

# ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ

## 5<sup>ο</sup> Εξάμηνο Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

### ΘΕΜΑ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟ ΣΠΙΤΙ

Ακαδημαϊκό Έτος 2013 – 2014

Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

#### Βασικές Οδηγίες:

Η επεξεργασία–επίλυση αυτού του θέματος και η παράδοση τεύχους με τη λύση του στο γραφείο του διδάσκοντος είναι υποχρεωτικά, στο πλαίσιο του μαθήματος Θερμικές Στροβιλομηχανές, για όσους δεν έχουν παραδώσει στο παρελθόν ανάλογο θέμα. Όσοι έχουν παραδώσει το (αντίστοιχο) θέμα παλαιότερα δεν υποχρεούνται να το ξανακάνουν. Η εργασία αυτή πρέπει να παραδοθεί **ΥΠΟΧΡΕΩΤΙΚΑ ΧΕΙΡΟΓΡΑΦΗ**, σε ξεχωριστό τεύχος από αυτό της τεχνικής έκθεσης που αντιστοιχεί στην εργαστηριακή άσκηση. Ενδεχομένως, επισυνάψτε λίστα προγραμμάτων που χρησιμοποιήσατε (ΔΕΝ χρειάζεται CD ή δισκέτα).

Όσοι παραδώσουν το θέμα το αργότερο μέχρι την προπαραμονή (αν αυτή είναι αργία, μεταφέρεται στην ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗ της αργίας εργάσιμη) της ημέρας εξέτασης του μαθήματος, κατά την ΠΡΩΤΗ εξεταστική περίοδο του 2013-14 μπορούν να συμμετάσχουν στις εξετάσεις αυτής της περιόδου. Οι υπόλοιποι μπορούν εναλλακτικά να το παραδώσουν μέχρι την προπαραμονή (ισχύει ότι και πριν για τις αργίες) της ημέρας εξέτασης του μαθήματος, κατά τη ΔΕΥΤΕΡΗ εξεταστική περίοδο 2013-14. Για πρακτικούς λόγους δεν γίνονται δεκτά τα θέματα που παραδίδονται την ημέρα των εξετάσεων ή και την παραμονή αυτής. Στη διαδικτυακή διεύθυνση του μαθήματος μπορείτε να βρείτε οποιαδήποτε μελλοντική διευκρίνιση (ή, ενδεχομένως, διορθώσεις) επί του θέματος.

[ΟΝ], [ΕΠ] και [ΠΑ] είναι τρεις ακέραιοι (από το 1 ως και το 24) που αντιστοιχούν στον αύξοντα αριθμό στο ελληνικό αλφάβητο του πρώτου γράμματος του ονόματος-επωνύμου-πατρωνύμου του σπουδαστή, αντίστοιχα.

**ΠΡΟΣΟΧΗ :** Εργασίες χωρίς απάντηση σε όλα τα ερωτήματα δεν γίνονται αποδεκτές. Δώστε, καθαρά, στο εξώφυλλο της εργασίας σας τις τιμές των [ΟΝ], [ΕΠ] και [ΠΑ] που χρησιμοποιήσατε. Η παράδοση της εργασίας συνοδεύεται με προφορική εξέταση. Τις τελευταίες μέρες πριν την προθεσμία παράδοσης θα βγεί πρόγραμμα ωρών παράδοσης ανά ομάδες σπουδαστών. Μην φέρνετε την εργασία τελευταία στιγμή γιατί αυτό μπορεί να σημαίνει μεγάλη αναμονή. Μην τυπώνετε και φέρνετε μαζί και το παρόν κείμενο.

## ΘΕΜΑ Α:

Τα παρακάτω αφορούν επαναληπτική βαθμίδα αξονικού στροβίλου με συντελεστή αντίδρασης  $r = \frac{[ON]}{24}$ , η οποία έχει σταθερή αξονική συνιστώσα της ταχύτητας αλλά και σταθερή ακτίνα του μονοδιάστατου υπολογισμού στις τρεις χαρακτηριστικές θέσεις της (1, 2, 3, κατά τα γνωστά). Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ολικές-προς-ολικές συνθήκες της βαθμίδας, ο  $\eta_{t-t,T}$  δίνεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο του βιβλίου (σχέση 8.7.8, σελίδα 8.29). Εμπλέκει τους συντελεστές απωλειών των ακροφυσίων  $\zeta_N$  και της κινητής περύγωσης  $\zeta_R$ . Επίσης, εμπλέκει το λόγο στατικών θερμοκρασιών  $\frac{T_3}{T_2}$ , έναν λόγο ο οποίος θα μπορούσε να παραλειφθεί μόνο υπό κάποιες προϋποθέσεις (ποιές είναι αυτές; - με την ευκαιρία, αξίζει να το προσέξετε αυτό, ενόψει εξετάσεων!). Για να απλοποιηθεί η άσκηση, έστω ότι αμελούμε αυτόν το λόγο, έστω και χωρίς να ισχύουν οι προϋποθέσεις που αναφέραμε. Οι δύο συντελεστές απωλειών δίνονται από την κοινή (απλοποιημένη, για συγκεκριμένους αριθμούς Reynolds κλπ.) έκφραση

$$\zeta = 0.04 + 0.06 \left( \frac{\varepsilon}{100} \right)^2$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η γωνία απόκλισης (στροφής, σε μοίρες) της (της απόλυτης για τη σταθερή περύγωση, της σχετικής για την κινητή περύγωση) ροής σε κάθε περύγωση. Για να ξεκινήσετε, διαβάστε καλά το σχετικό κεφάλαιο του βιβλίου και διατυπώστε τον  $\eta_{t-t,T}$  συναρτήσει των  $\Phi$ ,  $\Psi$  και  $r$ .

- (A1) Δημιουργήστε ένα ολοσέλιδο γράφημα (λ.χ. σε μια κόλλα με τετραγωνάκια ή μιλιμετρέ) με οριζόντιο άξονα το συντελεστή παροχής  $\Phi$  και κατακόρυφο άξονα το συντελεστή φόρτισης  $\Psi$ . Βολικό είναι ο άξονας των  $\Phi$  να είναι στη μεγάλη πλευρά της σελίδας. Το διάγραμμα θα περιλαμβάνει τρεις ισοσταθμικές καμπύλες που να αντιστοιχούν σε τρεις επιλεγμένες τιμές του  $\eta_{t-t,T}$ , τις 90%, 92.5% και 95%, καθεμιά από αυτές χαραγμένη αφού πρώτα υπολογισθούν τουλάχιστον 6 σημεία, δηλαδή ζεύγη τιμών ( $\Phi, \Psi$ ), επ' αυτής. Θα ήταν εκπαιδευτικά χρήσιμο για σας να φροντίσετε η κάθε καμπύλη σταθερής τιμής του  $\eta_{t-t,T}$  να έχει σημεία που πρακτικά να αντιστοιχούν σε χαμηλές και υψηλές τιμές του  $\Psi$ , για το ίδιο  $\Phi$ .
- (A2) Διερευνήστε, πάλι για την τιμή του βαθμού αντίδρασης που σας αντιστοιχεί, το πότε μεγιστοποιείται ο  $\eta_{t-t,T}$ . Η διερεύνηση να είναι μαθηματική, το δε αποτέλεσμα της να τοποθετηθεί στο διάγραμμα και να είναι, προφανώς, συμβατό με τις καμπύλες που δείξατε πριν.
- (A3) Για ένα σετ τιμών ( $\Phi, \Psi$ ) το οποίο να αντιστοιχεί σε  $\eta_{t-t,T} = 0.95$  και ένα άλλο που αντιστοιχεί σε  $\eta_{t-t,T} = 0.90$  υπολογίστε και σχεδιάστε τα τρίγωνα ταχυτήτων και τις χωρίς πάχος αεροτομές πτερυγίων (σχεδιάστε, δηλαδή, 2 καμπύλες για 2 αεροτομές) χρησιμοποιώντας κατάλληλου βαθμού πολυώνυμα. Κάντε μια δική σας υπόθεση για την γωνία κλίσης του κάθε πτερυγίου και δικαιολογήστε την. Ο σχεδιασμός των πτερυγίων να γίνει συνδυασμένο (σταθερή περύγωση δίπλα στην κινητή), ώστε να φαίνονται συμβατά με τα τρίγωνα ταχυτήτων.

Η τεχνική σας έκθεση πρέπει να περιλαμβάνει τις ισχύουσες εξισώσεις, τον τρόπο που τις χειριστήκατε ώστε να κατασκευασθούν οι καμπύλες και πίνακες με τα στοιχεία των σημείων που μεταφέρατε στο διάγραμμα ώστε να σχεδιαστούν οι ισοσταθμικές. Για να γίνουν οι ισοσταθμικές, αφού τοποθετήσετε τα σημεία στο χαρτί, κάντε την παρεμβολή των σημείων 'με το χέρι'.

## ΘΕΜΑ Β:

Η μελέτη αυτή αφορά αεριοστρόβιλο μηχανικής ισχύος, απλής ατράκτου. Τα δύο εργαζόμενα μέσα, αέρας και καυσάεριο, θεωρούνται τέλεια αέρια. Για το καυσάεριο βρείτε τις σταθερές από συναφείς ασκήσεις του βιβλίου. Η έξοδος του καυσαερίου από τον αεριοστρόβιλο γίνεται στην πίεση εισόδου του αέρα σε αυτόν, χωρίς απώλειες πίεσης στους ενδιάμεσους αγωγούς και το θάλαμο καύσης. Θα συμβολίζουμε με 1, 2, 3 και 4 την είσοδο του συμπιεστή, την έξοδο του, την είσοδο του στρόβιλου και την έξοδό του, αντίστοιχα. Ο αέρας εισέρχεται με  $1 \text{ bar}$  και  $290 \text{ K}$  και η θερμοκρασία καυσαερίου στην είσοδο του στρόβιλου (θέση 3) είναι ίση με  $1420 + 3[ON] \text{ K}$ . Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή είναι  $10.2 + 0.5([PIA] - 12)/24$ . Η καθαρή ισχύς που ο αεριοστρόβιλος αποδίδει στην έξοδό του είναι  $1150 + 400([EII] - 12)/24 \text{ kW}$ . Συμπιεστής και στρόβιλος λειτουργούν με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης (ολικές-προς-ολικές συνθήκες) ίσο με 0.81 και 0.83, αντίστοιχα, σε οποιαδήποτε από τις περιπτώσεις που ακολουθούν.

- (B1) Υπολογίστε το θερμικό βαθμό απόδοσης του αεριοστρόβιλου και την παροχή μάζας αέρα ή καυσαερίου που διακινεί. Ο θάλαμος καύσης δεν προσθέτει μάζα στο εργαζόμενο μέσο λόγω του καυσίμου.
- (B2) Υπολογίστε το θερμικό βαθμό απόδοσης του αεριοστρόβιλου αν χρησιμοποιείται ανακύκλιση θερμότητας των καυσαερίων. Για ομοιομορφία, συμβολίστε με 6 την έξοδο από τον εναλλάκτη θερμότητας που προκαλεί την ανακύκλιση θερμότητας και με 5 την είσοδο στο θάλαμο καύσης. Έτσι το θερμό ρεύμα στον εναλλάκτη είναι το  $4 \rightarrow 6$  και το ψυχρό ρεύμα είναι το  $2 \rightarrow 5$ . Ο εναλλάκτης έχει βαθμό εκμετάλλευσης ίσο με  $\eta_{exch} = 0.78$  (οριζόμενο ως το πηλίκο της θερμότητας που λαμβάνει το ψυχρό ρεύμα προς αυτήν που θα λάμβανε αν στην έξοδό του είχε τη θερμοκρασία εισόδου στον εναλλάκτη του θερμού ρεύματος).
- (B3) Στη συνέχεια, προσθέστε και αναθέρμανση στο στρόβιλο και υπολογίστε τις ίδιες ποσότητες. Η αναθέρμανση γίνεται με εξωτερική πηγή θερμότητας. Ουσιαστικά, η εκτόνωση στο στρόβιλο περιλαμβάνει τρεις μεταβολές:  $3 \rightarrow 7 =$  στρόβιλος ΥΠ,  $7 \rightarrow 8 =$  αναθέρμανση και  $8 \rightarrow 4 =$  στρόβιλος ΧΠ. Η αναθέρμανση γίνεται σταθερά στα  $3 \text{ bar}$  και με τρόπο που εξασφαλίζει ότι το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στο στρόβιλο ΥΠ με τη θερμοκρασία με την οποία εισέρχεται και στο στρόβιλο ΥΠ. Υπολογίστε τις ίδιες ποσότητες.
- (B4) Στην τελευταία περίπτωση, αν αυξάνονταν η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο (θέση 3) ποιά μεταβολή θα προκαλούσε στο θερμικό βαθμό απόδοσης ;

Σε κάθε ερώτημα να γίνει το σχεδιάγραμμα της εγκατάστασης και να σχεδιαστεί το διάγραμμα  $T - S$ . Στο τέλος του κειμένου που αφορά το τμήμα αυτό του θέματος ενσωματώστε μια χειρόγραφη σελίδα με πινακοποιημένες πιέσεις και θερμοκρασίες σε κάθε θέση του αεριοστρόβιλου, για τα σενάρια (B1), (B2), (B4).

## ΘΕΜΑ Γ:

Σχεδιάστε–υπολογίστε μονοδιάστατα τις επτά (7) βαθμίδες ενός επταβάθμιου αξονικού συμπιεστή, που λειτουργεί με αέρα (τέλειο αέριο), σε συνθήκες  $1\text{bar}$  και  $300\text{K}$ .

Δίνεται η γεωμετρία των δύο κελυφών, που ουσιαστικά καθορίζουν το ύψος των πτερυγίων, αν αμεληθεί το ακτινικό διάκενο. Η ακτίνα ποδός των πτερυγίων της κινητής (ακτίνα κεφαλής των πτερυγίων της σταθερής) πτερύγωσης μεταβάλλεται γραμμικά από την είσοδο του συμπιεστή ( $11.3\text{cm}$ ) μέχρι την έξοδό του ( $14.95\text{cm}$ ). Η ακτίνα κεφαλής των πτερυγίων της κινητής (ακτίνα ποδός των πτερυγίων της σταθερής) πτερύγωσης μεταβάλλεται επίσης γραμμικά από την είσοδο του συμπιεστή ( $22.5\text{cm}$ ) μέχρι την έξοδό του ( $19.0\text{cm}$ ). Η γραμμική μεταβολή που αναφέραμε νοείται ως προς τις 14 πτερυγώσεις, δηλαδή η συνολική αλλαγή στο γεωμετρικό μέγεθος επιμερίζεται κατά  $1/14$  σε κάθε πτερύγωση (κινητή ή σταθερή).

Ο συμπιεστής έχει συνολικό λόγο πίεσης ίσο με  $4.15 + 0.20 * \frac{[ΠΑ]}{24}$  και συνολικό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης ολικών-προς-ολικές συνθήκες ίσο με  $0.83 + 0.05 * \frac{[ΕΠ]}{24}$ . Λειτουργεί στις  $15000 + 600 * \frac{([ΟΝ]-12)}{24} \text{RPM}$  και διακινεί  $19 + 0.2 * \frac{([ΕΠ]-12)}{24} \text{kg/sec}$  αέρα. Όλες οι βαθμίδες συναλλάσσονται το ίδιο έργο ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου. Όλες οι κινητές πτερυγώσεις έχουν την ίδια ποιότητα αεροθερμοδυναμικού σχεδιασμού (ίδιο πολυτροπικό βαθμό απόδοσης). Σε κάθε σταθερή πτερύγωση, η απώλεια ολικής πίεσης είναι ίση με το 12% της συνολικής μεταβολής ολικής πίεσης σε ολόκληρη την αντίστοιχη βαθμίδα.

Στην είσοδο κάθε βαθμίδας (άρα και στην έξοδο της προηγούμενης), η απόλυτη γωνία της ροής είναι ίση με  $(1 + \lambda)$  μοίρες, όπου  $1 \leq \lambda \leq 7$  είναι ο αύξων αριθμός της βαθμίδας.

- (Γ1) Υπολογίστε στατικά και ολικά θερμοδυναμικά μεγέθη στις τρεις χαρακτηριστικές θέσεις κάθε βαθμίδας. Πινακοποιήστε σε μια σελίδα ολικές και στατικές πιέσεις και θερμοκρασίες, μεταβολή εντροπίας ανά πτερύγωση, μέτρα απόλυτης και σχετικής ταχύτητας και απόλυτες και σχετικές γωνίες. Για ενιαίο συμβολισμό, χρησιμοποιήστε λ.χ. το σύμβολο  $T_{t2(4)}$  για την ολική θερμοκρασία στην έξοδο της κινητής πτερύγωσης (θέση 2) της τέταρτης βαθμίδας, κοκ.
- (Γ2) Υπολογίστε τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης των κινητών πτερυγώσεων, τον πολυτροπικό και ισεντροπικό βαθμό απόδοσης κάθε βαθμίδας και σχολιάστε αυτά τα μεγέθη ως προς τα αντίστοιχα ολόκληρου του συμπιεστή.
- (Γ3) Σχεδιάστε (με κλίμακα) τη θερμοδυναμική μεταβολή σε διάγραμμα  $(T - S)$ .
- (Γ4) Υπολογίστε και σχεδιάστε τα τρίγωνα ταχυτήτων στη δεύτερη βαθμίδα (στις τρεις χαρακτηριστικές θέσεις της).

Στο τέλος της εργασίας σας παρουσιάστε (σε μια ή περισσότερες σελίδες, μαζεμένα) τα πινακοποιημένα αποτελέσματά σας. Να φαίνονται σε πίνακες οι ολικές και στατικές πιέσεις και θερμοκρασίες, η αξονική ταχύτητα, οι απόλυτες και σχετικές γωνίες της ροής σε όλες τις θέσεις του πολυβάθμιου συμπιεστή. Επίσης, πινακοποιήστε και παρουσιάστε, σε όλες τις βαθμίδες, τις επιβραδύνσεις απόλυτης και σχετικής ταχύτητας σε σταθερές και κινητές πτερυγώσεις αντίστοιχα. Τα αποτελέσματά σας θα ελέγχονται με αυτά διαθέσιμου προγράμματος υπολογιστή.