

Ε.Μ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

**Μάθημα:** *Θερμικές Στροβιλομηχανές*

## Εργαστηριακή Άσκηση

Μέτρηση Χαρακτηριστικής Καμπύλης  
Βαθμίδας Αξονικού Συμπιεστή

Κ. Μαθιουδάκη  
Καθηγήτρια



ΑΘΗΝΑ 2010



## 1. Εισαγωγή

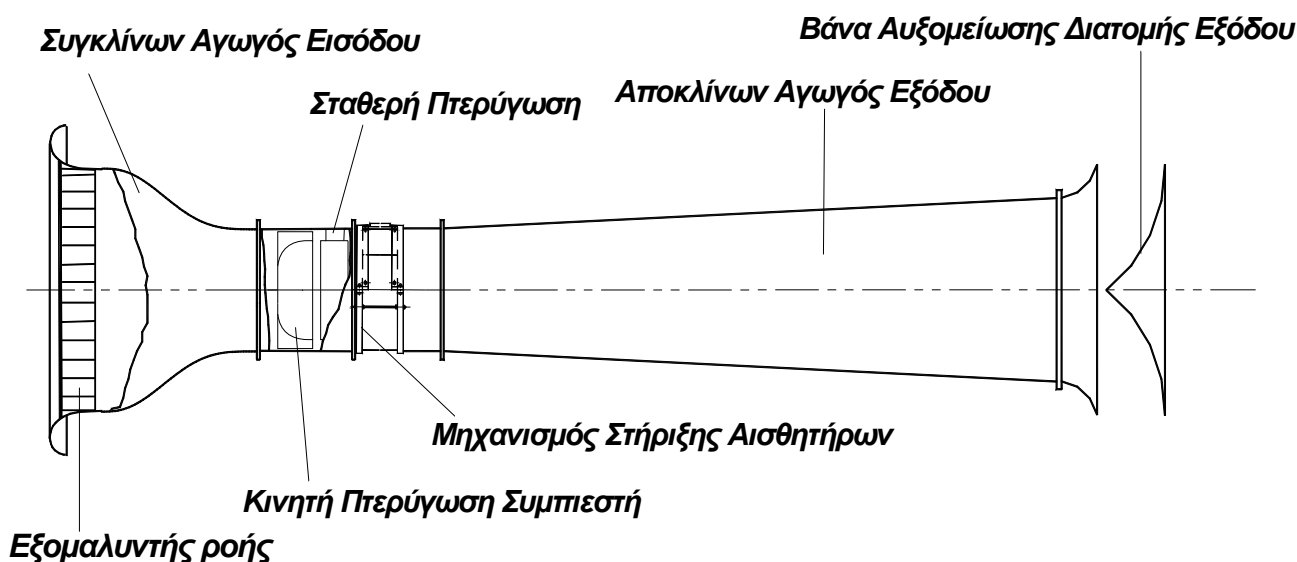
Αντικείμενο της εργαστηριακής άσκησης είναι (α) να βρεθεί πειραματικά η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μίας βαθμίδας αξονικού συμπιεστή (β) να μετρηθούν χαρακτηριστικά του πεδίου ροής στο εσωτερικό της βαθμίδας για να διαπιστωθεί η συσχέτιση κινηματικών στοιχείων της ροής και του σημείου λειτουργίας της βαθμίδας.

Ο σκοπός είναι η εξοικείωση των σπουδαστών με μετρητικές διαδικασίες που επιτρέπουν τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών μιας μηχανής. Παράλληλα, η πραγματοποίηση συγκεκριμένων μετρήσεων του πεδίου ροής, επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των όσων συμβαίνουν στο εσωτερικό της μηχανής και ειδικότερα την συσχέτιση του πεδίου ταχυτήτων με το σημείο λειτουργίας.

Παρακάτω περιγράφεται η εγκατάσταση στην οποία γίνονται οι δοκιμές του συμπιεστή, τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιούνται, η διαδικασία αναγωγής των μετρούμενων ποσοτήτων σε παραμέτρους ενδιαφέροντος για τη μηχανή, η διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος και τέλος η απαιτούμενη αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

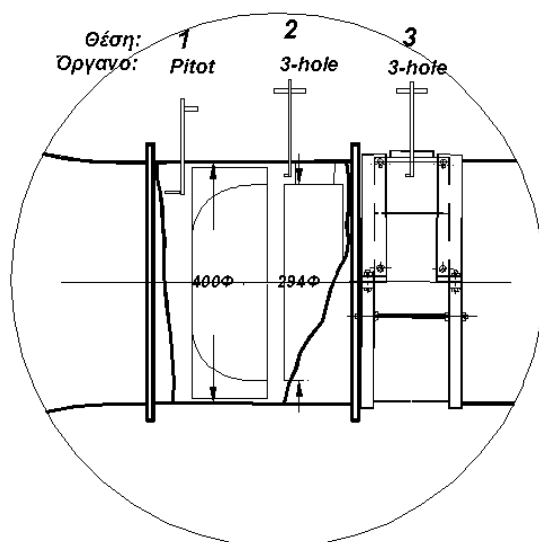
## 2. Η Πειραματική Εγκατάσταση

Η διάταξη δοκιμής αξονικού συμπιεστή στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις εικονίζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διάταξη Δοκιμής Αξονικών Συμπιεστών Χαμηλών Ταχυτήτων.

Στη **διατομή δοκιμών** (δηλαδή στη θέση που γίνονται οι μετρήσεις) είναι εγκατεστημένη μια βαθμίδα αξονικού συμπιεστή, αποτελούμενη από μια πτερωτή (στρεφόμενα πτερύγια) ακολουθούμενη από μια σταθερή πτερώγωση στην οποία γίνονται οι διάφορες μετρήσεις. Η διάταξη της διατομής δοκιμών φαίνεται στο σχήμα 2. Η εικονιζόμενη εγκατάσταση έχει διαμορφωθεί κατά τον τρόπο που φαίνεται για συγκεκριμένους λόγους, δηλαδή κάθε τμήμα της διαμορφώνεται με βάση συγκεκριμένες απαιτήσεις. Αποτελείται λοιπόν από τα ακόλουθα τμήματα:



**Σχήμα 2:** Διάταξη της διατομής δοκιμών και γεωμετρικά στοιχεία της βαθμίδας αξονικού συμπιεστή. Όργανα και θέσεις μέτρησης.

**Στόμιο Εισόδου:** Πρόκειται για συγκλίνοντα αγωγό που στην είσοδό του φέρει κυψέλες ευθυγράμμισης, τετραγωνικής διατομής. Ο ρόλος του είναι να εξομαλύνει ανομοιομορφίες της ροής του αναρροφώμενου αέρα και να δημιουργεί στην είσοδο του δοκιμαζόμενου συμπιεστή μια κατά το δυνατόν ομοιόμορφη και χρονικά σταθερή ροή.

**Διατομή Δοκιμών:** Είναι το κυλινδρικό τμήμα που ακολουθεί τον αγωγό εισόδου, στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται η βαθμίδα αξονικού συμπιεστή.

**Αποκλίνων Αγωγός Εξόδου:** Πρόκειται για αγωγό με κωνική διαμόρφωση, που μέσω της αύξησης του εμβαδού πραγματοποιεί ανάκτηση στατικής πίεσης και επιτρέπει την κάλυψη ευρύτερης περιοχής παροχών απ' ό,τι θα πετυχαίνονταν αν η ροή εξέρχονταν κατ' ευθείαν στην ατμόσφαιρα από την έξοδο του συμπιεστή.

**Στραγγαλιστική Διάταξη Εξόδου:** Πρόκειται για μια κωνική επιφάνεια που μπορεί να μετακινείται αξονικά και να αυξάνει ή μειώνει τη διατομή εξόδου στην ατμόσφαιρα. Σε μεγάλη αξονική απόσταση από τα χείλη του αποκλίνοντος αγωγού εξόδου η ταχύτητα εξόδου δεν επηρεάζεται. Όταν μικραίνει η απόσταση, μειώνεται η διατομή εξόδου στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας εξόδου και συνεπώς των απωλειών σε δυναμική πίεση

εξόδου. Με αυτό τον τρόπο, "κλείσιμο" της στραγγαλιστικής διάταξης προκαλεί μετακίνηση προς υψηλότερους λόγους πίεσης πάνω σε μια χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας.

Η **κίνηση της βαθμίδας συμπιεστή** γίνεται από ηλεκτρικό κινητήρα που βρίσκεται τοποθετημένος στο εσωτερικό της κέλυφος. Ο κινητήρας αυτός είναι ασύγχρονος, η ταχύτητα περιστροφής του δε ελέγχεται από μετατροπέα συχνότητας. Τροφοδοτείται δηλαδή με εναλλασσόμενο ρεύμα, του οποίου η συχνότητα ελέγχεται και μπορεί να ρυθμιστεί από μια ηλεκτρονική συσκευή που ονομάζεται μετατροπέας συχνότητας. Με τη συσκευή αυτή είναι δυνατή η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής σε οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή μεταξύ 0 και 3000 rpm (παρ' όλα αυτά, για λόγους μειωμένης απόδοσης και προβλημάτων ψύξης του ηλεκτρικού μέρους, δεν συνιστάται λειτουργία με ταχύτητα περιστροφής κάτω των 1000 rpm).

### 3. Μετρητικά Όργανα - Μετρήσεις

Για να προσδιοριστούν τα μεγέθη που χρειάζονται για να χαραχθεί η χαρακτηριστική του συμπιεστή καθώς και τα μεγέθη του πεδίου ροής σε διάφορες θέσεις, χρησιμοποιούνται μετρητικά όργανα που περιγράφονται σύντομα παρακάτω. Περισσότερες πληροφορίες για την αρχή λειτουργίας κάθε οργάνου μπορεί ο αναγνώστης να βρει στις αναφορές που δίνονται στη βιβλιογραφία.

**Σωλήνας Pitot-Prandl:** Είναι τοποθετημένος στην είσοδο της πτερωτής και χρησιμοποιείται για μέτρηση ολικής πίεσης και ταχύτητας στη θέση αυτή. Η κατεύθυνση της ροής είναι στη θέση αυτή αξονική και έτσι είναι επαρκής η μέτρηση με τυποποιημένο σωλήνα Pitot-Prandl.

**Σωλήνες Πίεσης Τριών Οπών:** Χρησιμοποιούνται δυο τέτοιοι σωλήνες, ένας τοποθετημένος στο διάκενο μεταξύ εξόδου της κινητής περύγωσης και εισόδου της σταθερής και ένας τοποθετημένος στην έξοδο της σταθερής περύγωσης. Κάθε σωλήνας είναι τοποθετημένος σε μηχανισμό μετακίνησης που επιτρέπει τη μετατόπιση του αισθητήριου (κεφαλή του σωλήνα) ακτινικά, καλύπτοντας την απόσταση από το πόδι ως την κεφαλή του δακτυλοειδούς αγωγού. Επιπλέον, ο σωλήνας που είναι τοποθετημένος στην έξοδο της σταθερής περύγωσης μαζί με το μηχανισμό ακτινικής μετατόπισης είναι τοποθετημένος πάνω σ' ένα δεύτερο μηχανισμό που επιτρέπει περιφερειακή μετακίνηση κατά γωνία που καλύπτει δύο βήματα της σταθερής περύγωσης. **Για τις ανάγκες της παρούσας εργαστηριακής άσκησης και οι δύο σωλήνες είναι τοποθετημένοι στο μέσον του ύψους του δακτυλοειδούς αγωγού.**

Οι σωλήνες πίεσης συνδέονται με μορφοτροπείς πίεσης. Μια επιπλέον μέτρηση πίεσης παίρνεται στην έξοδο του συμπιεστή, από 4 οπές στατικής πίεσης στο εξωτερικό κέλυφος. Οι οπές αυτές είναι διασυνδεδεμένες σε διάταξη πολλαπλής σύνδεσης, έτσι ώστε να παίρνεται απ' ευθείας η μέση στατική πίεση από τις τέσσερις οπές.

#### **4. Η Διαδικασία Εκτέλεσης Μιας Δοκιμής**

Κατ' αρχήν, ας δούμε πώς γίνεται η δοκιμή για την μέτρηση του πεδίου ροής στο εσωτερικό της μηχανής. Οι μετρητικές θέσεις, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, δίνουν τη δυνατότητα μέτρησης στην είσοδο και την έξοδο τόσο της κινητής όσο και της σταθερής πτερύγωσης.

Στην είσοδο της κινητής πτερύγωσης, η ροή έρχεται από τον συγκλίνοντα αγωγό εισόδου και έχει μια αρκετά ομοιόμορφη κατανομή χαρακτηριστικών τόσο περιφερειακά όσο και ακτινικά (γεγονός που έχει πιστοποιηθεί κατά την αρχική συγκρότηση της εγκατάστασης). Έτσι επαρκεί μέτρηση σε μια και μόνο θέση, για να έχουμε πλήρη εικόνα του πεδίου ροής στην είσοδο.

**Στην έξοδο της κινητής πτερύγωσης**, λόγω της περιστροφής των πτερυγίων έχουμε μια περιφερειακή ομοιομορφία, που μπορεί να επηρεαστεί μόνο από την ύπαρξη ανομοιομορφιών στην είσοδο ή στην έξοδο της μηχανής (των οποίων η παρουσία γίνεται αισθητή ανάντη -πεδίο ροής ελλειπτικού χαρακτήρα). Υπάρχει όμως σημαντική ακτινική μεταβολή των χαρακτηριστικών της ροής. Έτσι στη θέση αυτή για πλήρη χαρτογράφηση του πεδίου ροής απαιτείται ακτινική σάρωση του πεδίου ροής, δηλαδή τοποθέτηση του αισθητήρα σε διάφορες ακτινικές θέσεις, αρχίζοντας από την εσωτερική ακτίνα (πόδι) και προχωρώντας προς την εξωτερική (κεφαλή). Δεδομένου ότι εδώ ενδιαφερόμαστε για μια μονοδιάστατη περιγραφή της ροής, μετρήσεις θα ληφθούν σε μια μόνο ακτινική θέση, στο μισό του ύψους, που θεωρείται αντιπροσωπευτική της ροής στη συγκεκριμένη διατομή.

**Στην έξοδο της σταθερής πτερύγωσης** η ανομοιομορφία είναι τόσο ακτινική όσο και περιφερειακή. Η περιφερειακή οφείλεται στο ότι πίσω από κάθε σταθερό πτερύγιο σχηματίζεται ομόρρους που έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή μεγεθών της ροής κατά την κατεύθυνση εγκάρσια προς την μέση γραμμή των πτερυγίων. Έτσι, για λεπτομερή απεικόνιση του πεδίου ροής θα ήταν απαραίτητη η πραγματοποίηση τόσο ακτινικής όσο και περιφερειακής σάρωσης του πεδίου ροής. Και πάλι για τον σκοπό της παρούσας άσκησης μετρήσεις θα ληφθούν σε μία μόνο ακτινική και μία περιφερειακή θέση, που αντιστοιχεί στο κέντρο του καναλιού εξόδου των σταθερών πτερυγίων.

Μετά από τα παραπάνω η εκτέλεση μιας δοκιμής πραγματοποιείται στα ακόλουθα βήματα.

##### **A. Μέτρηση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Απωλειών της Εγκατάστασης**

- Τίθεται σε λειτουργία ο κινητήρας και τοποθετείται η στραγγαλιστική διάταξη σε πλήρως ανοιχτή θέση.
- Η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται σε περιοχή τιμών που είναι προκαθορισμένη.
- Για κάθε τιμή της ταχύτητας καταγράφονται οι ενδείξεις και από τους τρεις σωλήνες καθώς και η μέτρηση στατικής πίεσης εξόδου.

## B. Μέτρηση Χαρακτηριστικής Καμπύλης Λειτουργίας και Ροής στο Εσωτερικό της Βαθμίδας.

Μετά το τέλος της προηγούμενης διαδικασίας, με τα όργανα στην ίδια θέση, ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε συγκεκριμένη τιμή, ενώ η στραγγαλιστική διάταξη τοποθετείται σε πλήρως ανοιχτή θέση.

Αρχίζοντας από τη θέση αυτή, αρχίζει να κλείνει με μετακίνηση σε διαδοχικές θέσεις μικρότερου ανοίγματος που υποδεικνύονται από τον επιβλέποντα την άσκηση. Για κάθε θέση της στραγγαλιστικής διάταξης καταγράφονται όλα τα μεγέθη όπως και παραπάνω.

### 5. Αναγωγή Μετρητικών Δεδομένων - Υπολογισμός Παραμέτρων

Από τα δεδομένα των μετρήσεων μπορούν τώρα να προσδιοριστούν οι ταχύτητες στις διάφορες θέσεις μέτρησης καθώς και συνολικές παράμετροι επιδόσεων της βαθμίδας.

Για κάθε ένα από τους μετρητικούς σωλήνες έχουμε κατ' αρχήν τις ακόλουθες ποσότητες:

Σωλήνας Pitot: Ολική πίεση  $p_{t1}$ , στατική πίεση  $p_{s1}$ .

Σωλήνες Τριών Οπών: Από τις μετρούμενες ποσότητες και με βάση τις καμπύλες βαθμονόμησης που δίνονται κατά τη διεξαγωγή της άσκησης, προσδιορίζονται η ολική πίεση  $p_t$ , δυναμική πίεση  $q$ , γωνία της ροής με τον άξονα της κεφαλής του σωλήνα. Έχοντας καταγράψει τη γωνιακή θέση, καθορίζεται η γωνία της ροής σχετικά με τον άξονα της μηχανής.

Με τα δεδομένα αυτά υπολογίζονται τα στοιχεία της ροής των τριγώνων ταχυτήτων και συνολικές παράμετροι επιδόσεων με βάση τις σχέσεις που ακολουθούν. Χρησιμοποιούνται τα τυπικά σύμβολα των διαφόρων ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται στα μαθήματα των Θερμικών Στροβιλομηχανών.

Πυκνότητα: 
$$\rho = \frac{P_{atm}}{R_g T_{atm}}$$

Δυναμική Πίεση: 
$$q = P_t - P_s$$

Απόλυτη Ταχύτητα: 
$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} q}$$

Περιφερειακή συνιστώσα ταχύτητας: 
$$V_u = V \cdot \sin \alpha$$

Αξονική συνιστώσα ταχύτητας: 
$$V_a = V \cdot \cos \alpha$$

Παροχή μάζας: 
$$m = \rho \cdot A_1 \cdot V_{a1}$$

Διορθωμένη Παροχή μάζας: 
$$m_c = \frac{m \cdot \sqrt{\theta}}{\delta}$$

Περιφερειακή συνιστώσα σχετικής ταχύτητας: 
$$W_u = V_u - U$$

Σχετική γωνία ροής: 
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{W_u}{V_a}$$

Γωνία στροφής περυγίου ρότορα:

$$\theta = \beta_1 - \beta_2$$

Βαθμός απόδοσης κατά μήκος γραμμής ροής:

$$\eta_{t1-t2} = \frac{\Delta h_{ts}}{\Delta h_t} \cong \frac{\bar{P}_{t2} - \bar{P}_{t1}}{\rho U \Delta V_u}$$

Παράμετρος φόρτισης:

$$\Psi_{t1t2} = \frac{\bar{P}_{t2} - \bar{P}_{t1}}{\frac{1}{2} \rho U_{tip}^2}$$

Παράμετρος παροχής:

$$\Phi = \frac{V_{a1}}{U_{tip}}$$

## 6. Έκθεση αποτελεσμάτων - Αξιολόγηση

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που μετρήθηκαν ζητείται να υπολογιστούν οι επιδόσεις του συμπιεστή και να υπολογιστούν όλα τα απαιτούμενα στοιχεία για τη συμπλήρωση του φυλλαδίου που διανέμεται κατά τη διεξαγωγή της εργαστηριακής άσκησης. **Το συμπληρωμένο φυλλάδιο, και μόνον αυτό, είναι εκείνο που παραδίδεται για την εργαστηριακή άσκηση.**

Η παράδοση του συμπληρωμένου φυλλαδίου είναι υποχρεωτική για κάθε φοιτητή, στα πλαίσια του μαθήματος 'Θερμικές Στροβιλομηχανές'.

## Βιβλιογραφία

1. Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές, Κ. Παπαηλιού, Κ. Μαθιουδάκης, Κ. Γιαννάκογλου, Αθήνα 1997
2. Εργαστηριακή Άσκηση Βαθμονόμησης Σωλήνα Πίεσης Τριών Οπών, Κ. Μαθιουδάκης, 1999.