



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ "ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ"
ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΕΣ: Κ.Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ, Καθηγητής ΕΜΠ
Δρ. Β.Γ. ΑΣΟΥΤΗ, Εντεταλμένη Διδάσκουσα
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ 2025-2026

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.

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. 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. Αν επιθυμείτε, μπορείτε να φέρετε οι ίδιες/οι τη χειρόγραφη εργασία σας στο γραφείο του διδάσκοντος.

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 των διδασκόντων. Και οι 3 ασκήσεις που ακολουθούν μοιάζουν με παλιά θέματα εξετάσεων, ενδεχομένως εμπλουτισμένα 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 (χωρίς πάχος) μιας επαναληπτικής βαθμίδας αξονικού στροβίλου με σταθερή αξονική ταχύτητα και γραμμική ταχύτητα περιστροφής δια μέσου της. Χρησιμοποιήστε ως δεδομένα ότι:

$$\Psi = 1.80 + 0.20 * ([K1]/10), \quad \Phi = 0.80 + 0.20 * ([K2]/10), \quad r = 0.20 + 0.10 * (([K1] + [K3])/20),$$

Η γωνία κλίσης της σταθερής πτερύγωσης είναι $\alpha_2 - (9 + ([K2]/5))$ μοίρες, ενώ της κινητής είναι $9 + ([K1]/5)$ 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 πτερύγωση 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. Πτερύγια σχεδιασμένα «στο περίπου» με το χέρι δεν γίνονται δεκτά. Φροντίστε τα δύο πτερύγια χωρίς πάχος να είναι στο ίδιο σχήμα, της κινητής πτερύγωσης μετατοπισμένο προς τα δεξιά, σε εύλογη απόσταση από την ακμή εκφυγής της σταθερής πτερύγωσης (όπως, δηλαδή, σχεδιάζεται η βαθμίδα στο μάθημα).

(A2) Σχεδιάστε με ακρίβεια τα δύο τρίγωνα ταχυτήτων μαζί, με ίδια κορυφή και σημειώστε πάνω τους τις ποσότητες Φ , Ψ , r . Συγκρίνετε τα μεγέθη τους με τις τιμές που γνωρίζετε.

Άσκηση Β

Ξεκινήστε κάνοντας το σκίτσο ενός αεριοστροβίλου απλής ατράκτου που αποτελείται από ακτινικό συμπίεστή (θέσεις 1-2: πτερωτή, 2-3: πτερυγιοφόρος διαχύτης), θάλαμο καύσης (ΘΚ: 3-4) και ακτινικό στρόβιλο (4-5: ακροφύσια & 5-6: πτερωτή). Συμπίεστής και στρόβιλος ισορροπούν ενεργειακά επί της ατράκτου χωρίς μηχανικές απώλειες και απομαστεύσεις.

Ο συμπίεστής (με λόγο πίεσης 3.1, πτερωτή με 23 πτερύγια οπισθόκλισης $5 + 0.5 * [K3]$ μοιρών, περιστρέφεται με $11000 + [K1] * 15$ RPM) λειτουργεί σε συνθήκες αναφοράς και αναρροφά αέρα απευθείας από το περιβάλλον. Η παροχή αέρα είναι $8.1 + 0.02 * ([K1] + [K2])$ kg/sec. Γνωρίζουμε δύο γεωμετρικά στοιχεία της πτερωτής: $R_2 = 32$ cm και $b_2 = 2.5$ cm. Επίσης, η αύξηση εντροπίας στην κινητή πτερύγωση του συμπίεστή ισούται με αυτήν σε ολόκληρο τον στρόβιλο.

Ο θάλαμος καύσης προκαλεί πτώση πίεσης κατά 0.04 bar, και αύξηση της μάζας του καυσαερίου (τέλειο αέριο, $\gamma = 1.3$, R ίδιο με του αέρα) κατά 2.5%.

Ο στρόβιλος έχει πολυτροπικό βαθμό απόδοσης ίσο με 0.93. Το καυσαέριο εξέρχεται από τον στρόβιλο σε θερμοκρασία $(550 + [K2])$ K. Η σχετική ταχύτητα στη θέση 5 έχει μόνο ακτινική συνιστώσα, ενώ η απόλυτη ταχύτητα στη θέση 6 έχει μόνο αξονική συνιστώσα.

Υπολογίστε κινηματικά (συμπεριλαμβάνονται οι απόλυτοι και σχετικοί αριθμοί Mach της ροής) και θερμοδυναμικά μεγέθη σε όλες τις θέσεις (που τα δεδομένα της άσκησης επιτρέπουν - σχεδιάστε τρίγωνα ταχυτήτων) και το θερμοδυναμικό διάγραμμα όλου του αεριοστροβίλου. Υπολογίστε τις μεταβολές εντροπίας στο συμπίεστή (χωριστά στις δύο πτερυγώσεις του) και στο στρόβιλο.

Άσκηση Γ

Ένας αεριοστρόβιλος αποτελείται από τον αγωγό εισόδου (τμήμα 1-2, που έχει απώλειες ολικής πίεσης 1.5%), τον συμπίεστή (τμήμα 2-3, από τον οποίον η ροή εξέρχεται αξονικά σε διατομή $A_3 = 0.05$ m²), τον θάλαμο καύσης (τμήμα 3-4, που λειτουργεί με καύσιμο θερμογόνου δύναμης $E = 43$ 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 $A_5 = 0.13$ m²), τον στρόβιλο ΧΠ (τμήμα 5-6, με αξονική έξοδο της ροής σε διατομή $A_6 = 0.36$ m²) και τον αγωγό εξόδου (τμήμα 6-7, με αξονική έξοδο της ροής σε διατομή $A_7 = 0.70$ m², τύπου δέσμης

($p_7=p_{t1}$) και απώλειες ολικής πίεσης ίσες με 4% της ολικής πίεσης εισόδου σε αυτόν).

Ο αεριοστροβίλος αναρροφά αέρα από το περιβάλλον, στα $T_{t1}=286+[K1]$ K και $p_{t1}=1$ bar. Η παροχή αέρα είναι $30+[K2]/10$ kg/sec και η παροχή καυσίμου 0.53 kg/sec. Αέρας και καυσαέριο θεωρούνται τέλεια αέρια με κοινό $R_{gas}=287.03$ 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 ($1170-[K3]$ K), μετά τον ίδιο στρόβιλο (908 K) αλλά και στην έξοδο του στροβίλου ΧΠ (702 K).

(Γ1) Σχεδιάστε το λειτουργικό διάγραμμα και σκίτσο του αεριοστροβίλου 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 αεριοστροβίλου 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.