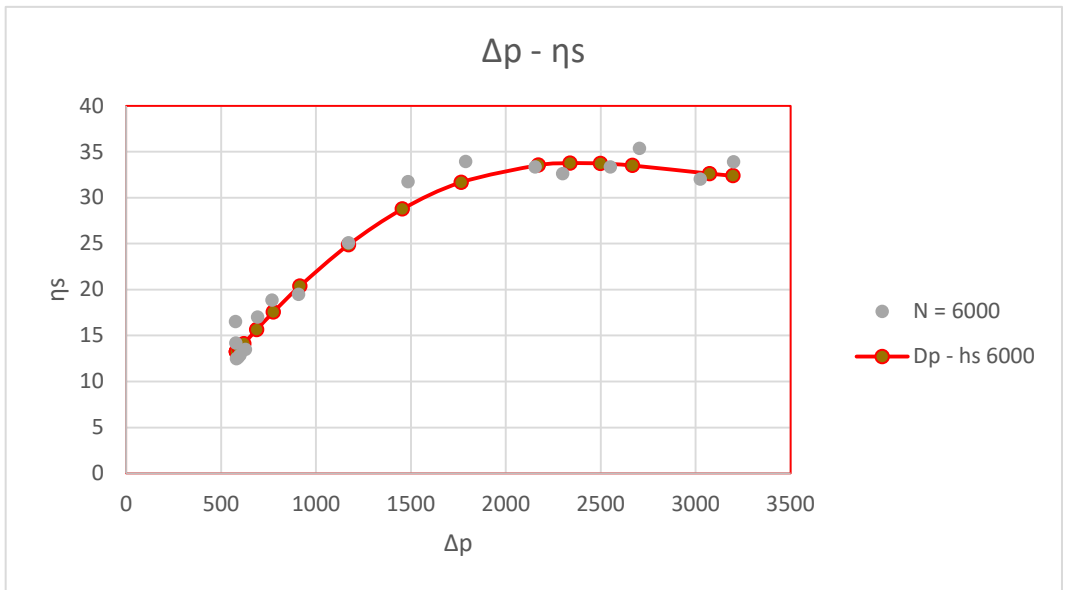
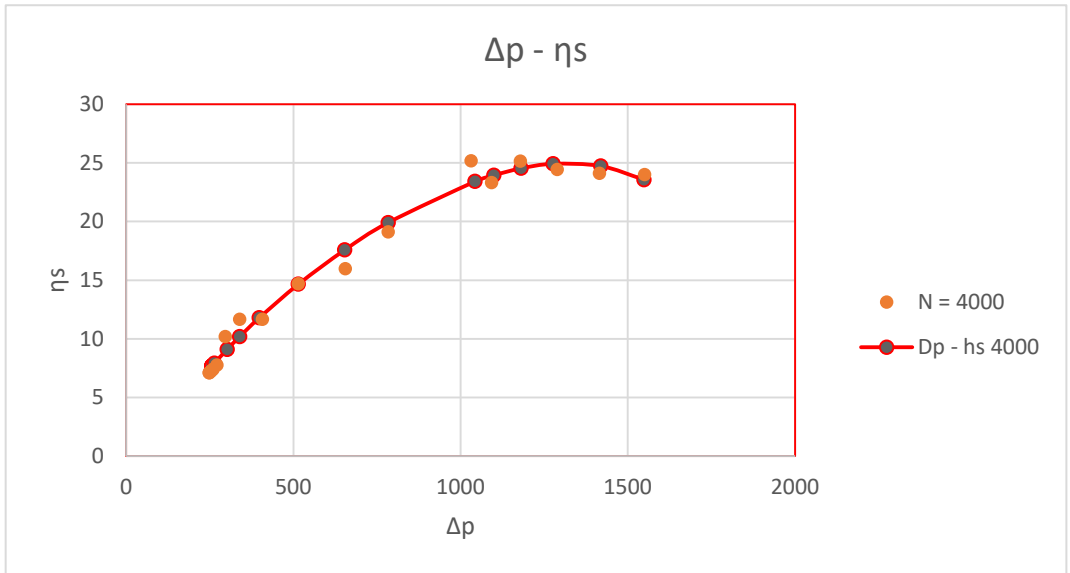
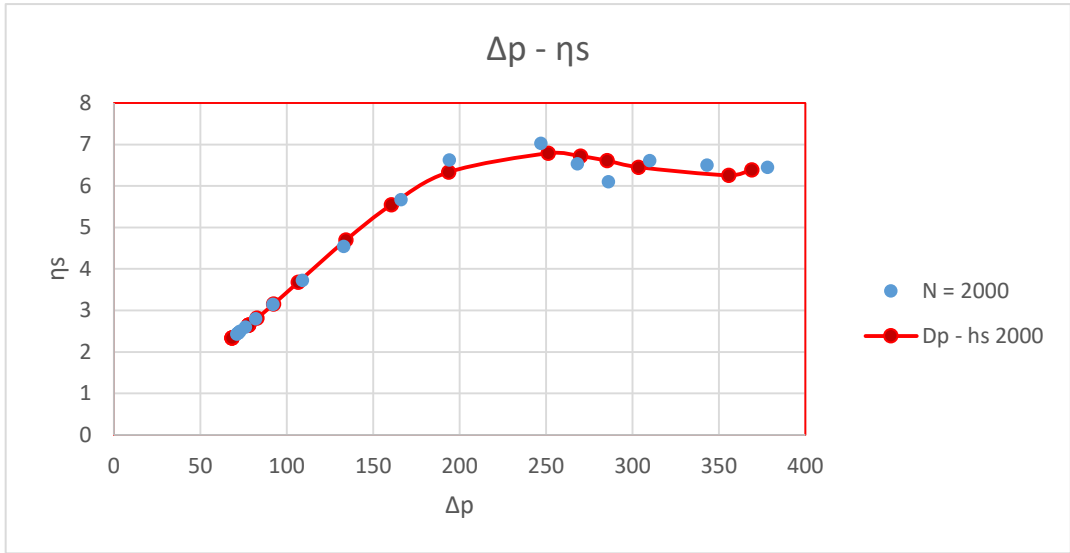
$$A_3(N) = \alpha_3 N^4 + \beta_3 N^3 + \gamma_3 N^2 + \delta_3 N + \varepsilon_3$$

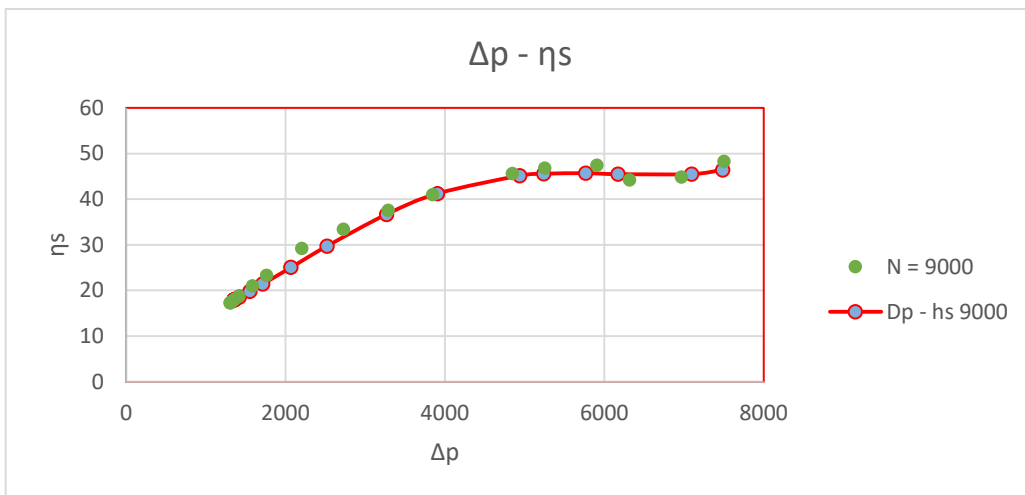
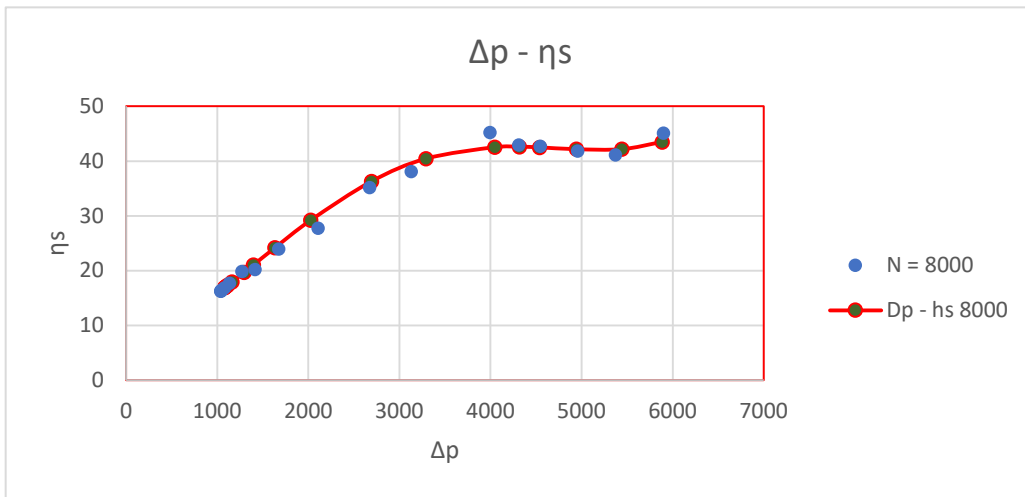
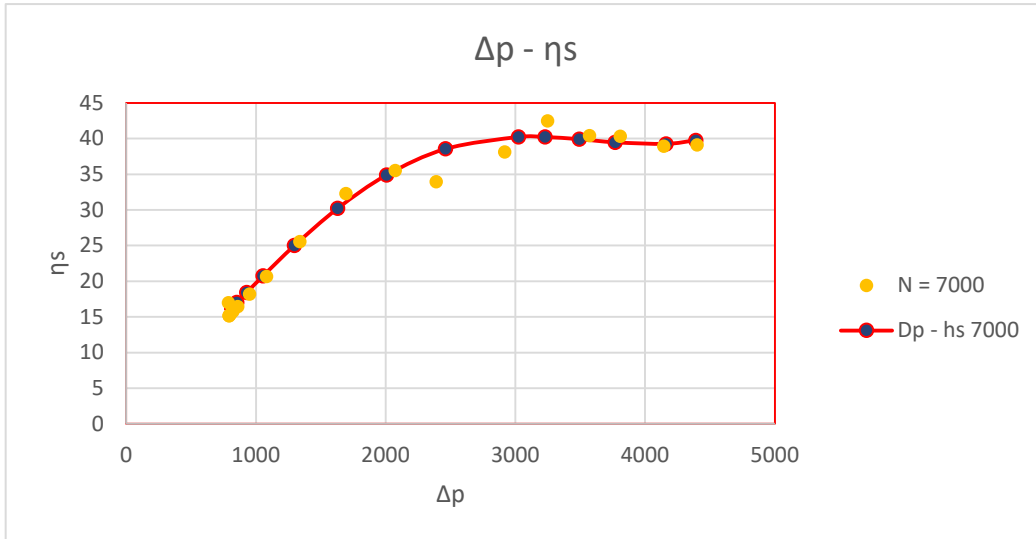
$$A_4(N) = \alpha_4 N^4 + \beta_4 N^3 + \gamma_4 N^2 + \delta_4 N + \varepsilon_4$$

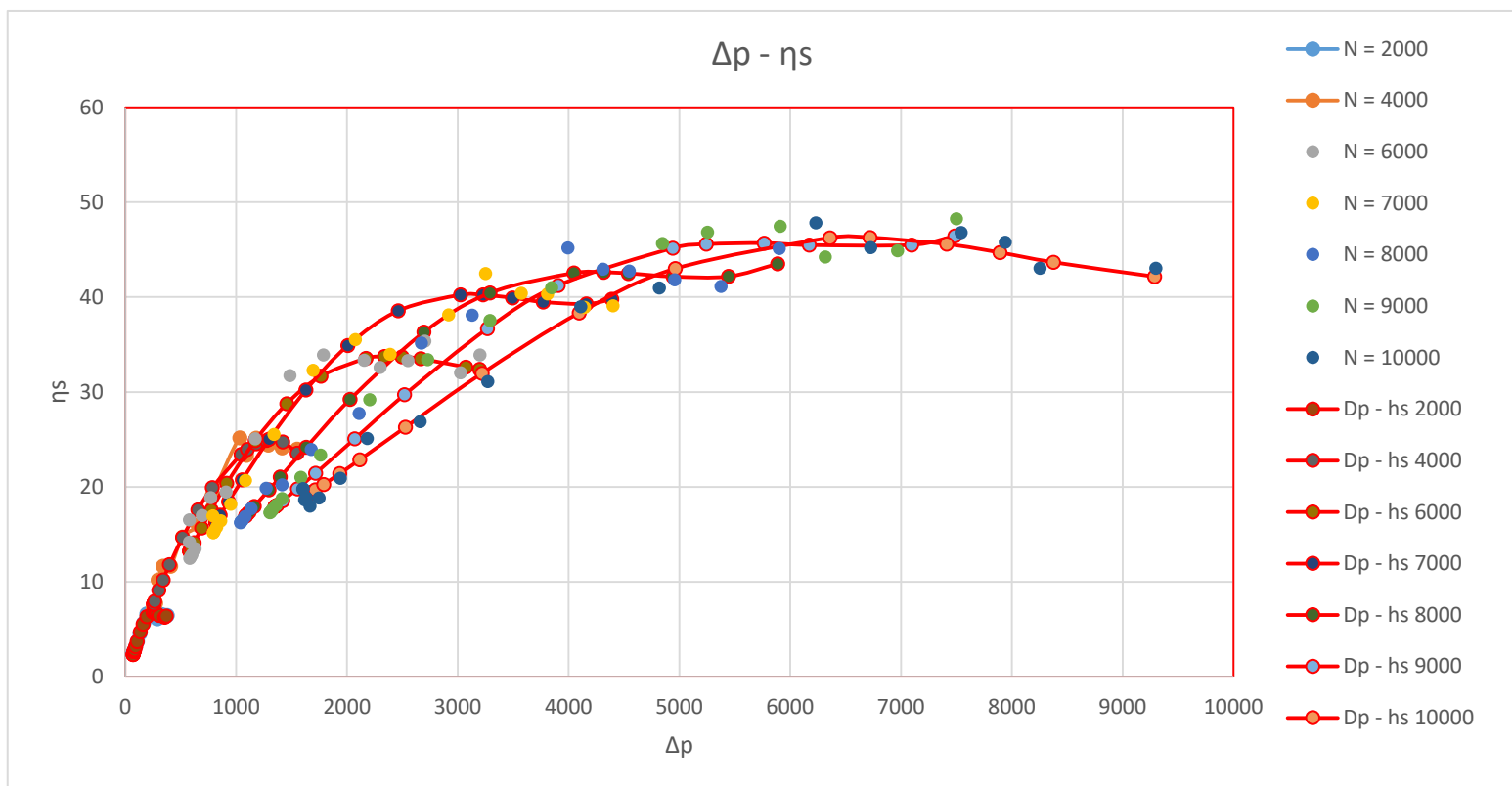
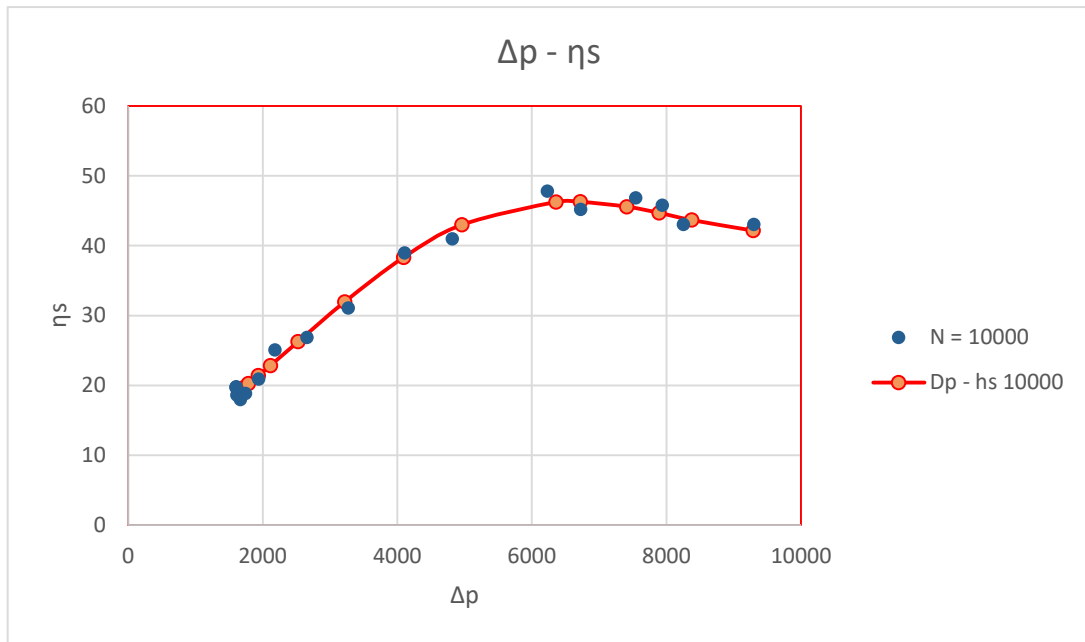
$$A_5(N) = \alpha_5 N^4 + \beta_5 N^3 + \gamma_5 N^2 + \delta_5 N + \varepsilon_5$$

Σημείωση: Τα παραπάνω μεγέθη αναφέρονται στα αντίστοιχα αδιάστατα μεγέθη

- Εφαρμόζοντας τα παραπάνω βήματα και τις σχέσεις, δημιουργείται νέα στήλη h/hs, max που εμπεριέχει τις προσεγγιστικές τιμές του $\eta s / \eta s, \max$
- Τελικά, για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε την βελτιωμένη προσέγγιση με την πρώτη, πολλαπλασιάζουμε τις στήλες με τις μέγιστες τιμές, ώστε να μαζευτούν όλα σε ένα ενιαίο διάγραμμα







Σε αυτές τις καμπύλες υπάρχει μια μικρή απόκλιση, ακόμα και με τη Βελτιωμένη προσέγγιση, λόγω των αρχικών καμπυλών που δεν ήταν ομαλές.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Έγινε αναφορά στις ρευστοδυναμικές μηχανές με εστίαση στον Φυγοκεντρικό συμπιεστή
- Τέτοιος συμπιεστής είναι ο εργαστηριακός, όπου έγιναν μετρήσεις σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα
- Κατασκευάστηκε μαθηματικό μοντέλο που προβλέπει τις επιδόσεις του συμπιεστή σε διάφορα σημεία λειτουργίας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<https://www.youtube.com/watch?v=WFZ1bhFEh2U>

https://www.google.com/search?q=centrifugal+compressor&tbm=isch&ved=2ahUKEwjWvpH359zqAhVQaBoKHQ-QB_0Q2-cCegQIABAA&oq=centrifugal+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgIIADICCAAYAggAMgIIADICCAAYAggAMgIIADICCAAYBAGAEb4yBAGAEb46BAGjECC6BQgAELEDUPTIaFjO42hg1PFoaABwAHgAgAGUAYgB4QySAQQwLjEymAEAoAEbqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=pxEWX5bPJ9DQaY-gnugP&bih=667&biw=1366#imgrc=xRu87LRnAonOGM

<https://www.mech4study.com/2017/11/centrifugal-compressor.html>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Compressor>

https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/1113/1/02_chapter_1.pdf

<https://www.marineinsight.com/tech/air-compressor/the-basics-of-air-compressor-on-a-ship/>

<https://www.compressedairsystems.com/blog/history-air-compressors/>

<https://docplayer.gr/21143506-Kefalaio-8-psyxi-kai-systimata-dianomis-psyxis.html>

<https://slideplayer.gr/slide/11122969/>

<https://cascousa.com/compressed-air-101/types-of-compressors/dynamic-displacement-compressors/>

[https://www.boatfishing.gr/article-post/techniko-thema-ypersympiestis-sygkentrosi-ischyos-kai-dynamis/](https://www.boatfishing.gr/article-post/techniko-thema-yopersympiestis-sygkentrosi-ischyos-kai-dynamis/)

https://www.google.com/search?q=diffuser+vanes&rlz=1C1GCEA_enGR930GR930&sxsrf=ALeKk03QEZYI8ZROI3qzD_ufb2vme72mpA:1612465018476&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjs9I2I9NDuAhX_aRUIHVD0DbAQ_AUoAXoECBwQAw&biw=1366&bih=667#imgrc=PM_6fq8cBStthM

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/diffuser-channel>

https://www.google.com/search?q=multistage+centrifugal+compressor&tbm=isch&ved=2ahUKEwjGkJDRsdHuAhXWuKQKHfFcBYgQ2-cCegQIABAA&oq=multistage+centrifugal+comp&gs_lcp=CgNpbWcQARgBMgQIABATMgQIABATMggIABAIEB4QEzoECCMQJzoCCAA6CAgAELEDEIMBOgUIABCxAzoECAAQHIDR7gNYvbgEYJ3MBGgAcAB4AIAIbGIAegUkgEEMC4xOZgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=zYMcYIb2FNbxkgXxuZXACA&bih=667&biw=1366&rlz=1C1GCEA_enGR930GR930#imgrc=eQyYld_CHNwjhM

<https://www.deviantart.com/lxcb/art/Multistage-Centrifugal-Compressor-393197669>

<https://engfac.cooper.edu/melody/411>

<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/21642583.2014.956269>

<https://aviation.stackexchange.com/questions/77739/why-is-a-centrifugal-compressor-in-aircraft-engine-less-susceptible-to-stall-and>

https://escholarship.org/content/qt99j06206/qt99j06206_noSplash_4a40f0c93d275167574bf889ac6fc24a.pdf

<https://www.enggcyclopedia.com/2012/01/centrifugal-compressor-surge/>

<https://www.enggcyclopedia.com/2012/02/compressor-choke-stonewall/>

<https://www.conceptsnrec.com/blog/performance-corrections-for-compressor-maps>

<https://armfield.co.uk/product/c1-mkiii-compressible-flow-unit/>

<https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2016/04/turbocharger-supercharger.html>

<http://www.maniatisk.gr/asp/forum/jet/compressor.aspx>