



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ "ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ"
ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Κ.Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ, Καθηγητής ΕΜΠ
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ 2024-2025

Η παράδοση εργασίας (homework) είναι υποχρεωτική για τη συμμετοχή στην εξέταση του μαθήματος. Η εργασία είναι ατομική.

ΒΑΘΜΟΛΟΓΗΣΗ: Η εργασία που θα παραδώσετε μαζί με την εργαστηριακή άσκηση που θα κάνετε ή κάνατε ήδη προσμετράται στο βαθμό. Όσοι έχουν παραδώσει εργασία σε προηγούμενο εξάμηνο θα προσμετρηθεί ο προηγούμενος βαθμός εργασίας. Αν αποφασίσουν να ξανακάνουν την εργασία, θα μετρήσει ο νέος βαθμός και θα «ξεχαστεί» ο παλιός. Κατά την παράδοση μπορείτε να επιλέξετε: (α) "τυπική" παράδοση ή, αναλόγως της ζήτησης και των χρονικών περιθωρίων, (β) παράδοση με εξέταση επί της εργασίας (αλλά και συναφή ύλη θερμικών στροβιλομηχανών) με τον διδάσκοντα για αυξημένη συμμετοχή της εργασίας στον τελικό βαθμό σας. Αν επιλέξετε το σενάριο (β) παρακαλώ δηλώστε το στην κορυφή της πρώτης σελίδας της εργασίας που θα παραδώσετε.

DEADLINES: Ανεξάρτητα του τρόπου παράδοσης, η παράδοση της εργασίας πρέπει να γίνει το αργότερο μέχρι την Παρασκευή (μέχρι τις 23:59) της προηγούμενης εβδομάδας πριν την ημέρα της επίσημης εξέτασης του μαθήματος (βάσει του προγράμματος που θα ανακοινώσει η Γραμματεία) στην οποία επιθυμεί κάποια/ος να συμμετάσχει. Αυτό ισχύει και για τις 3 εξεταστικές περιόδους.

[K3], [K2], [K1] είναι τα τελευταία 3 ψηφία του Αριθμού Μητρώου σας στη Σχολή (αντιπροτελευταίο, προτελευταίο και τελευταίο, αντίστοιχα). Γράψτε, στο εξώφυλλο της εργασίας σας τις τιμές των [K1], [K2] και [K3] (μαζί με το ονοματεπώνυμό σας!) που χρησιμοποιήσατε.

ΑΠΟΔΟΧΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: Εργασίες χωρίς απάντηση σε όλα τα ερωτήματα δεν γίνονται αποδεκτές. Οι μη-αποδεκτές εργασίες ανακοινώνονται στην ιστοσελίδα του μαθήματος.

ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ: Οι παραδόσεις εργασιών γίνονται στο Helios – μην τις στέλνετε με email. Μια χειρόγραφη, αλλά καλογραμμένη-διαβάσιμη, τεχνική έκθεση (scanned, μειώστε όμως το μέγεθος του αρχείου-χρησιμοποιήστε το iloverpdf, ή κάτι αντίστοιχο, αν πρέπει) είναι αρκετή – δεν χρειάζεται να δακτυλογραφείτε. Στην ψηφιακή παράδοση, παραδίνετε ΕΝΑ ΑΡΧΕΙΟ (pdf – ενώστε εσείς σε ένα PDF ότι έχετε: σκαναρισμένα χειρόγραφα, σχήματα σε ΗΥ, κώδικες κλπ), με το όνομά σας και τον αριθμό μητρώου σας στη Σχολή στην πρώτη σελίδα. Μην ξεχάσετε να βάλετε πινακοποιημένα τα τελικά αποτελέσματα σε κάθε άσκηση. Εναλλακτικά, μπορείτε να φέρετε οι ίδιες/οι τη χειρόγραφη εργασία σας στο γραφείο του διδάσκοντος, ειδικά αν διαλέγετε το σενάριο (β).

ΔΙΕΥΚΡΙΝΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ: Στην ιστοσελίδα του μαθήματος μπορείτε να βρείτε οποιαδήποτε μελλοντική διευκρίνιση (ή, ενδεχομένως, διορθώσεις) επί του θέματος. Είστε ευπρόσδεκτες/οι για ερωτήσεις στο γραφείο του διδάσκοντος. Και οι 3 εργασίες μοιάζουν με παλιά θέματα εξετάσεων, ενδεχομένως εμπλουτισμένες με περισσότερες υπολογιστικές απαιτήσεις, μιας και τις υλοποιείτε με πολύ περισσότερη άνεση και έχοντας πρόσβαση σε ΗΥ. Άρα, αποτελούν εξαιρετική προετοιμασία για τις εξετάσεις. Σε όσες/όσους δεν παραδώσουν τη φετινή εργασία (γιατί την έχουν κάνει σε προηγούμενο έτος), συνιστάται τουλάχιστον να δουν τις ασκήσεις αυτές και τη

λύση τους, πριν τις φετινές εξετάσεις. Η εργασία, σκόπιμα, δίνει βάρος στο τμήμα της ύλης που έχει διδαχθεί πριν τις διακοπές του Πάσχα.

Άσκηση Α

Σχεδιάστε τα πτερύγια μιας επαναληπτικής βαθμίδας αξονικού συμπιεστή με σταθερή αξονική ταχύτητα και γραμμική ταχύτητα περιστροφής δια μέσου της. Και στις δύο πτερυγώσεις, πραγματοποιείται μέγιστη επιβράδυνση της ροής κατά de Haller. Η γωνία εισόδου της ροής στη βαθμίδα είναι [K1] μοίρες. Η γωνία κλίσης της κινητής πτερυγώσης είναι 17+[K2] μοίρες, ενώ της σταθερής είναι 20+[K3] μοίρες. Το πρόσημο στις γωνίες κλίσης βάλτε το μόνες/οι σας.

(A1) Υπολογίστε όλες τις γωνίες ροής στις τρεις χαρακτηριστικές θέσεις της βαθμίδας. Σχεδιάστε την πτερυγώση με πτερύγια μηδενικού πάχους και μοναδιαίας χορδής χρησιμοποιώντας για τη μορφή τους πολυώνυμο κατάλληλου βαθμού. Δεχθείτε ότι οι γωνίες μετάλλου στα χωρίς πάχος πτερύγια είναι ίσες με τις εκεί γωνίες ροής. Τα πτερύγια να τα σχεδιάσετε με ακρίβεια (στο ίδιο σχήμα) μαζί με τα τρίγωνα ταχυτήτων.

(A2) Για την πτερυγώση που σχεδιάσατε μεταβάλλεται το Φ (από 80% ως 120% της τιμής του ερ. (A1)). Όπως και πριν, η γεωμετρία των χωρίς πάχος πτερυγίων καθορίζει την κατεύθυνση της ροής στην έξοδο της κινητής και σταθερής πτερυγώσης. Επίσης, η γραμμική ταχύτητα περιστροφής δεν αλλάζει. Σχεδιάστε την καμπύλη (Φ, Ψ) υπολογίζοντας 10 σημεία που ανήκουν σε αυτή, και που προφανώς ανήκουν στο παραπάνω διάστημα. Σχεδιάστε μαζί τα τρίγωνα ταχυτήτων σε δύο σημεία της καμπύλης αυτής (ένα σημείο με αύξηση του Φ και ένα άλλο με μείωση του Φ , σε σχέση με το ερ. (A1)) - στο ίδιο σχήμα βάλτε και τα τρίγωνα του ερ. (A1).

Άσκηση Β

Περωτή ακτινικού συμπιεστή τροφοδοτείται με αέρα (τέλειο αέριο). Στη θέση (1), από το hub (θέση 1H) ως το shroud (θέση 1S) η εισερχόμενη ροή παραμένει καθαρά αξονική και με σταθερό μέτρο απόλυτης ταχύτητας σε κάθε ακτινική θέση, αλλά και σταθερές-ομοιόμορφες ολικές συνθήκες (T_{t1}, ρ_{t1}). Ας συμβολίσουμε με c_1 και c_{1t} την ταχύτητα του ήχου στις στατικές και ολικές συνθήκες ροής στη θέση 1H. Με (2) συμβολίζουμε την έξοδο της περωτής σε ακτίνα R_2 . Ξεκινήσετε με ένα σκαρίφημα στο μεσημβρινό επίπεδο και σχεδιάστε τα τρίγωνα ταχυτήτων στο 1H και 1S.

(B1) Ποια θερμοδυναμικά μεγέθη (στατικά ή ολικά, απόλυτα ή σχετικά) παραμένουν ομοιόμορφα σε όλη τη θέση (1) (έχουν δηλαδή ομοιόμορφη ακτινική κατανομή) και ποιά αλλάζουν; Γράψτε μια φράση (ίσως και μια σχέση) δίπλα σε καθένα ώστε να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.

(B2) Αν m^* είναι η αδιάστατη παροχή μάζας, οριζόμενη ως το πηλίκο της παροχής μάζας (kg/sec) και του γινομένου ($\pi R_2^2 \rho_{t1} c_{1t}$), εκφράστε την συναρτήσει των ποσοτήτων (R_{1S}/R_2), (R_{1H}/R_{1S}), (ρ_1/ρ_{t1}) και (V_{1S}/c_{1t}). Με αφετηρία τη σχέση αυτή, δείξτε ότι

$$M_{R,1S}^2 = M_{1S}^2 + \frac{M_{u2}^2 m^*}{\left[1 - \left(\frac{R_{1H}}{R_{1S}}\right)^2\right]} \frac{1}{M_{1S}} \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_{1S}^2\right]^{\frac{3\gamma - 1}{2(\gamma - 1)}}$$

όπου οι τρεις αριθμοί Mach που εμφανίζονται ορίζονται ως

$$M_{u2} = \frac{U_2}{c_{t1}}, \quad M_{1S} = \frac{V_{1S}}{c_1}, \quad M_{R,1S} = \frac{W_{1S}}{c_1}.$$

(B3) Είναι λογικό, συχνά, ο κατασκευαστής να επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει την ποσότητα $M_{R,1S}$ (ώστε να έχει ελάχιστες απώλειες στο σημείο σχεδιασμού της μηχανής και μεγάλο εύρος λειτουργίας για σταθερές στροφές). Θεωρήστε ότι η ποσότητα

$$A = \frac{M_{u2}^2 m^*}{\left[1 - \left(\frac{R_{1H}}{R_{1S}}\right)^2\right]}$$

δεν μεταβάλλεται (και παίρνει τιμές στο [0.1, 0.3]) και υπολογίστε την κατάλληλη τιμή του M_{1S}

σύμφωνα με τους στόχους του κατασκευαστή. Σχεδιάστε την καμπύλη του βέλτιστου M_{1s} συναρτήσει του Λ , για τα παραπάνω όρια. Σχεδιάστε διάγραμμα των τιμών της σχετικής γωνίας ροής στη θέση 1S ως προς το M_{1s} ; Υπολογίστε λχ 7-8 σημεία σε κάθε καμπύλη και σχολιάστε.

Άσκηση Γ

Ένας αεριοστρόβιλος αποτελείται από τον αγωγό εισόδου (τμήμα 1-2, που έχει απώλειες ολικής πίεσης 1%), τον συμπιεστή (τμήμα 2-3, από τον οποίον η ροή εξέρχεται αξονικά σε διατομή $A_3=0.05 \text{ m}^2$), τον θάλαμο καύσης (τμήμα 3-4, που λειτουργεί με καύσιμο θερμογόνου δύναμης $E=43 \text{ MJ/kg}$, πραγματοποιεί τέλεια καύση για ολόκληρη την ποσότητα του καυσίμου, ενώ έχει 3% απώλειες ολικής πίεσης), τον στρόβιλο ΥΠ (τμήμα 4-5, με αξονική έξοδο της ροής σε διατομή $A_5=0.13 \text{ m}^2$), τον στρόβιλο ΧΠ (τμήμα 5-6, με αξονική έξοδο της ροής σε διατομή $A_6=0.36 \text{ m}^2$) και τον αγωγό εξόδου (τμήμα 6-7, με αξονική έξοδο της ροής σε διατομή $A_7=0.70 \text{ m}^2$, τύπου δέσμης ($p_7=p_{t1}$) και απώλειες ολικής πίεσης ίσες με 4% της ολικής πίεσης εισόδου σε αυτόν).

Ο αεριοστρόβιλος αναρροφά αέρα από το περιβάλλον, στα $T_{t1}=286+[K1] \text{ K}$ και $p_{t1}=1 \text{ bar}$. Η παροχή αέρα είναι $30+[K2]/10 \text{ kg/sec}$ και η παροχή καυσίμου 0.53 kg/sec . Αέρας και καυσάεριο θεωρούνται τέλεια αέρια με κοινό $R_{\text{gas}}=287.03 \text{ J/kgK}$ και $\gamma=1.4$ και 1.33 , αντίστοιχα. Η στατική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή είναι 11 bar ενώ η ίδια ποσότητα στην έξοδο του στροβίλου ΥΠ είναι 2.8 bar . Είναι επίσης γνωστές, από μετρήσεις, οι ολικές θερμοκρασίες πριν τον στρόβιλο ΥΠ ($1170-[K3] \text{ K}$), μετά τον ίδιο στρόβιλο (908 K) αλλά και στην έξοδο του στροβίλου ΧΠ (702 K).

(Γ1) Σχεδιάστε το λειτουργικό διάγραμμα και σκίτσο του αεριοστρόβιλου και ένα (πρόχειρο προς το παρόν) θερμοδυναμικό διάγραμμα.

(Γ2) Υπολογίστε στατικά και ολικά μεγέθη, ταχύτητα και αριθμό Mach στην έξοδο του συμπιεστή (θέση 3) καθώς και τον λόγο πίεσης, τον ισεντροπικό και τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή.

(Γ3) Κάντε το ίδιο στην έξοδο του στροβίλου ΥΠ και το ίδιο τον στρόβιλο ΥΠ.

(Γ4) Κάντε το ίδιο στην έξοδο του στροβίλου ΧΠ και τον ίδιο τον στρόβιλο ΧΠ, αλλά και τα στατικά και ολικά μεγέθη, ταχύτητα και αριθμό Mach στη διατομή 7.

(Γ5) Υπολογίστε την ισχύ εξόδου που αποδίδεται στην ενιαία άτρακτο της μηχανής και το θερμικό βαθμό απόδοσης.

(Γ6) Υπολογίστε τις απώλειες σε κάθε τμήμα του αεριοστρόβιλου σε μορφή αύξησης εντροπίας και σχεδιάστε, με ακρίβεια (σημαίνει: να χρησιμοποιήσετε τις σχέσεις των πολυτροπικών μεταβολών τις οποίες υπολογίσατε), λεπτομερές θερμοδυναμικό διάγραμμα, οριστικοποιώντας ότι σχεδιάσατε στο πρώτο ερώτημα.