

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 9 ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Ασκήσεις και Εφαρμογές

βασιζόμενες στην ύλη του ομώνυμου Κεφαλαίου 9 του βιβλίου Ρευστοδυναμικές Μηχανές (ΡΔΜ) του συγγραφέα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Η αρίθμηση ασκήσεων, σχέσεων, σχημάτων και πινάκων αντιστοιχεί στην αρίθμηση στο βιβλίο ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.

Εισαγωγικές παρατηρήσεις και παραδοχές

9.1.6A	Επιλογή βιομηχανικού ατμοστροβίλου	9.9
9.2.6A	Υπολογιστική πρόλεξη της ατμοποίησης	9.24
9.2.6B	Εύρεση ρευστοθερμικών μεγεθών ατμού υπό δεδομένες συνθήκες.....	9.24
9.2.6Γ	Εύρεση ρευστοθερμικών μεγεθών σε διεργασία εκτόνωσης στον ένυδρο (υγρό) ατμό ..	9.24
9.2.6Δ	Ταχύτητα ατμού και λοιπά ρευστοθερμικά μεγέθη σε ακροφύσιο Laval βαθμίδας ατμοστροβίλου τύπου Curtis (ισόθλιπτος)	9.24
9.4.2A	Αναγκαιότητα πολυβαθμίδωσης των θερμικών στροβιλομηχανών και ιδιαιτέρως των ατμοστροβίλων	9.50
9.4.6A	Σχεδιασμός βαθμίδας ισόθλιπτου μικροατμοστροβίλου (στροφέιο Curtis).....	9.55
9.5.1A	Ισοζύγιο ενέργειας σε Θερμοηλεκτρικό Σταθμό ατμοστροβίλων	9.57
9.5.4A	Βαθμός απόδοσης ατμοστροβίλου	9.62
9.5.5A	Απόδοση ατμοστροβίλου με αναθέρμανση	9.62
9.5.6A	Αύξηση απόδοσης ατμοστροβίλου με προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας	9.63
9.5.7A	Βαθμός απόδοσης Rankine σε ατμοστροβίλους	9.64
9.5.8A	Ειδικό έργο ισεντροπικής διεργασίας	9.67
9.5.8B	Συνθήκες ροής σε ακροφύσια υδρατμού	9.68
9.6.8A	Αύξηση βαθμού απόδοσης σε ατμοστροβίλους υπερυψηλής πίεσης και θερμοκρασίας	9.87
9.7.4A	Υπολογισμός της διατομής σε ρυθμιστική βαλβίδα πίεσης και της παροχής ατμού σε Ατμοστρόβιλο	9.95
9.8.1	Επιλογή τύπου και προϋπολογισμός λειτουργικών μεγεθών ατμοστροβίλου	9.100
9.8.2	Ο ατμοστρόβιλος ΑΝΑΠΟΔΑ (στροβιλική βαθμίδα αντίθετης περιστροφής από τον λοιπό ατμοστρόβιλο).....	9.100
9.8.3	Χαρακτηριστικά μεγέθη ατμοστροβίλου υπολογιζόμενα από λειτουργικά στοιχεία	9.100
9.8.4	Ισχύς βαθμιδομάδας υψηλής πίεσης: Υπολογισμός μέσω μετρήσεων	9.100
9.8.5	Ανάλυση της ρευστοθερμικής κατάστασης του ισόθλιπτου ατμοστροβίλου Laval	9.101
9.8.6	Εκροή αέρα και υδρατμού από στόμιο σε αεριο- και ατμοφυλάκιο.....	9.101
9.8.7	Εκροή αέρα και υδρατμού με ακροφύσιο Laval από δοχείο πίεσης	9.101
9.8.8	Ακροφύσιο Laval μικρού στροβίλου.....	9.101
9.8.9	9.8.1A.MS1 Σχεδιασμός δίδυμου τροχού ατμοστροβίλου τύπου Curtis	
9.8.10	9.8.1B.MS2. Υπολογισμός ισόθλιπτου ατμοστροβίλου	
9.8.11	9.8.1Γ.MS3. Ρευστοθερμικά μεγέθη ατμού από καταστατικούς τύπους σε συνδυασμό με τους Πίνακες Ατμού	
9.8.12	9.8.1IE. ΑΚΑΤΜ: Εκροή υδρατμού από συγκλίνον στόμιο	

- 9.8.13 9.8.1ΙΣΤ. Ειδικό έργο, ισχύς και ροπή μικρού ατμοστροβίλου
- 9.8.14 9.8.ΙΔ. ΑΤΜ1: Συμπύεση και εν συνεχεία εκτόνωση υδρατμού
- 9.8.15 Μηχανήματα του ρευστοθερμικού κυκλώματος των ατμοστροβιλικών εργοστασίων (9.7.8)
- 9.8.16 9.8.8Β Απώλεια ενθαλπικής πτώσης στο ακροφύσιο Laval
- 9.8.17 9.8.8Γ 9.8.1Ι Πραγματική ροή με συμπύκνωση ατμού σε ακροφύσιο Laval μικρού ατμοστροβίλου
- 9.8.18 9.4.4Α Απώλειες ανεμισμού και τριβής στο στροφέιου στον χώρο περιστροφής του
- 9.8.19 9.6.3Α Χαρακτηριστικοί αριθμοί για ατμοστροβίλους. Ταξινόμηση κατά Cordier 9.6.2 Α
- 9.8.20 9.6.4Α Χαρακτηριστικοί αριθμοί για ατμοστροβίλους – Ταξινόμηση κατά Traupel 9.6.2Β.
- 9.8.21 9.2.2Α Ρευστοθερμικές μεταβολές καταστάσεων ατμού σε ατμοστροβίλους – Χρήση των Πινάκων Ατμού και του διαγράμματος Ενθαλπίας - Εντροπίας (Mollier)

9.1.6Α Επιλογή βιομηχανικού ατμοστροβίλου

Σε υπό σχεδιασμό βιομηχανική μονάδα προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί ατμοστροβίλος ισχύος 14 MW με δεδομένο, ότι διατίθεται υπέρθερμος ατμός σε κατάσταση πίεσης 105 bar και θερμοκρασίας 530 °C αλλά σε ωριαία παροχή απόληψης, η οποία πρέπει να περιορισθεί στην ελάχιστη δυνατή ποσότητα. Να γίνει προκαταρκτική υπολογιστική εκτίμηση για την επιλογή,

(α) του τύπου της μηχανής (ατμοστροβίλος υπερπίεσης ή συμπύκνωσης) και

(β) για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του ατμοστροβίλου με βάση τους Πίνακες Ατμού (ενδεικτικά: παροχή ατμού, ειδικό έργο, ενθαλπική πτώση, ισχύς, καταστατικά μεγέθη εισόδου και εξόδου) και τα διαθέσιμα στοιχεία λειτουργίας στα δεδομένα από τον κατασκευαστή διαγράμματα στο **ΣΧΗΜΑ 9.1/8 ΡΔΜ**:

(γ) Είναι ο ατμοστροβίλος αξονικός ή ακτινικός; Γνωρίζοντας ότι το ειδικό έργο ανά βαθμίδα σε αξονικούς στροβίλους είναι $\Delta h_{\text{βαθμίδα}} = Y = 100 - 200 \text{ kJ/kg}$, βλ. σχ.(9.2.22) ΡΔΜ, καθορίστε τον αριθμό βαθμίδων και τον τύπο αυτών.

(δ) Να προϋπολογισθούν οι κύριες διαστάσεις, ο χώρος εγκατάστασης και το βάρος του στροβίλου με την βοήθεια των κατασκευαστικών στοιχείων στο **ΣΧΗΜΑ 9.1/9 ΡΔΜ**.

ΛΥΣΗ: (α) Για να ελαχιστοποιηθεί η παροχή απόληψης $\dot{m}$ από την διαθέσιμη στη βιομηχανική μονάδα ποσότητα ατμού πρέπει να μεγιστοποιηθεί η ενθαλπική πτώση Δh στον ατμοστροβίλο, δηλ. η ισχύς αυτού P σύμφωνα με τον δεδομένο τύπο ισχύος, σχ.(1.1.45 ή 3.4.13)

$$P = \dot{m} \times Y = \dot{m} \times \Delta h \text{ σε } kW \text{ με } \dot{m} \text{ σε } kg/s \text{ και } \Delta h \text{ και } Y \text{ σε } kJ/kg$$

9.2.6Α Υπολογιστική πρόλεξη της ατμοποίησης σε ατμοπαραγωγό

Σε λέβητα ατμοπαραγωγού ωφέλιμου όγκου 10 m^3 νερό θερμοκρασίας 20 °C υπό απόλυτη πίεση 6 bar με τη λειτουργία εστίας Φυσικού Αερίου μεταβαίνει σε κατάσταση θερμοκρασίας 200 °C υπό την ίδια πίεση των 6 bar καθώς τροφοδοτεί συνεχώς με ατμό μονάδα ατμοστροβίλου. Ζητούνται:

(α) Η μεταβολή της ενθαλπίας και εντροπίας και η συνολικά απαιτούμενη θερμότητα μέχρι τους 200 °C με την βοήθεια των Πινάκων Ατμού. Ειδικότερα να ευρεθούν: (α1) Ειδικός όγκος v , ενθαλπία h , εντροπία s και η μάζα του νερού υπό 6 bar/20°C και του ατμού υπό 6 bar/200°C. (α2) Τα μεγέθη όπως στο (α1) αλλά για την κατάσταση κόρου (κορεσμού), δηλ. για κεκορεσμένο ατμό υπό 6 bar και για τις δύο φάσεις του μείγματος νερού-ατμού. (α3) Οι μεταβολές της ενθαλπίας και εντροπίας μεταξύ των καταστάσεων 6 bar/20 °C και 6 bar/200 °C καθώς και η απαιτούμενη συνολική θερμότητα και αύξηση εντροπίας.

(β) Η μεταβολή των καταστατικών και θερμικών μεγεθών σε χαρακτηριστικούς σταθμούς με συνδυασμένη χρήση προηγούμενων σχέσεων, Πινάκων Ατμού και του διαγράμματος Mollier. Ειδικότερα να ευρεθούν: (β1) Η θερμότητα ατμοποίησης και αύξηση της εντροπίας από 20 °C μέχρι κατάσταση κόρου. (β2) Η θερμότητα για την παραγωγή του υπέρθερμου ατμού από την κατάσταση κόρου μέχρι 6 bar/200 °C και η

αντίστοιχη αύξηση εντροπίας. (β3) Η συνολική θερμότητα για τις τρεις φάσεις της διεργασίας, δηλ. θέρμανση νερού, ατμοποίηση, υπερθέρμανση ατμού.

(γ) Ποια ποσότητα καυσίμου απαιτείται ετησίως, όταν ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης είναι $\eta = 72\%$, η θερμογόνος ικανότητα ελληνικού Φ.Α. $H_o = 39 \text{ MJ/m}^3$ και η εγκατάσταση λειτουργεί με συνεχή τροφοδότηση νερού με παροχή $Q_N = 10 \text{ m}^3/\text{h}$.

(δ) Να διερευνηθεί κατά πόσον είναι δυνατή η απάντηση στα υποερωτήματα (α και β) χρησιμοποιώντας κατάλληλους τύπους και τους **ΠΙΝΑΚΕΣ ατμού 9.2-1 έως -4** του βιβλίου **PΔM**.

ΛΥΣΗ: (α) Οι ποσότητες θερμότητας πρέπει να αναφέρονται στη μάζα του νερού (ή του ατμού), αφού ο όγκος τους μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Στους Πίνακες Ατμού (Schmidt-Grigull ή κώδικας PROST βλ. ΤΕΧΝΟΛ. ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ) στα δύο ζεύγη τιμών πίεσης-θερμοκρασίας ευρίσκουμε τον ειδικό όγκο

9.2.6B Εύρεση ρευστοθερμικών μεγεθών ατμού υπό δεδομένες συνθήκες εκτόνωσης σε ατμοστρόβιλο

Υδρατμός σε ατμοστρόβιλο χαμηλής πίεσης υπό 10 bar και 300°C (κατάσταση Α) εκτονώνεται ισεντροπικά σε πίεση $0,2 \text{ bar}$ (κατάσταση Β). Να ευρεθούν όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη στις δύο καταστάσεις και, όπου είναι δυνατόν, να διασταυρωθούν ή επαληθευθούν χρησιμοποιώντας σχέσεις από τις προηγούμενες ασκήσεις, τους Πίνακες Ατμού και το διάγραμμα $h-s$.

Ενδεικτικά αλλά όχι περιοριστικά να ευρεθούν: ειδική ενθαλπία, ειδική εντροπία, ειδικός όγκος, πυκνότητα, συντελεστής πραγματικού αερίου (συμπιεστότητας), ειδική θερμοχωρητικότητα, ισεντροπικός εκθέτης, δυναμικό ιξώδες, αριθμός Prandtl, θερμική αγωγιμότητα.

Ειδικώς η κατάσταση στο σημείο ισεντροπικής εκτόνωσης $2s$ να ευρεθεί από το διάγραμμα $h-s$ αλλά και από τον **ΠΙΝΑΚΑ ατμού 9.2-3 PΔM**. Ειδική σταθερά ατμού, σχ.(9.2.2) PΔM, $R = 461,527 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

ΛΥΣΗ: Α. Συνθήκες στο σημείο εκκίνησης 1: με ζεύγος (p_1, t_1) γνωστό,

αφού $p_1 = 10 \text{ bar}$, $t_1 = 300^\circ\text{C}$ δεδομένα, προκύπτουν από **ΠΙΝΑΚΑ Ατμού 9.2-4**:

- Ενθαλπία $h_1 = 3.051,7 \text{ kJ/kg}$, εντροπία $s_1 = 7,1247 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

9.2.6Γ Εύρεση ρευστοθερμικών μεγεθών σε ατμοστρόβιλο κατά την εκτόνωση ένυδρου (υγρού) ατμού

Κεκορεσμένος ατμός υπό πίεση 7 bar εκτονώνεται σε (ιδανικό) ατμοστρόβιλο ισεντροπικά σε πίεση 2 bar . Να ευρεθούν τα ρευστοθερμικά μεγέθη στο σημείο $p_{2s} = 2 \text{ bar}$ (το οποίο θα μπορούσε λ.χ. να είναι η διατομή εκροής 2 ενός **ακροφυσίου Laval** ή μιας βαθμιδομάδας, ενώ στη διατομή εισόδου 1 επικρατεί η κατάσταση στασιμότητας υπό σχεδόν μηδενική ταχύτητα $c_i \approx 0$ και πίεση $p_i = p_1 = 7 \text{ bar}$).

Να ευρεθούν τα ρευστοθερμικά μεγέθη στο σημείο 2

(α) από τους λεπτομερείς Πίνακες Ατμού,

(β) από τους Πίνακες Ατμού του βιβλίου PΔM και

(γ) από το διάγραμμα Μολλιέ (Mollier)

(Ενδεικτικά: ενθαλπία, εντροπία, ειδικός όγκος, πυκνότητα, θερμοκρασία).

ΛΥΣΗ: (α) Με χρήση των λεπτομερών Πινάκων Ατμού (βλ. βιβλίο Schmidt-Grigull ή κώδικα PROST στο βιβλίο του συγγραφέα ΤΕΧΝΟΛ. ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ): “Κεκορεσμένος” ατμός σημαίνει, ότι το σημείο 1 ευρίσκεται στο σημείο τομής της ισοβαρούς των 7 bar με την καμπύλη κορεσμού, όπου η ξηρότητα (ποιότητα) του ατμού είναι $x = 1$. Οπότε οι Πίνακες Ατμού δίνουν για το σημείο 1 με τη δεδομένη πίεση:

9.2.6Δ Ταχύτητα ατμού και λοιπά ρευστοθερμικά μεγέθη σε ακροφύσιο Laval βαθμίδας ατμοστροβίλου τύπου Curtis ή Laval (ισόθλιπτοι, βλ. υποκεφάλαια 9.3 και 9.4 PΔM).

Το ακροφύσιο Laval είναι η τυπική συσκευή παραγωγής ροής ατμού υψηλών ταχυτήτων αποτελούμενη από ένα τμήμα συγκλίνον μέχρι τον “λαιμό” του ακροφυσίου και από ένα αποκλίνον από τον λαιμό μέχρι την έξοδο του. Ο ατμός από τον ατμοπαραγωγό ευρίσκεται πρακτικά σε κατάσταση στασιμότητας, δηλ. σε ταχύτητα μικρή ώστε να θεωρείται αμελητέα ($c_i \approx 0$), επιταχύνεται στο αρχικό συγκλίνον μέρος, γίνεται ηχητική στον λαιμό $c = a^*$ (κρίσιμη ταχύτητα) λαμβάνοντας την τοπική ταχύτητα του ήχου a^* , και κατόπιν αυξάνει στο αποκλίνον για να γίνει στο επίπεδο εξόδου υπερηχητική $c_1 > a_1$

(αριθμός Mach $c_1 / a_1 = M_1 > 1$). Ακροφύσια Laval χρησιμοποιούνται περιφερειακά τοποθετημένα ως είδος ακίνητης πτερύγωσης για να παράγουν και να καθοδηγούν την ροή υψηλής ταχύτητας ατμού στη πτερύγωση του στροφέιου τύπου Curtis ή Laval. Προς **απλούστευση** της εφαρμογής η ροή θεωρείται χωρίς οποιεσδήποτε απώλειες, δηλ. η διεργασία είναι ισεντροπική και η παραγωγή ισχύος δεν περιλαμβάνει απώλειες. Να ευρεθούν:

(α) Η ταχύτητα εκροής ατμού και ο αριθμός Mach στο ακροφύσιο Laval κατά την εκτόνωσή του από κατάσταση στασιμότητας 10 bar και 300 °C στη πίεση 3,2 bar στην έξοδο του ακροφυσίου,

(β) Ο ‘ρυθμός της παροχής μάζας’ στην έξοδο του ακροφυσίου, δηλ. η μάζα ατμού ανά μονάδα επιφανείας ($\rho \cdot c$) σε (kg/s)/m².

(γ) Η παροχή μάζας του ατμού για να παράγει ο ατμοστροβίλος ισχύ $P = 1.000 \text{ kW}$ (= 1 MW) θεωρώντας, ότι όλη η διαθέσιμη ενθαλπική πτώση μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο,

(δ) Για την ισορροπημένη προσβολή της πτερωτής του στροφέιου του ατμοστροβίλου χρησιμοποιούνται τέσσερα ακροφύσια Laval κυκλικής διατομής. Να υπολογισθεί η διατομή εκροής και η διάμετρος του καθενός ακροφυσίου υπό τις ίδιες συνθήκες μηδενικών απωλειών.

ΛΥΣΗ: (α) Στη κατάσταση στασιμότητας (δείκτης t) στο ζεύγος τιμών 10 bar/300 °C, σύμφωνα με τους λεπτομερείς Πίνακες Ατμού, ο ατμός παρουσιάζει τις εξής ιδιότητες: Ειδικός όγκος $v_t = 0,2580 \text{ m}^3 / \text{kg}$,

9.4.2Α Αναγκαιότητα πολυβαθμίδωσης των ατμοστροβίλων

Ένας αξονικός ατμοστροβίλος συμπίκνωσης συνήθων επιδόσεων χρησιμοποιεί φρέσκον υδρατμό υψηλής πίεσης 100 bar και θερμοκρασίας 550 °C και λειτουργεί με πίεση εξόδου στον συμπυκνωτή 0,05 bar παράγοντας ισχύ 15 MW.

(α) Να αιτιολογηθεί η αναγκαιότητα κατασκευής του ατμοστροβίλου με περισσότερες βαθμίδες (πολυβαθμίδωση) και να γίνει αδρή εκτίμηση του αριθμού αυτών με τη βοήθεια του αριθμού πίεσης $\psi = \Delta h_{\text{βαθμ}} / (u^2/2)$ λαμβάνοντας τη τυπική τιμή βαθμίδας $\psi \approx 2,0$ και ως ανώτατο όριο τη περιφερειακή ταχύτητα $u_{\text{max}} = 300 \text{ m/s}$.

(β) Να επαληθευθεί το αποτέλεσμα για την ισχύ των 15 MW με βάση τον ειδικό αριθμό στροφών n_q (ή και τον αριθμό ταχυστροφίας σ) ή άλλους χαρακτηριστικούς αριθμούς.

(γ) Προς αισθητοποίηση των διαφορών μεταξύ μηχανών να συγκριθεί η περίπτωση του ατμοστροβίλου ως προς το ύψος του μετατρεπόμενου ειδικού έργου, με υδροστροβίλους, όπως π.χ. με υδροστροβίλο τύπου Kaplan με ύψος υδατόπτωσης 5,5 m και με υδροστροβίλο Pelton για ύψος υδατόπτωσης 1.000 m.

ΛΥΣΗ: (α) Πρέπει να ευρεθεί η ενθαλπική πτώση, την οποία διεργάζονται οι βαθμίδες του στροβίλου: Από το διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας h-s ή/και από τους Πίνακες Ατμού οι καταστάσεις εισόδου 1 και εξόδου 2 του ατμοστροβίλου είναι (ορισμένα μεγέθη στρογγυλοποιημένα επειδή πρόκειται για αρχική ‘εκτίμηση’ αριθμού βαθμίδων):

- $p_1/t_1 : 100 \text{ bar} / 550^\circ \text{C} : s_1 = 6,76 \text{ kJ} / \text{kg K} , \quad h_1 = 3.500 \text{ kJ} , \quad v_1 = 0,0356 \text{ m}^3 / \text{kg}$
 $p_2 / t_2 : 0,05 \text{ bar} / 32,9^\circ \text{C} : s_2 = s_1 = 6,76 \text{ kJ} / \text{kg K} , \quad s_2'' = 8,396 \text{ kJ} / \text{kg K} ,$
- $s_2' = 0,4763 , \quad h_2'' = 2.562 \text{ kJ} / \text{kg} , \quad h_2' = 137,8 \text{ kJ} / \text{kg} , \quad v_2 = 28,19 \text{ m}^3 / \text{kg}$

9.4.6A Σχεδιασμός ισόθλιπτου μικροατμοστροβίλου με στροφέιο Laval (όχι Curtis)*

Γίνεται διαστασιολόγηση μικρού μονοβάθμιδου ατμοστροβίλου ως κινητήριας μηχανής ενός βιομηχανικού φυσητήρα. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ατμοστροβίλου είναι: Ισχύς $P = 100 \text{ kW}$, Αριθμός στροφών $n = 9.000 \text{ min}^{-1}$. Διαθέσιμος είναι ατμός στον ατμοπαραγωγό μη αποτονωμένος, δηλ. πρωτογενής ατμός σε στασιμότητα υπό πίεση στασιμότητας $p_i = 9 \text{ bar}$ και θερμοκρασία στασιμότητας $t_i = 280 \text{ }^\circ\text{C}$. Πίεση αποτονωμένου ατμού, δηλ. στην έξοδο της βαθμίδας του στροβίλου μετά την πλήρη εκτόνωσή του στις πτερυγώσεις, $p_{ex} = 1,9 \text{ bar}$. Ο στρόβιλος έχει μία βαθμίδα και λόγω μικρής ισχύος έχει σχετικά χαμηλή απόδοση. Ειδικότερα ο **εσωτερικός βαθμός απόδοσης** λαμβάνεται $\eta_i \approx 0,58 \text{ (58\%)}$ και ο μηχανικός $\eta_m = 0,95 \text{ (95\%)}$.

(α) Να υπολογισθεί η αναγκαία ισχύς του υδρατμού και η παροχή μάζας.

(β) Να επιλεγεί ο τύπος του στροφέιου και

(γ) ο τρόπος προσβολής της κινητής πτερύγωσης.

(δ) Να γίνει προκαταρκτική σχεδιαστική διαστασιολόγηση,

(ε) Να επαληθευθεί το τελικό ειδικό έργο με την εξίσωση στροβιλομηχανών του Euler και

(ζ) στις απώλειες να συνυπολογισθούν οι απώλειες τριβής του δίσκου του στροφέιου στο περιβάλλον του ατμού εξόδου (απώλειες ανεμισμού) και να επανεξετασθεί ο ανωτέρω εσωτ. βαθμός απόδοσης η_i .

* Η παρούσα ανάλυση αφορά σε στροφέιο Λαβάλ, βλ. σκαρίφημα, το οποίο εξ ορισμού φέρει μια στεφάνη πτερυγίων σε αντίθεση με τον κατασκευαστικά παρεμφερή Κέρτις που φέρει δύο ή και περισσότερες στεφάνες. Δεξιά, **τροχός Curtis με διπλή σειρά πτερυγίων**. Η πρώτη εκτόνωση του ατμού γίνεται στα ακροφύσια Laval L. Επειδή οι στατικές πιέσεις είναι $p_1 = p_2 = p_3 = p_4$ (ισόθλιπτος ατμοστρόβιλος ή ατμοστρόβιλος δράσης) είναι δυνατή η μερική προσβολή της πτερωτής, δηλ. χρησιμοποίηση περιορισμένου αριθμού ακροφυσίων κατά περίπτωση με δυνατότητα ρύθμισης κατ'αυτόν τον τρόπο της ισχύος. Τα ακροφύσια Laval κατευθύνουν τον ατμό υπό κλίση $\alpha = 14^\circ$ έως 17° σε σχέση με το επίπεδο περιστροφής της πτερύγωσης και με μεγάλη ταχύτητα c_1 πολλές φορές υπερτετραπλάσια της περιφερειακής ταχύτητας u : $c_1/u \approx 4,35$ και ως εκ τούτου υπερηχητική, (από **ΣΧΗΜΑ 9.4/1 ΡΔΜ**).

ΛΥΣΗ: (α) Με τα δεδομένα η διαθέσιμη ισχύς του ατμού πρέπει να είναι, βλ. π.χ. σχ.(9.7.1):

$$P_{ATM} = \frac{P}{\eta_i \cdot \eta_m} = \frac{100000}{0,58 \cdot 0,95} \text{ ® } P_{ATM} = 181.488,2 \text{ W}$$

με ολικό $\eta = 0,58 \cdot 0,95 = 0,551 = 55,1\%$.

9.5.1A Ισοζύγιο ενέργειας σε Θερμοηλεκτρικό Σταθμό φυσικού αερίου με ατμοστρόβιλο

Η εγκατάσταση ατμοστροβίλου στο σκαρίφημα (από το **ΣΧΗΜΑ 9.5/1 ΡΔΜ**) αντιστοιχεί πρακτικά σε έναν Θερμοηλεκτρικό Σταθμό (ΘΗΣ), στον οποίο το εξερχόμενο μηχανικό έργο μετατρέπεται σε ηλεκτρόρρευμα με την βοήθεια κατάλληλης ηλεκτρογεννήτριας. Για την εφαρμογή μας η ισχύς της είναι 500 MW και παράγεται συνεχώς, αφού ο ΘΗΣ θεωρείται ως **μονάδα βάσεως** και λειτουργεί ανελλιπώς με περίπου τρεις εβδομάδες (~ 21 ημέρες) διακοπή για συντήρηση και συναφείς εργασίες μέσα στο έτος. Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι Φυσικό Αέριο με θερμογόνο δύναμη 39.000 kJ/m^3 , ενώ ο συνολικός βαθμός απόδοσης του εργοστασίου είναι $\eta = 36\%$ και οι απώλειες μεταξύ ατμοστροβίλου και ηλεκτρογεννήτριας ~ 1,5%. Ο ατμός κατά την είσοδό του στον ατμοστρόβιλο υπό πίεση 220 bar έχει ειδική ενθαλπία 3.400 kJ/kg , η οποία μετά την εκτόνωση κατέρχεται στα 2.050 kJ/kg στην έξοδο με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης να είναι 91% και πίεση $0,05 \text{ bar}$ (ατμοστρόβιλος με συμπυκνωτή). Να ευρεθούν:

(α) Η συνολική παραγόμενη ηλεκτρενέργεια ετησίως και η αναγκαία ποσότητα καυσίμου.

(β) Η ισχύς του ατμοστρόβιλου, το αναγκαίο διαθέσιμο ισεντροπικό έργο και η αντίστοιχη ποσότητα ατμού σε παροχή μάζας.

(γ) Η ισχύς της αντλίας τροφοδότησης του ατμοπαραγωγού αγνοώντας τις οποιεσδήποτε απώλειες πίεσης στο σύστημα παροχέτευσης.

ΛΥΣΗ : (α) Η διάρκεια λειτουργίας είναι $t_{XP} = 365 - 21 = 344$ ημέρες (d) ανά έτος (a) στη βάση των 24 ωρών (h), δηλ. $t_h = 344 d / a \times 24 h / d = 8.256 h / a$, και το καθαρό παραγόμενο έργο για την ισχύ

9.5.4A Βαθμός απόδοσης και παροχή ατμού ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης ισχύος 100 MW

Ατμοστρόβιλος συμπύκνωσης με πίεση στον συμπυκνωτή 0,065 bar λειτουργεί με την εισροή ατμού πίεσης 50 bar και θερμοκρασίας 470 °C, βλ. σκαρίφημα (από **ΣΧΗΜΑΤΑ 9.5/3 και /4 PΔM**)

(α) Να περιγραφεί η αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης (κύκλος Rankine).

(β) Να παρασταθεί στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας T-s η διεργασία ιδανικής εγκατάστασης ατμοστρόβιλου (κύκλος Rankine)

(γ) Να υπολογισθεί ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης και η ειδική κατανάλωση θερμότητας ατμοστρόβιλου.

(δ) Με ποιον τρόπο μπορεί να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης;

(ε) Για να παράγει ο ατμοστρόβιλος 100 MW ηλεκτρική ισχύ, ποια πρέπει να είναι η παροχή ατμού, όταν ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι 30 %;

ΛΥΣΗ: (α) Αύξηση ενθαλπίας $h_1 - h_N$ στον ατμοπαραγωγό με προσαγωγή και καύση μείγματος καυσίμου-αέρα, εκτόνωση από h_1 σε h_2 στον ατμοστρόβιλο με παραγωγή έργου, συμπύκνωση (υγροποίηση) με ψύχρανση από h_2 σε h_N του νερού στον συμπυκνωτή ('ψυγείο'), παροχέτευση του συμπυκνώματος, δηλ. νερού, με τροφοδοτικές αντλίες στον ατμοπαραγωγό.

(β) Βλ. Διάγραμμα T(s) στο σκαρίφημα.

9.5.5A Απόδοση ατμοστρόβιλου με αναθέρμανση

Εγκατάσταση ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης περιλαμβάνει ατμοπαραγωγό, στρόβιλο με βαθμιδομάδες Υψηλής Πίεσης και Χαμηλής Πίεσης, Συμπυκνωτή και Ηλεκτρογεννήτρια, βλ. σκαρίφημα (από **ΣΧΗΜΑΤΑ 9.5/9 και /10 PΔM**). Οι συνθήκες του εισερχομένου ατμού είναι 98 bar και 460 °C, ενώ μετά από εκτόνωση στα 15 bar παρεμβάλλεται εκτροπή του ατμού προς αναθέρμανση και επαναφορά του με την ίδια πίεση των 15 bar στη θερμοκρασία των 460 °C στο ίδιο σημείο. Η πίεση τελικής εκτόνωσης στον συμπυκνωτή είναι 0,07 bar.

(α) Να δοθεί σε σκαρίφημα η συνδεσμολογία της εγκατάστασης.

(β) Να παρασταθεί η διεργασία θερμοηλεκτροπαραγωγής στο διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας T – s.

(γ) Να ευρεθεί ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης του ατμοστρόβιλου και το ποσοστό βελτίωσής του σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης χωρίς αναθέρμανση.

ΛΥΣΗ: (α) Το ρευστοθερμικό κύκλωμα εγκατάστασης ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης με αναθέρμανση μεταξύ των βαθμιδομάδων Υψηλής (ΥΠ) και Χαμηλής Πίεσης (ΧΠ) φαίνεται στο σχήμα αριστερά.

(β) Η διεργασία της θερμοηλεκτροπαραγωγής με αναθέρμανση μεταξύ των βαθμιδομάδων ΥΠ και ΧΠ

9.5.6A Αύξηση απόδοσης ατμοστρόβιλου με προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας

Στην εγκατάσταση ατμοστρόβιλου στο σκαρίφημα (από **ΣΧΗΜΑ 9.5/15 PΔM**) παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ισχύος 20 MW γίνεται προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας στον προθερμαντήρα (4), ο οποίος είναι διαμορφωμένος ταυτόχρονα ως απαιριωτής και εναλλάκτης θερμότητας επαφής, όπου το

καταιονιζόμενο νερό θερμαίνεται σε άμεση επαφή με τον απομαστευόμενο ατμό από τον στρόβιλο (2). Το θερμότερο πλέον νερό παροχετεύεται μέσω της αντλίας (6) στον ατμοπαραγωγό (1). Οι λειτουργικές συνθήκες της εγκατάστασης είναι: Ισχύς στην ηλεκτρογεννήτρια $P_{el} = 20 \text{ MW}$, Πίεση και θερμοκρασία του φρέσκου ατμού κατά την εισροή στον ατμοστρόβιλο: $p_1 = 61 \text{ bar}$, $t_1 = 470^\circ \text{C}$, Πίεση στον συμπυκνωτή (3) $p_3 = 0,07 \text{ bar}$, Εσωτερικός βαθμός θερμικής απόδοσης στροβίλου $\eta_i = 80\%$ (θερμοδυναμικός, ισεντροπικός), Μηχανικός βαθμός απόδοσης του ατμοστρόβιλου $\eta_{MX} = 99\%$, Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας μετά την προθέρμανση $t_{\pi\theta} = 120^\circ \text{C}$, Απώλεια πίεσης κατά την παροχέτευση του ατμού απομάστευσης μέχρι τον προθερμαντήρα $\Delta p_{v24} = 0,17 \text{ bar}$.

(α) Να γίνει σύντομη περιγραφή του θερμικού κυκλώματος σύμφωνα με το σκαρίφημα και

να υπολογισθεί και να γίνει συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης της εγκατάστασης

(β) χωρίς προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού και

(γ) με προθέρμανση αυτού

συγκρίνοντας ειδικότερα τα εξής μεγέθη μεταξύ της μίας και της άλλης περίπτωσης: παροχή μάζας ατμού $\dot{m}$ στον ατμοστρόβιλο, θερμική ισχύς P_{ATM} , ηλεκτρική ισχύς P_{el} , θεωρητικός θερμικός βαθμός απόδοσης $\eta_{\theta\theta}$, πραγματικός βαθμός απόδοσης η_e και ειδικές καταναλώσεις ατμού.

ΛΥΣΗ: (α) Εγκατάσταση ατμοστρόβιλου (Ατμοηλεκτρικός Σταθμός) με μία προθέρμανση νερού τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού. Τα επιμέρους υποσυστήματα είναι :

1 ατμοπαραγωγός, 2 ατμοστρόβιλος,

9.5.7A Βαθμός απόδοσης Rankine σε ατμοστρόβιλους, επίδραση επιπέδου πίεσης, έλεγχος τύπου μηχανής.

Δύο αξονικοί ατμοστρόβιλοι Α και Β εργάζονται με πίεση p_1 και θερμοκρασία t_1 φρέσκου ατμού και με πίεση p_2 και θερμοκρασία t_2 ατμού συμπύκνωσης με τις εξής τιμές (στρογγυλεμένες σε σύγκριση με τον ΠΙΝΑΚΑ 9.5-2 ΡΔΜ χάριν απλούστευσης του υπολογισμού):

A. Κατηγορίας ισχύος Συνεχούς Λειτουργίας (ΣΛ) 22 MW : $p_1 = 60 \text{ bar}$, $t_1 = 480^\circ \text{C}$, $p_2 = 0,05 \text{ bar}$

B. Κατηγορίας ισχύος ΣΛ 150 MW: $p_1 = 130 \text{ bar}$, $t_1 = 540^\circ \text{C}$, $p_2 = 0,05 \text{ bar}$

και εναλλακτικά $p_2 = 14 \text{ bar}$

(α) Να ευρεθούν, συγκριθούν και σχολιασθούν οι θεωρητικοί βαθμοί απόδοσης Rankine, δηλ. για ισεντροπική εκτόνωση για τους δύο ατμοστρόβιλους, βλ. διεργασία εκτόνωσης στο σκαρίφημα.

Οι ισχείς δίνονται για λόγους κατηγοριοποίησης των μηχανών και δεν απαιτούνται στον υπολογισμό.

(β) Να υπολογισθεί η απαιτούμενη ωριαία ποσότητα ατμού, εάν ο 1^{ος} στρόβιλος παράγει ισχύ 25 MW και ο 2^{ος} 160 MW.

(γ) Και οι δύο ατμοστρόβιλοι είναι δεκαβάθμιδοι με αριθμό στροφών 3.600 min^{-1} ο Α και 2.700 min^{-1} ο Β. Αιτιολογήστε γιατί οι στρόβιλοι είναι αξονικοί.

ΛΥΣΗ : (α) Ο θεωρητικός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ατμοστρόβιλου (διεργασία Rankine) ορίζεται

ως εξής: $\eta_{\theta\theta} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_N}$ με h_1 και h_2 την ειδική ενθαλπία εισόδου και εξόδου στον

9.5.8A Ειδικό έργο ισεντροπικής διεργασίας σε βαθμίδα και σε βαθμιδομάδα ατμοστρόβιλου.

Να υπολογισθεί το στατικό ειδικό έργο ισεντροπικής διεργασίας εκτόνωσης σε βαθμίδα ατμοστρόβιλου, βλ. σκαρίφημα (από ΣΧΗΜΑ 9.5/13 ΡΔΜ), από ζεύγος τιμών πίεσης/θερμοκρασίας στο

επίπεδο 1 εισροής σε αντίστοιχες πιέσεις στο επίπεδο 2 εκροής του ατμού από την βαθμίδα για τις εξής περιπτώσεις:

(α) $p_1 = 100 \text{ bar}$, $t_1 = 550^\circ \text{C}$ σε $p_2 = 80 \text{ bar}$ ($p_2 / p_1 = 0,8$),

(β) $p_1 = 15 \text{ bar}$, $t_1 = 250^\circ \text{C}$ σε $p_2 = 10 \text{ bar}$ ($p_2 / p_1 = 0,667$).

Παρομοίως για ένα τμήμα ατμοστροβίλου με περισσότερες βαθμίδες (δηλ. για μια βαθμιδομάδα) με δεδομένα

(γ) $p_1 = 100 \text{ bar}$, $t_1 = 550^\circ \text{C}$ σε $p_2 = 8 \text{ bar}$ ($p_2 / p_1 = 0,08$).

Ο υπολογισμός να γίνει με την βοήθεια του κατάλληλου τύπου $\Delta h = f(\gamma, T_1, p_2, p_1)$ για την περίπτωση του ιδανικού ατμού $\gamma = 1,333 = \text{στθ}$ και του πραγματικού ατμού με $\gamma = \gamma(p, s)$ από κατάλληλο διάγραμμα. Το αποτέλεσμα να συγκριθεί με τα αντίστοιχα στοιχεία των Πινάκων Ατμού (**ΠΙΝΑΚΕΣ 9.2-1 έως -4 ΡΔΜ**) ή του διαγράμματος Mollier $h-s$ (**ΣΧΗΜΑ 9.2/3**). Η ειδική σταθερά αερίου ατμού είναι $R = 461,527 \text{ kJ/kg K}$. Η διεργασία εκτόνωσης για τον ορισμό του ειδικού (ισεντροπικού) έργου σε θερμική στροβιλομηχανή είναι $Y = h_1 - h_{2s} + (c_1^2 - c_2^2)/2 = Y_{\text{stat}} - Y_{\text{dyn}}$ και το στατικό του μέρος απεικονίζεται στο διάγραμμα: $h_1 - h_{2s}$.

ΛΥΣΗ: (α) Η διεργασία παριστάνεται στο διάγραμμα $h-s$ και ισχύει γενικώς τόσο για μια βαθμίδα όσο και για μια βαθμιδομάδα με αντικατάσταση των αντίστοιχων μεγεθών. Ο κατάλληλος τύπος της ισεντροπικής εκτόνωσης δίνεται στη παράγραφο 3.4.2 αλλά και σύμφωνα με τη θεωρία στη παράγραφο 9.4.8,

9.5.8B Συνθήκες ροής σε ακροφύσια υδρατμού ατμοστροβίλου Laval

Ακροφύσια Laval χρησιμοποιήθηκαν από τον επινοητή τους στους ομώνυμους ατμοστροβίλους Laval, όπως αυτή η απλή μηχανή στη μηκοτομή του σκαριφήματος (από **ΣΧΗΜΑ 9.5/16 ΡΔΜ**): Η αξονική τομή **A** δείχνει την πορεία του ατμού από τον ατμοπαραγωγό, στον δίαυλο παροχέτευσης, κατόπιν στην οδηγό περύγωση και τέλος στην κινητή περύγωση, την οποία ο ατμός προσβάλλει με ταχύτητα c_1 σε έναν κυκλικό τομέα, (βλ. **ΣΧΗΜΑ 9.5/18**). Ο ατμοστρόβιλος **A** είναι ισόθλιπτος, ενός στροφείου με μία στεφάνη περυγίων και οδηγό περύγωση διαμορφωμένη με γεωμετρία ακροφυσίων Laval **B**. Προς μείωση των “απωλειών ανεμισμού” η ελεύθερη στεφάνη περυγίων προφυλάσσεται με προστατευτικό περίβλημα. (Μία περαιτέρω εξέλιξη αυτού του τύπου ατμοστροβίλου είναι ο στρόβιλος Curtis με στροφείο δύο ή τριών στεφανών).

Ο ατμοστρόβιλος χρησιμοποιείται ως κινητήρια μηχανή ενός βιομηχανικού φουσητήρα και έχει ισχύ $P = 100 \text{ kW}$ και αριθμό στροφών $n = 9.000 \text{ min}^{-1}$. Ο φρέσκος ατμός είναι διαθέσιμος υπό πίεση $p_1 = 9 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $t_1 = 280^\circ \text{C}$, ενώ η πίεση στο επίπεδο εκροής πίσω από την κινητή περύγωση είναι $p_2 = 1,8 \text{ bar}$ και επικρατεί σε ολόκληρο τον εσωτερικό χώρο του κελύφους. Το μικρό μέγεθος του ατμοστροβίλου και η **μονοβαθμίδωση** αυτού έχουν ως συνέπεια τον χαμηλό εσωτερικό βαθμό απόδοσης $\eta_i = 0,58$ και μηχανικό βαθμό απόδοσης $\eta_m = 0,95$.

(α) Να υπολογισθεί η ταχύτητα c_1 και ο αριθμός Mach M_1 στην έξοδο των ακροφυσίων της οδηγού περύγωσης χρησιμοποιώντας (α1) τους Πίνακες Ατμού ή το διάγραμμα $h-s$ και (α2) τις ισεντροπικές σχέσεις με ισεντροπικό εκθέτη $\gamma = 1,3$ και ειδική σταθερά αερίου του ατμού $R = 461,527 \text{ kJ/kg K}$ σύμφωνα με την ΕΦΑΡΜΟΓΗ 9.5.8Α και την παράγραφο 9.5.8. Ο συντελεστής ταχύτητας ακροφυσίου Laval να ληφθεί $\phi_L = 0,95$.

(β) Να ευρεθεί η απαιτούμενη παροχή μάζας του ατμού και μέσω αυτής η πλευρά της τετραγωνικής εγκάρσιας επιφάνειας εκροής του ακροφυσίου (β1) με το διάγραμμα $h-s$ και (β2) με τις ισεντροπικές

σχέσεις και ισεντροπικό εκθέτη $\gamma = 1,3$, υποθέτοντας επίσης, ότι ο ατμοστροβίλος έχει μερική προσβολή κινητής πτερύγωσης με **τέσσερα ακροφύσια** στην ακίνητη πτερύγωση.

ΛΥΣΗ: (α) Από το διάγραμμα h - s διαπιστώνουμε, ότι η τελική εκτόνωση γίνεται στη περιοχή του ένυδρου ατμού. Η ανάγνωση του διαγράμματος δίνει ειδική ενθαλπία $h_1 \approx 3.000 \text{ kJ/kg}$ και $h_2 \approx 2.680 \text{ kJ/kg}$ για ισεντροπική-αδιαβατική εκτόνωση. Για περισσότερη βεβαιότητα χρησιμοποιούμε τους λεπτομερείς Πίνακες Ατμού και λαμβάνουμε:

9.6.8A Αύξηση βαθμού απόδοσης σε ατμοστροβίλους υπερυψηλής πίεσης και θερμοκρασίας

Ένας Θερμοηλεκτρικός Σταθμός (ΘΗΣ) λειτουργεί ικανοποιητικά με μονάδα ατμοστροβίλου συμπίκνωσης από το 1990 με φρέσκο ατμό υπό πίεση 220 bar και θερμοκρασία 540 °C και με συμπυκνωτή θερμοκρασίας 38 °C, την οποία χάριν απλούστευσης θεωρούμε να λειτουργεί χωρίς αναθέρμανση ατμού και χωρίς προθέρμανση τροφοδοτικού νερού της ίδιας θερμοκρασίας των 38 °C. Ο φορέας του ΘΗΣ ήδη από τώρα (2016) σχεδιάζει το 2020, δηλ. μετά την συμπλήρωσή του εύλογου χρόνου ζωής του ατμοστροβίλου της τριακονταετίας, να αντικαταστήσει τον ατμοστροβίλο με έναν τεχνολογίας υπερυψηλής ενεργειακής κατάστασης φρέσκου ατμού υπό συνθήκες 350 bar/720 °C σταθμίζοντας το σχετικά υψηλό κόστος επένδυσης με το όφελος από την αύξηση του βαθμού απόδοσης της μονάδας.

Να προϋπολογισθεί σε πρώτη αδρή εκτίμηση η αναμενόμενη βελτίωση της απόδοσης της νέας μονάδας σε σχέση με την υπάρχουσα χρησιμοποιώντας τον θεωρητικό θερμικό βαθμό απόδοσης $\eta_{\Theta B}$, τον οποίο χρησιμοποιήσαμε ήδη σε προηγούμενη εφαρμογή με τον εξής ορισμό (βάσει του κύκλου Rankine):

$$\eta_{\Theta B} = \frac{\text{εξαγγόμενο ειδικό έργο απ' τον ατμοστροβίλο}}{\text{εισαγόμενο ειδικό έργο στον ατμοπαραγωγό}} = \frac{Y_{\text{ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ}}}{Y_{\text{ΑΕΒΗΤΑ}}}$$

Οι συνθήκες εκτόνωσης του ατμού στον συμπυκνωτή παραμένουν οι ίδιες.

ΛΥΣΗ: Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης της θερμοηλεκτρικής μονάδας προϋποθέτει "ιδανικές μηχανές", δηλ. λειτουργία με 100% απόδοση του ατμοπαραγωγού, των αντλιών, του συμπυκνωτή, του ατμοστροβίλου κ.λ.π. Έτσι το ειδικό έργο παραγωγής ατμού στον ατμοπαραγωγό είναι η ειδική ενθαλπία του φρέσκου ατμού μείον η ενθαλπία του εισαγόμενου τροφοδοτικού νερού. Επίσης το έργο το

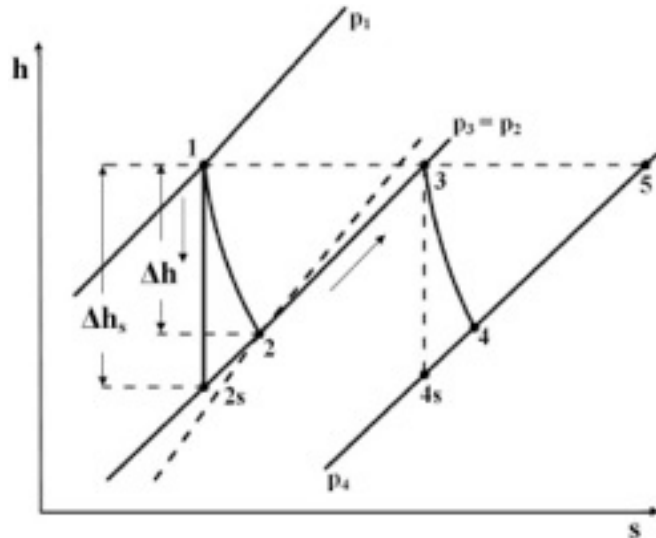
9.7.4A Υπολογισμός διατομής σε βαλβίδα ρύθμισης πίεσης και παροχής σε Ατμοστροβίλο

Από ατμοπαγωγό φρέσκου ατμού πίεσης $p_1 = 100 \text{ bar}$ και θερμοκρασίας 540°C πρόκειται να τροφοδοτηθεί ατμοστρόβιλος με πίεση εισροής 31 bar και ωριαία παροχή 100 τόνων μέσω ρυθμιστικής βαλβίδας πίεσης.

(α) Να παρασταθεί και περιγραφεί η διεργασία της αναγκαίας ρυθμιστικής στραγγαλιστικής εκτόνωσης στο διάγραμμα ενθαλπίας – εντροπίας με δεδομένο, ότι σε άμεση φάση μετά την στένωση στραγγαλισμού η ενθαλπική πτώση είναι το $60 \text{ έως } 70\%$ της ισεντροπικής πτώσης στην πίεση p_2 μετά τον στραγγαλισμό.

(β) Να ευρεθούν όλα τα ρευστοθερμικά μεγέθη με την βοήθεια των Πινάκων Ατμού (ΠΙΝΑΚΕΣ 9.2-1 έως -4 ΡΔΜ ή του διαγράμματος Mollier h - s , π.χ. ΣΧΗΜΑ 9.2/3, ή με τους λεπτομερείς Π.Α., κώδικας PROST TEXN. ΦΥΣ. ΑΕΡΙΟΥ του συγγραφέα) λαμβάνοντας ήδη υπόψη το υποερώτημα (γ) σε πρώτη εκτίμηση.

(γ) Να διερευνηθεί, εάν η ρυθμιστική δικλείδα μόνη αρκεί για την απαιτούμενη πτώση πίεσης και σε αρνητική περίπτωση να χρησιμοποιηθεί και διαστασιολογηθεί μια δεύτερη ρυθμιστική δικλείδα ή -προς απλούστευση- ένα στραγγαλιστικό διάφραγμα, δηλ. ένας φλαντζωτός δίσκος με κυκλικό άνοιγμα στο μέσο. (Να ληφθεί υπόψη, ότι για τον υπέρθερμο ατμό ο ισεντροπικός εκθέτης είναι $\gamma = 1,305$ και για κεκορεσμένο ατμό $\gamma = 1,035 + 0,1 \cdot x$ με x την ποιότητα (ξηρότητα) του ατμού. Στο σκαρίφημα (κατά το ΣΧΗΜΑ 9.7/13 ΡΔΜ) παριστάνεται στο διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας η διεργασία της στραγγαλιστικής εκτόνωσης για δύο αλληλέπληλες ρυθμιστικές παρεμβάσεις. Στη πράξη είναι $\Delta h = (0,6 \text{ έως } 0,7) \cdot \Delta h_s$).



ΛΥΣΗ: (α) Η στένωση στην βαλβίδα και γενικά η στραγγαλιστική ρύθμιση θα πρέπει να δημιουργεί μια ελεγχόμενη πτώση πίεσεως από $p_1 = 100 \text{ bar}$ σε $p_2 = 30 \text{ bar}$, που μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ρέοντος ατμού. Στο διάγραμμα h - s κατά τα γνωστά η θλιπτική πτώση θεωρητικά θα ήταν ισεντροπική κατά την γραμμή $1-2s$. Λόγω των τριβών όμως, που εδώ είναι τάξεως $30\text{-}40\%$ θα ακολουθήσει την καμπύλη $1-2$ και η κατάσταση αμέσως μετά τον ρυθμιστή θα είναι 2 , ανεξάρτητα από το γεγονός, ότι στη συνέχεια λόγω των τριβών η κινητική ενέργεια θα μετατραπεί σε ενθαλπία και στην αμέσως

9.8.1 Επιλογή τύπου και προϋπολογισμός λειτουργικών μεγεθών ατμοστρόβιλου

Ατμοστρόβιλος* μετατρέπει ειδικό έργο $Y = 537,5 \text{ kJ/kg}$ με παροχή μάζας ατμού $\dot{m} = 25,9 \text{ kg/s}$ σε ισχύ $P = 10,204 \text{ MW}$ (πριν την εισαγωγή της στην ηλεκτρογεννήτρια ισχύος 10 MW) καθώς εκτονώνεται από την κατάσταση στασιμότητας εισροής των $40 \text{ bar}/410^\circ\text{C}$ στην κατάσταση εκροής των $4 \text{ bar}/190^\circ\text{C}$, όπου η ποιότητα (ξηρότητα) του ατμού υπολογίσθηκε σε $x_2 = 0,9831$. Ο αριθμός στροφών σχεδιάζεται να προσαρμοσθεί στην οριακή ταχύτητα περιστροφής πτερυγίων $u_{\max} \approx 280 \text{ m/s}$.

(α) Να υπολογισθεί η παροχή όγκου του ατμού στην είσοδο και έξοδο του ατμοστρόβιλου.

(β) Να ευρεθεί εάν ο ατμοστρόβιλος είναι μονοβάθμιδος ή πολυβάθμιδος. Επίσης να ελεγχθεί αν είναι απλής ή πολλαπλής εισροής με χρήση των αδιάστατων χαρακτηριστικών αριθμών και της καμπύλης του Κορντιέ (Cordier), ΣΧΗΜΑ 1.2/2 ΡΔΜ.

(γ) Εφόσον προκύψει η αναγκαιότητα περισσότερων βαθμίδων ή της πολλαπλότητας της εισροής, να ευρεθεί ο αριθμός τους και η κατανομή του ειδικού έργου και παροχής στις βαθμίδες.

(δ) Να ευρεθεί ο αριθμός στροφών του στροβίλου και η διάμετρος στροφείου εισόδου και εξόδου του ατμοστροβίλου.

(ε) Σιωπηρά θεωρήθηκε αξονικός ατμοστροβίλος. Να αιτιολογηθεί γιατί!

----- *(βλ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ 9.8.3)

ΛΥΣΗ: (α) Πολλαπλασιάζοντας την παροχή μάζας $\dot{m}$ επί τον ειδικό όγκο v στην κάθε διατομή προκύπτει η αντίστοιχη παροχή όγκου:

Στο ζεύγος στασιμότητας $10 \text{ bar}/400^\circ\text{C}$ οι Πίνακες Ατμού δίνουν $v_1 = 0,07471 \text{ m}^3/\text{kg}$ και

9.8.2 Χαρακτηριστικοί αριθμοί για ατμοστροβίλους – Ταξινόμηση κατά Traupel (9.6.2B , 9.6.4A)

(α) Πόσο εφαρμόσιμοι είναι οι χαρακτηριστικοί αριθμοί για τους ατμοστροβίλους, όπως εκφράζονται με την καμπύλη του Cordier (Κορντιέ).

(β) Εφαρμόζονται διαφορετικές τιμές χαρακτηριστικών αριθμών στον σχεδιασμό των ατμοστροβίλων;

ΛΥΣΗ: (α) Οι αδιάστατοι χαρακτηριστικοί αριθμοί κατά κανόνα χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό της βαθμίδας του ατμοστροβίλου (ή άλλων στροβιλομηχανών, βλ. σχετικά κεφάλαια στο βιβλίο ΡΔΜ) με βέλτιστη απόδοση, δηλ. αφορούν τα μεγέθη στο Κανονικό Σημείο Λειτουργίας της μεμονωμένης βαθμίδας. Είναι γενικώς εφαρμόσιμοι με τις τιμές του **ΠΙΝΑΚΑ 9.6-1 ΡΔΜ** (ή βλ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ 9.8.19) χωρίς όμως οι τιμές αυτές να είναι οπωσδήποτε δεσμευτικές ή ανελαστικής ισχύος για τον σχεδιασμό.

3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ατμοστροβίλου υπολογιζόμενα από λειτουργικά στοιχεία

Απλές μετρήσεις πιέσεων και θερμοκρασιών πριν και μετά τον ατμοστροβίλο οδηγούν στην υπολογιστική εκτίμηση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών της λειτουργίας του:

Σε έναν μετρίου μεγέθους ατμοστροβίλο μέσων πιέσεων μετρούνται 40 bar στη διατομή εισόδου της πρώτης βαθμίδας και 4 bar στην έξοδο του στροβίλου. Οι αντίστοιχες μετρήσεις θερμοκρασίας του ατμού είναι 410°C και 190°C . Σε πρώτη προσέγγιση οι ταχύτητες* εισροής-εκροής θεωρούνται αμελητέες. Ο ατμοστροβίλος κινεί ηλεκτρογεννήτρια ισχύος 10 MW , ενώ από εμπειρία μπορούν να ληφθούν υπόψη οι εξής βαθμοί απόδοσης του συγκροτήματος: Συνολικός βαθμός απόδοσης ηλεκτρογεννήτριας:

$\eta_{\text{HT}} = 98\%$ (0,98), Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου: $\eta_{\text{Q}} = 99,5\%$ (0,995) (Δείχνει ότι μόνο το 0,5% του ατμού παρακάμπτει μέσω διακένων την διεργασία μετατροπής ενέργειας), Μηχανικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου: $\eta_{\text{MHX}} = 0,99$ (99%) (δείχνει ότι 1% του ρευστοθερμικού έργου απορροφάται από τη τριβή των εδράνων, ταλαντώσεις κ.ά. μηχανικές απώλειες). Να υπολογισθούν

(α) Το ειδικό έργο από τις μετρήσεις p - t αλλά και το ισεντροπικό $\Delta h_{1,2s}$

(β) Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης,

(γ) Η ισχύς στον συμπλέκτη και

(δ) Η κατανάλωση ατμού του ατμοστροβίλου.

*είναι στον ατμαγωγό προσαγωγής $c \approx 100 \text{ m/s}$ και η αντίστοιχη κινητική ενέργεια $100^2/2 = 5 \text{ kJ/kg}$ είναι γενικώς μικρή σε σύγκριση με την στατική ενθαλπία του ατμού. Όμως σε ακριβέστερους υπολογισμούς πρέπει να συνυπολογίζεται.

ΛΥΣΗ: (α) Το ειδικό έργο Y του ατμοστροβίλου ορίζεται ως η ισεντροπική διαφορά της ολικής ενθαλπίας $h + c^2/2$ στα αντίστοιχα ζεύγη τιμών πίεσης και θερμοκρασίας με ισεντροπική εκτόνωση

4 Ισχύς βαθμιδομάδας υψηλής πίεσης: Υπολογισμός κατόπιν μετρήσεων

Στο τμήμα Υψηλής Πίεσης (Υ.Π.) ατμοστρόβιλου μικρής θερμοηλεκτρικής μονάδας εκτελούνται οι εξής μετρήσεις με σκοπό την εύρεση της παραγόμενης ισχύος στον άξονα της μηχανής, βλ. σκαρίφημα: Πίεση πριν από τον στρόβιλο Υ.Π. $p_1 = 100 \text{ bar}$, Θερμοκρασία πριν από τον στρόβιλο Υ.Π. $t_1 = 380 \text{ }^\circ\text{C}$, Πίεση μετά τον στρόβιλο Υ.Π. $p_2 = 40 \text{ bar}$, Θερμοκρασία μετά τον στρόβιλο Υ.Π. $t_2 = 260 \text{ }^\circ\text{C}$. Η παροχή μάζας του ατμού είναι $\dot{m} = 25 \text{ kg/s}$ και ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της μηχανής μπορεί να ληφθεί $\eta_m = 99\%$. Ζητούνται:

- (α) Να σχεδιαστεί με ποιοτικό τρόπο η εξέλιξη της εκτόνωσης στο διάγραμμα ενθαλπίας h -εντροπίας s ,
 (β) Υπολογίστε τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης η_i του στροβίλου Υ.Π. αγνοώντας την κινητική ενέργεια της ροής στην εισροή και εκροή θεωρώντας το σύστημα αδιαβατικό και στατικό. Να χρησιμοποιηθούν οι αδροί **ΠΙΝΑΚΕΣ** ατμού **9.2-1 έως -4 ΡΔΜ**.
 (γ) Να υπολογισθεί η ισχύς P_k του τμήματος Υ.Π. στο σημείο σύνδεσης του άξονά του με το σύστημα μετάδοσης κίνησης στην ηλεκτρογεννήτρια.

ΛΥΣΗ: (α) Οι ακριβείς καταστάσεις ατμού στην είσοδο -σημείο 1- και στην έξοδο 2 του ατμοστρόβιλου Υ.Π. καθώς και την ποιοτική εξέλιξη της διεργασίας εκτόνωσης αποτυπώνονται στο σκαρίφημα.

(β) Για τον υπολογισμό του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης η_i απαιτείται επίσης η κατάσταση στο

9.8.5 Ανάλυση λειτουργίας και ρευστοθερμικής κατάστασης του ισόθλιπτου ατμοστροβίλου Laval (9.8.1E)

Μονοβάθμιδος ατμοστρόβιλος με ισόθλιπτη βαθμίδα (ατμοστρόβιλος Laval) με δυνατότητα ρύθμισης ισχύος μέσω μερικής προσβολής του στροφείου είναι συγκροτημένος, όπως παραστατικά δείχνουν οι γενικές σχεδιαστικές τομές (από τα **ΣΧΗΜΑΤΑ 9.5/16 έως /19 ΡΔΜ**), από ένα στροφείο και τρεις τομείς με τέσσερα ακροφύσια ανά τομέα ως οδηγοί πτερυγώσεις. Η ρύθμιση ισχύος γίνεται με το άνοιγμα (ή κλείσιμο) αντίστοιχων ατμοβαλβίδων. Η μέση διάμετρος του στροφείου είναι $D_M = 0,2 \text{ m}$ (20 cm), η γωνία κλίσης της διεύθυνσης εκροής ταυτιζόμενης με τον άξονα των ακροφυσίων είναι $\alpha_1 = 15^\circ$ και η γωνία της ακμής εκφυγής των κινητών πτερυγίων $\beta_2 = 20^\circ$. Η παροχή μάζας ατμού είναι $\dot{m} = 2 \text{ kg/s}$ και ο αριθμός στροφών της μηχανής 30.000 1/min . Ο ατμός προσρέει την ακίνητη πτερύγωση με ταχύτητα $c_0 = 50 \text{ m/s}$, ενώ το ισεντροπικό στατικό ειδικό έργο ενθαλπικής πτώσης στην βαθμίδα είναι $\Delta h_{01} = 241 \text{ kJ/kg}$ και ο βαθμός αντίδρασης (με βάση τις ισεντροπικές ενθαλπικές πτώσεις) $r = 0,05$. Η ροή στην είσοδο της ακίνητης πτερύγωσης πραγματοποιείται χωρίς συστολή. Ενδεχόμενη κωνικότητα ροής αγνοείται, δηλ. η περιφερειακή ταχύτητα στην κινητή πτερύγωση θεωρείται σταθερή. Ο βαθμός απόδοσης της οδηγού πτερύγωσης (ακροφύσια και πτερύγια) είναι $\eta' = 75 \%$ και της κινητής πτερύγωσης (κινητά πτερύγια) $\eta'' = 80 \%$.

(α) Να περιγραφεί η εξέλιξη της εκτόνωσης του ατμού στον στρόβιλο στο διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας h - s , να δοθεί ο ορισμός του αριθμού αντίδρασης και το ειδικό έργο της βαθμίδας.

(β) Να υπολογισθεί η περιφερειακή ταχύτητα.

(γ) Να σχεδιαστούν κατόπιν υπολογισμού ταχυτήτων και γωνιών ροής οι κλίσεις των πτερυγίων (δηλ. τα τρίγωνα ταχυτήτων) στα επίπεδα εισροής και εκροής της κινητής πτερύγωσης του στροφείου μας.

(δ) Να ευρεθούν το αεροδυναμικό έργο της βαθμίδας, δηλ. το ειδικό έργο με βάση την εξίσωση του Euler, η ισχύς του στροβίλου και ο συνολικός βαθμός απόδοσής του.

ΛΥΣΗ: (α) Στη τομή τα κυριότερα τμήματα του ατμοστρόβιλου Laval: η μοναδική στεφάνη μιας σειράς κινητών πτερυγίων και η ακίνητη πτερύγωση αποτελούμενη είτε από πτερύγια, τα οποία διαμορφώνουν μεσοπτερυγικούς χώρους συγκλίνουσας – αποκλίνουσας διατομής προς την εκροή είτε από μια σειρά

9.8.6 Εκροή αέρα και υδρατμού από στόμιο σε αεριο- και ατμοφυλάκιο, αντιστοίχως, προς κίνηση αεριοεκτονωτή και ατμοστροβίλου **(9.8.1ΣΤ)**

Δοχείο πίεσης υπό διατηρούμενη σταθερή υπερπίεση 24 bar και σταθερή θερμοκρασία 360 °C λειτουργεί κατά περίπτωση είτε (Α) με θερμό αέρα ή (Β) με υπέρθερμο υδρατμό με εκροή εκτόνωσης σε χώρο χαμηλότερης πίεσης προσαρμοζόμενης στις συνθήκες εξόδου του μέσω στρογγυλεμένου στομίου διαμέτρου 25 mm. Ζητείται να υπολογισθούν:

- (α) Οι καταστατικές συνθήκες μέσα στο δοχείο
 - (β) Η ταχύτητα εκροής, σχ.(9.3.44β), με συντελεστή απωλειών ταχύτητας $\varphi_s = 0,975$
 - (γ) Η εκρέουσα παροχή μάζας,
 - (δ) Η δύναμη ορμής κατά την εκροή,
 - (ε) Απώλειες ενθαλπικής πτώσης,
 - (ζ) Θερμική πτώση μετατρεπόμενη σε ωφέλιμο έργο,
 - (η) Βαθμός απόδοσης της συσκευής του στομίου
 - (θ) Τιμές ρευστοθερμικών μεγεθών ροής (ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα) στην έξοδο του στομίου με τους ρευστοθερμικούς τύπους.
 - (ι) Κατά περίπτωση, με τον αέρα κινείται αεριοστροβίλος (αεριοεκτονωτής) και με τον υδρατμό ατμοστροβίλος. Να υπολογισθεί η διαθέσιμη ισχύς ροής για τη κίνηση των μηχανών.
- Οι αναγκαίες για την επίλυση ιδιότητες των δύο αερίων είναι για τον αέρα $\gamma = 1,4$, $R = 287,06 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ και για τον υπέρθερμο υδρατμό $\gamma = 1,3$, $R = 461,527 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

ΛΥΣΗ: (α) Η παρούσα περίπτωση απεικονίζεται στο σκαρίφημα (από **ΣΧΗΜΑ 9.3/13 ΡΔΜ Εκτόνωση αερίου σε στόμιο** στο διάγραμμα ενθαλπίας–εντροπίας h_s . Διεργασία ισεντροπική (ισ), διεργασία πραγματική στατικών (σ) και ολικών (τ) μεγεθών), οπότε χρησιμοποιούμε τους ίδιους συμβολισμούς.

9.8.7 Εκροή υδρατμού ή αέρα με σχεδιασμό ακροφύσιου Laval από δοχείο πίεσης **(9.8.1Ζ)**

Υπέρθερμος ατμός υπό $p_i = 24 \text{ bar}$ υπερπίεση και θερμοκρασία $t_i = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ σε δεξαμενή πίεσης εκτονώνεται σε χώρο με ελεύθερα διαμορφούμενη πίεση⁽¹⁾. Στο προσαρτημένο στη δεξαμενή στόμιο εκροής διαμέτρου λαιμού $d^* = 25 \text{ mm}$ πρόκειται να προσαρμοσθεί αποκλίνον τμήμα που διαμορφώνει ακροφύσιο Laval με σκοπό την παραγωγή υπερηχητικής ροής αριθμού Mach $M_1 = 1,4$ για την περίπτωση της εκροής υδρατμού. Με την ίδια γεωμετρία το ακροφύσιο (προσεγγιστικά κωνικού τύπου) θα λειτουργεί εναλλακτικά επίσης με υπέρθερμο πεπιεσμένο αέρα. Ο υδρατμός με ισεντροπικό εκθέτη $\gamma = 1,3 = \text{στθ}$ και σταθερά αερίου $R = 461,53 \text{ J/(kgK)}$, ο αέρας με $\gamma = 1,4$ να θεωρηθούν σαν ιδανικά αέρια σε ιδανική ροή, δηλ. ισεντροπική και χωρίς οποιεσδήποτε απώλειες. Να υπολογισθούν:

- (α) Η διάμετρος εξόδου του ακροφυσίου Laval για ροή ατμού.
- (β) Ο αριθμός Mach στην έξοδο του ακροφυσίου κατά την λειτουργία με τον αέρα.
- (γ) Να υπολογισθεί η παροχή μάζας ατμού για τη παραπάνω περίπτωση.
- (δ) Το ακροφύσιο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη κίνηση μονοβάθμιδου ατμοστροβίλου. Ποια η διαθέσιμη ισχύς ροής για τη κίνηση αυτού;
- (ε) Ειδικά για λειτουργία με ατμό τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα, αν χρησιμοποιηθούν οι Πίνακες Ατμού. Περιγράψτε σε αδρές γραμμές τον τρόπο υπολογισμού.

⁽¹⁾Περίπτωση ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 9.8.6

ΛΥΣΗ: (α) Λειτουργία με υδρατμό: Η σχ. (9.3.26) δίνει την διατομή εκροής A_1 του ακροφυσίου, εφόσον είναι γνωστή η πίεση εξόδου p_1 , η οποία υπολογίζεται άμεσα από την ισεντροπική σχέση του **ΠΙΝΑΚΑ 9.3-1** με ολική πίεση

$p_t = 24 + 1,01325 = 25,01325 \text{ bar}$ και $\gamma = 1,3$ για τον υπέρθερμο ατμό και με δεδομένο τον $M_1 = 1,4$:

9.8.8 Ακροφύσιο Laval μικρού ατμοστροβίλου σε ρευστοθερμικά ιδεώδη ροή

(9.8.1Η)

Το κωνικό ακροφύσιο τετραγωνικής διατομής ενός μικρού ατμοστροβίλου, που λειτουργεί εναλλακτικά (α) με Ήλιο και (β) με Υδρατμό, έχει παροχή $\dot{m} = 396 \text{ kg/h}$. Η τροφοδότηση από τους θαλάμους στασιμότητας στις δύο περιπτώσεις γίνεται υπό πίεση $p_t = 20 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $t_t = 450^\circ\text{C}$ και η εκτόνωση ολοκληρώνεται στο χώρο του στροφείου υπό υπερπίεση $p_1 = 0,2 \text{ bar}$. Να ευρεθούν:

(α) Τα καταστατικά μεγέθη στον θάλαμο στασιμότητας και στην εισροή και ο τύπος του ακροφυσίου.

(β) Διαστάσεις της διατομής εισόδου στο ακροφύσιο υπό ταχύτητα εισροής $c_t = 20 \text{ m/s}$.

(γ) Πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα και ταχύτητα στην ελάχιστη διατομή.

(δ) Διαστάσεις της ελάχιστης διατομής (λαιμός).

(ε) Θερμοκρασία, πυκνότητα, ταχύτητα και αριθμός Mach εκροής.

(στ) Απώλεια ενθαλπικής πτώσης και ο βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου.

(ζ) Διαστάσεις της διατομής εκροής.

(η) Μήκος του ακροφυσίου με την παραδοχή μέσης γωνίας συγκλίνοντος τμήματος προσροής 40° και γωνία αποκλίνοντος τμήματος εκροής 14° ,

(θ) Η ισχύς του ατμοστροβίλου Laval με δεδομένο βαθμό εκμετάλλευσης του ειδικού έργου εκροής από το ακροφύσιο $\eta = 45\%$ και για τα δύο εργαζόμενα μέσα, ο οποίος λειτουργεί σε χώρο με πίεση προσαρμοσμένη στη πίεση εκροής του ακροφυσίου.

(ι) Μπορεί το ίδιο στροφείο να χρησιμοποιηθεί και για τα δύο αέρια;

Χαρακτηριστικά μεγέθη ροής στο ακροφύσιο Laval δείχνει το σκαρίφημα (από το **ΣΧΗΜΑ 9.3/2 ΡΔΜ**, στις ταχύτητες αντί για u διάβαζε c)

ΛΥΣΗ: (α) Τιμές σταθερών και ιδιοτήτων αερίων (βλ. **ΠΙΝΑΚΑ 7.15-5** και παράγρ. 2.7.6 και 9.2.1 ΡΔΜ)

	γ	$R, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$c_p, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\gamma_{\text{κορ.}}$
Υδρατμός	: 1,3	461,5	2135	1,17
Ήλιον	: 1,67	2077	5240	-

Παραδοχή: Θερμικώς ιδανικά αέρια και ροή χωρίς απώλειες.

Κατάσταση ατμού στον θάλαμο στασιμότητας:

9.8.9 Σχεδιασμός δίδυμου τροχού ατμοστροβίλου τύπου Curtis

(9.8.1IA.MS1)

Ρυθμιστική βαθμίδα τύπου Curtis ως αρχική στην είσοδο πολυβάθμιδου ισόθλιπτου ατμοστροβίλου αποτελείται από στροφέιο με δίδυμη κινητή πτερύγωση (δύο “στεφάνες πτερυγίων”) με ενδιάμεση σταθερή οδηγό πτερύγωση, βλ. σκαρίφημα από **ΣΧΗΜΑ 9.4/1 ή 9.4/8 ΡΔΜ**. Η μερική και ρυθμιζόμενη προσβολή με ατμό της 1^{ης} πτερύγωσης γίνεται από ακίνητη πτερύγωση με λοξά ακροφύσια Laval από κατάσταση στασιμότητας του ατμοπαραγωγού $p_0 = 3 \text{ Mpa}$ και $t_0 = 400^\circ\text{C}$ και ο ατμός εκτονώνεται πλήρως στον χώρο λειτουργίας των βαθμίδων υπό σταθερή πίεση $p_1 = 0,5 \text{ Mpa}$. Κατά την αλληλουχία της διεργασίας οι συντελεστές απώλειας ταχύτητας είναι: στο ακροφύσιο $\varphi_{\text{ΑΠ1}} = \varphi_{\text{ΑΚ}} = 0,95$ (οριζόμενος με τη σχ. (9.3.39α) αλλά και σχ.(9.3.49)) και παρομοίως στη 1^η πτερύγωση $I \varphi_{\text{ΚΠ1}} = 0,82$, στην οδηγό πτερύγωση $O \varphi_{\text{ΑΠ2}} = 0,87$ και στη 2^η κινητή πτερύγωση $II \varphi_{\text{ΚΠ2}} = 0,92$. Η δεδομένη γεωμετρία των πτερυγίων καθορίζει στη 1^η στεφάνη απόλυτη γωνία εισροής $\alpha_1 = 18^\circ$ και σχετική γωνία εκροής $\beta_2 = 22^\circ$ και στη 2^η στεφάνη $\alpha_3 = 25^\circ$ και $\beta_4 = 38^\circ$. Ως εύλογος λόγος περιφερειακής ταχύτητας (μέσης γραμμής) προς την απόλυτη ταχύτητα 1^{ης} βαθμίδας λαμβάνεται $u/c_1 = 0,24$ (δηλ. στα όρια $C_1 = c_1/u = 3,5$ έως $4,5$, βλ. π.χ. **ΠΙΝΑΚΑ 9.6-4** και λεζάντα **ΣΧΗΜΑΤΟΣ 9.4/1**).

Οι απώλειες ανεμισμού του στροφείου Curtis να ληφθούν $10,5 \text{ kJ/kg}$ (δηλ. ίσες με το $\sim 7\%$ των απωλειών σε ακροφύσιο και πτερυγώσεις). Ζητούνται:

- (α) Το ειδικό έργο $Y = \Delta h_{\text{ισεντροπικό}}$ στη βαθμίδα, η ταχύτητα εκροής στο ακροφύσιο και οι απώλειες αυτού.
- (β) Να υπολογισθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων στη 1^η κινητή πτερύγωση και οι απώλειες σ' αυτήν.
- (γ) Οι απώλειες στην οδηγό πτερύγωση λόγω αναπροσανατολισμού της ροής.
- (δ) Να υπολογισθούν τρίγωνα ταχυτήτων της 2^{ης} κινητής πτερύγωσης και οι σχετικές απώλειες.
- (ε) Θεωρώντας, ότι οι απώλειες της βαθμίδας μετατρέπονται σε αύξηση της ενθαλπίας να ευρεθεί η θερμοκρασία και η πυκνότητα στον ισόθλιπτο χώρο.
- (στ) Ο δίαυλος ροής λόγω της εκτόνωσης είναι αποκλίνων με ανάλογη αύξηση του ειδικού όγκου. Να ευρεθεί ο ειδικός όγκος σε κάθε διατομή του διαύλου.
- (ζ) Να υπολογισθεί ο βαθμός απόδοσης της βαθμίδας.
- (η) Να παρασταθεί η διεργασία στο διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας $h-s$.

(Στον τροχό Curtis με διπλή σειρά πτερυγίων η πρώτη εκτόνωση του ατμού γίνεται στα ακροφύσια Laval **L** της οδηγού πτερύγωσης. Επειδή οι στατικές πιέσεις είναι $p_1 = p_2 = p_3 = p_4$ (ισόθλιπτος ή ατμοστρόβιλος δράσης) είναι δυνατή η μερική προσβολή της πτερωτής, δηλ. χρησιμοποίηση περιορισμένου αριθμού ακροφυσίων κατά περίπτωση με δυνατότητα ρύθμισης κατ' αυτόν τον τρόπο της ισχύος. Τα ακροφύσια Laval κατευθύνουν τη ροή ατμού υπό κλίση $\alpha = 14^\circ$ έως 17° σε σχέση με το επίπεδο περιστροφής της πτερύγωσης και με μεγάλη ταχύτητα c_1 (συνήθως υπερηχητική) πολλές φορές υπερτετραπλάσια της περιφερειακής ταχύτητας u : $c_1/u \approx 4,35$.)

ΛΥΣΗ: (α) Από τους Πίνακες Ατμού είναι: Εισροή στο ακροφύσιο:

$$p_0 = 30 \text{ bar}, \quad t_0 = 400^\circ\text{C} \text{ ® } h_0 = 3.232,5 \text{ kJ/kg}, \quad v_0 = 0,09931 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad s_0 = 6,9246 \text{ kJ/(kg} \times \text{K)}$$

Εκροή από το ακροφύσιο:

9.8.10 Υπολογισμός πολυβάθμιδου ισόθλιπτου ατμοστροβίλου συμπύκνωσης (9.8.1IB.MS2).

Πολυβάθμιδος **ισόθλιπτος** ατμοστρόβιλος συμπύκνωσης (ο οποίος ακολουθεί μετά τη βαθμίδα Curtis της ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 9.8.9) έχει δίαυλο ροής αυξανόμενης διατομής και έτσι αυξανόμενου ύψους (εκπετάσματος) πτερυγίων, ενώ η μέση διάμετρος παραμένει σταθερή $D_M = 1,15 \text{ m}$. Η 1^η βαθμίδα διαφοροποιείται ελαφρά έχοντας μέση διάμετρο $D_{M1} = 1,0 \text{ m}$. Η κατάσταση του ατμού στην εισροή της βαθμίδας είναι $p_K = 5 \text{ bar}$ και $t_K = 250^\circ\text{C}$ και η εκτόνωση ολοκληρώνεται στη τελευταία βαθμίδα στον συμπυκνωτή υπό πίεση $p_A = 0,05 \text{ bar}$. Ο αριθμός στροφών είναι $n = 3.000 \text{ min}^{-1}$, ο λόγος απόλυτης ταχύτητας προς τη περιφερειακή $c_1/u = 2,2$, ο συντελεστής απωλειών ταχύτητας ακίνητης πτερύγωσης $\varphi_{\text{ΑΠ}} = 0,95$ και κινητής πτερύγωσης $\varphi_{\text{ΚΠ}} = 0,84$ και η εκροή από τη βαθμίδα γίνεται χωρίς συστροφή, δηλ. με $\alpha_2 = 90^\circ$ (συνεπαγόμενη $c_{2u} = 0$, $c_{2m} = c_2$).

(α) Να ευρεθεί η κατάσταση ατμού στην εισροή και εκροή του στροβίλου.

(β) Να υπολογισθεί η ενθαλπική πτώση στον στρόβιλο λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή αναθέρμανσης λόγω απωλειών $f = 0,04$, δηλ. συντελεστή ανάκτησης θερμότητας $\mu = 1+f = 1,04$, βλ. παράγραφο 3.5.11 ΡΔΜ.

(γ) Να προεκτιμηθεί ο αριθμός βαθμίδων i με ισοκατανομή του συνολικού ειδικού έργου $\Delta h_{AK} = h_A - h_K$

βάσει του ενθαλπικού έργου της 1ης βαθμίδας $Y_{1ης βαθμ} = c_0^2/2$, δηλ. $\Delta h_{AK} = i \times Y_{1ης βαθμ}$.

(δ) Να υπολογισθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων εισροής και εκροής της βαθμίδας.

(ε) Να ελεγχθεί το ειδικό έργο βαθμίδας με την εξίσωση του Όιλερ και να ορισθεί ο τελικός αριθμός βαθμίδων.

ΛΥΣΗ: (α) Πίνακες Ατμού(Π.Α.):

Κατάσταση ατμού στην αρχική διατομή υπό $p_1 = 5 \text{ bar}$ και $t_1 = 250^\circ \text{C}$ είναι:

Ενθαλπία $h = 2.961,1 \text{ kJ/kg}$, εντροπία $s = 7,2721 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, ειδικός όγκος $v = 0,4744 \text{ m}^3/\text{kg}$, $\rho = 1/v$.

Κατάσταση ατμού στον συμπυκνωτή σχεδόν στη διατομή εκροής από τον στρόβιλο υπό $p = 0,05 \text{ bar}$, περιοχή κόρου (κορεσμένου ατμού) μετά από ισεντροπική εκτόνωση: $t = 32,898^\circ \text{C}$, ειδικός όγκος υγρής

9.8.11 Ρευστοθερμικά μεγέθη ατμού υπολογιζόμενα από καταστατικούς τύπους σε συνδυασμό με τους Πίνακες Ατμού σε ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης μέσης και υψηλής πίεσης.

(9.8.11Γ.MS3)

Δύο ατμοστρόβιλοι τροφοδοτούνται με υδρατμό ίδιας παροχής $\dot{m} = 360 \text{ t/h}$ αλλά υπό τις εξής διαφορετικές συνθήκες στασιμότητας:

A. $p_D = 46 \text{ bar}$ και $t_D = 420^\circ \text{C}$ και **B.** $p_D = 230 \text{ bar}$, $t_D = 780^\circ \text{C}$.

(α) Να ευρεθεί η κατάσταση ατμού δεδομένης πίεσης p_D και θερμοκρασίας t_D με υπολογισμό του συντελεστή πραγματικού αερίου Z (συμπιεστότητας), της ειδικής ισοβαρούς θερμοχωρητικότητας c_p και του ειδικού όγκου v με τη βοήθεια πλησιέστερων παρεμφερών τιμών p_T και t_T υπαρχουσών στους Πίνακες Ατμού χρησιμοποιώντας τη καταστατική εξίσωση $p = Z \cdot \rho \cdot K \cdot T$ και τις εξισώσεις ενθαλπίας $\Delta h = c_p \cdot \Delta T$ και εντροπίας $\Delta s = \Delta h/T_{\text{μεση}}$ με $R = 461,53 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Να συγκριθεί η βεβαιότητα του υπολογισμού με τιμές υπολογιζόμενες μέσω γραμμικής παρεμβολής από τους πίνακες ατμού. Να χρησιμοποιηθούν οι συνοπτικοί **ΠΙΝΑΚΕΣ Ατμού 9.2-3 έως -6 ΡΔΜ** και να υπολογισθούν ο ειδικός όγκος v , η ειδική ενθαλπία h και εντροπία s . Τιμές αναφοράς προς σύγκριση λαμβάνονται από τους Διεθνείς Πίνακες Ατμού*(Δ.Π.Α.).

(β) Στον συμπυκνωτή η πίεση είναι $p_\Sigma = 0,0466 \text{ bar}$ συνεπαγόμενη ποιότητα ατμού $x = 0,8$, θερμοκρασία $t_\Sigma = 31,5^\circ \text{C}$ και ενθαλπία $h_\Sigma = 2363,4 \text{ kJ/kg}$. Να υπολογισθεί η διαθέσιμη ισχύς ροής στους στροβίλους και η τελικά παραγόμενη ισχύς με βαθμούς απόδοσης $\eta_A = 86\%$ και $\eta_B = 90\%$.

*Διεθνείς (ή ακριβείς) Πίνακες Ατμού είναι 'προτυποποιημένοι' Π.Α. δημοσιευμένοι από την IAPS, International Association for the Properties of Steam, και ειδικότερα π.χ. στο σύγγραμμα Properties for Water and Steam (Schmidt - Grigull) και στη χώρα μας υπολογιζόμενοι με τον αλγόριθμο της IAPS με τον κώδικα **PROST** προσβάσιμο στο βιβλίο Τεχνολογία Φυσικού Αερίου του συγγραφέα, βλ. βιβλιογραφία.

ΛΥΣΗ: (α) Ατμοστρόβιλος A: Δοθείσα κατάσταση στο σημείο (46, 420°) με $p_D = 46 \text{ bar}$, $t_D = 420^\circ \text{C}$, δηλ. τιμές μη άμεσα υπάρχουσες στους **ΠΙΝΑΚΕΣ 9.2-3 και -4**. Επιλέγονται οι αμέσως υπάρχουσες γειτονικές τιμές στα 40 και 60 bar με τη πλησιέστερη θερμοκρασία των 400°C και η **γραμμική**

9.8.12 Εκροή υδρατμού από συγκλίνον στόμιο πιεστικής δεξαμενής

(9.8.11Ε. ΑΚΑΤΜ)

Υδρατμός σε πιεστική δεξαμενή υπό πίεση στασιμότητας $p_t = 8 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $t_t = 250^\circ \text{C}$ διοχετεύεται μέσω στομίου συγκλίνοντος ακροφυσίου σε χώρο παραγωγικής διεργασίας ευρισκόμενο υπό

πίεση $p_1 = 1,2 \text{ bar}$, βλ. σκαρίφημα από **ΣΧΗΜΑ 9.3/12 ΡΔΜ**. Η διάμετρος του λαιμού του ακροφυσίου είναι $D_s = 1 \text{ cm}$.

(α) Έχουμε ροή εκτόνωσης. Γιατί; Η ροή είναι συμπιεστή. Γιατί; Η ροή είναι υπερκρίσιμη. Γιατί;

(β) Να υπολογισθεί η παροχή μάζας για ιδανικό ατμό με $\gamma = 1,333$ και $R = 461,5 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ με τους ισεντροπικούς τύπους και για πραγματικό ατμό με τους συνοπτικούς **ΠΙΝΑΚΕΣ Ατμού 9.2-3 έως -6 ΡΔΜ**. Ποιό το συμπέρασμα από τη διαφορά των δύο αποτελεσμάτων;

(γ) Να σκαριφηθεί και περιγραφεί η διεργασία στο διάγραμμα ενθαλπίας- εντροπίας $h-s$.

ΛΥΣΗ: (α) Το σκαρίφημα μοντελοποιεί την περίπτωση ροής σε εκτόνωση από την υψηλότερη πίεση των 8 bar προς τη χαμηλότερη πίεση του 1,2 bar.

Ο λόγος πιέσεων λειτουργίας $p_1/p_1 = 8/1,2 = 6,67$ ή $p_1/p_c = 0,15$ όντας πολύ μικρότερος του κρίσιμου 0,57743 υποδεικνύει, ότι η ροή στο στόμιο είναι οπωσδήποτε κρίσιμη, βλ. σχ.(9.3.7α ή .53) ΡΔΜ.

Η ροή είναι συμπιεστή, επειδή οι μεταβολές της πυκνότητας του ατμού, αντίστοιχες της μεγάλης μεταβολής (μείωσης) της πίεσης από 8 σε 1,2 bar, είναι πολύ μεγάλες δεδομένου του γνωστού μας

9.8.13 Ειδικό έργο, ισχύς και ροπή μικρού ατμοστροβίλου

(9.8.1/ΣΤ).

Σε μικροατμοστρόβιλο να υπολογισθούν

(α) το ειδικό έργο και η ισχύς και

(β) η στροφική ροπή,

για λειτουργία υπό τις εξής συνθήκες: Παροχή μάζας $\dot{m} = 1,0 \text{ kg/s}$, στην εισροή: ταχύτητα εισροής $c_1 = 3,2 \text{ m/s}$, πίεση $p_1 = 30,0 \text{ bar}$, θερμοκρασία $t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ και στην εκροή μετά από εκτόνωση σε κατάσταση κορεσμού $c_2 = 30 \text{ m/s}$ και $p_2 = 1,3 \text{ bar}$. Οι απώλειες ειδικού έργου της διεργασίας είναι $Y_v = 28.000 \text{ J/kg}$ και ο αριθμός στροφών του στροβίλου $n = 3.600 \text{ min}^{-1}$.

ΛΥΣΗ: (α) Το ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ εισροής 1 και εκροής 2 δίνει το ισεντροπικό ειδικό έργο:

$$Y = h_{t1} - h_{t2} = h_1 + \frac{c_1^2}{2} - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} \right) \quad \text{και το πραγματικό μετά την αφαίρεση των απωλειών: } Y_p = Y - Y_v$$

9.8.14 Συμπύεση και εν συνεχεία εκτόνωση υδρατμού

(9.8.1Δ. ATM1)

Ατμός θερμοκρασίας $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ υπό πίεση $p_1 = 4 \text{ bar}$ συμπιέζεται αδιαβατικά στα $p_2 = 8 \text{ bar}$. Ζητούνται:

(α) Να υπολογισθεί η νέα θερμοκρασία (α1) θεωρώντας τον ατμό σαν ιδανικό αέριο (με ισεντροπικών εκθέτη $\gamma = 1,333$ και ισοβαρή θερμοχωρητικότητα $c_p = 1.846,1 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$) και τη συμπύεση ισεντροπική και (α2) με τον ατμό ως πραγματικό αέριο χρησιμοποιώντας τους Πίνακες Ατμού.

Εν συνεχεία ο ατμός διοχετεύεται και εκτονώνεται σε ατμοστρόβιλο αντιπίεσης 2 bar.

(β) Να υπολογισθεί η θερμοκρασία εκτόνωσης (β1) όπως στο (α1) και (β2) συγκριτικά όπως στο (α2).

(γ) Να υπολογισθεί στις προηγούμενες περιπτώσεις το ειδικό έργο της κάθε διεργασίας. Είναι το ειδικό έργο της διεργασίας εκτόνωσης του πραγματικού ατμού μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτή του ιδανικού ατμού και γιατί;

(δ) Να ευρεθεί η ισχύς του συστήματος συμπύεσης-εκτόνωσης πλησιέστερα προς τη πραγματικότητα θεωρώντας και στις δυο περιπτώσεις ίδιο βαθμό απόδοσης $\eta = 80\%$ και **παροχή ατμού 36 t/h**.

ΛΥΣΗ: (α) Συμπύεση: (α1) Ο ισεντροπικός τύπος δίνει τη θερμοκρασία συμπύεσης T_2 του ιδανικού ατμού από 4 στα 8 bar:

9.8.15 Μηχανήματα του ρευστοθερμικού κυκλώματος των ατμοστροβιλικών εργοστασίων **(9.7.8)**

Να γίνει σύντομη απαρίθμηση και περιγραφή του ρόλου των σημαντικών υποσυστημάτων και μηχανημάτων του ρευστοθερμικού κυκλώματος ατμοστροβίλων σε τυπικό Θερμοηλεκτρικό Σταθμό (ΘΗΣ).

ΛΥΣΗ: (1) **Αντλία τροφοδοτήσεως του ατμοπαραγωγού.** Κατ' αρχήν θα τροφοδοτηθεί ο

(2) **Προθερμαντήρες νερού.** Μετά την αντλία υπό την πίεση του ατμοπαραγωγού (στην πράξη κάτι

(3) **Ατμοπαραγωγός.** Στην συνέχεια το τροφοδοτικό νερό ατμοποιείται με τη βοήθεια του συστήματος

(4) **Υπερθερμαντήρας.** Ο ατμός εκρέει από τις επιφάνειες ατμοποιήσεως ή τα τύμπανα κατά περίπτωση

(5) **Πρώτο τμήμα ατμοστροβίλου.** Από τον υπερθερμαντήρα ο ατμός οδηγείται στο πρώτο τμήμα του

(6) **Δεύτερος υπερθερμαντήρας** Από εκεί το σύνολο του ατμού (εκτός αν από εδώ αρχίσουν οι

(7) **Δεύτερο τμήμα στροβίλου.** Από τον υπερθερμαντήρα οδηγείται στο δεύτερο τμήμα του στροβίλου

(8) **Προθερμαντήρας ατμού.** Οι προθερμάνσεις αυτές γίνονται σε προθερμαντήρες ατμού, που

(9) **Ψυγείο ατμού (Ψυχραντήρας ή Συμπυκνωτής).** Η υπόλοιπη μετά τις απομαστεύσεις

(10) **Αντλία ψυγείου.** Από το ψυγείο αναρροφά το συμπύκνωμα η αντλία του ψυγείου και το

(11) **Απαεριωτής.** Εδώ γίνεται η απαερίωση του τροφοδοτικού νερού (απαλλαγή από CO_2 και O_2

(12) **Δεξαμενή απαεριωμένου νερού.** Το απαεριωμένο νερό οδηγείται – με βαρύτητα - στην δεξαμενή

(13) **Συστήματα μετάδοσης κίνησης** από τους στροβίλους σε Ηλεκτρογεννήτριες ή άλλες εργομηχανές

9.8.16 Απώλεια ενθαλπικής πτώσης στο ακροφύσιο Laval

(9.8.8B)

Να γίνει υπολογιστική διάγνωση της ροής και διαστασιολόγηση του ακροφυσίου Laval της ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 9.8.8 **αλλά με απώλειες** για λειτουργία με υδρατμό και ήλιο υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας: Πίεση και θερμοκρασία στασιμότητας 20 bar/450 °C, πίεση χώρου εκροής 0,2 bar (υπερπίεση) και παροχή 392 kg/h.

Να ακολουθηθεί η ίδια μεθοδολογία υπολογισμού με τα υποερωτήματα (α) έως (ι) και να χρησιμοποιηθούν, όπου απαιτείται, αποκτηθέντα αποτελέσματα εφαρμόσιμα και στη παρούσα περίπτωση. Να ληφθεί υπόψη, ότι η απώλεια ενθαλπικής πτώσης είναι αμελητέα στο συγκλίνον τμήμα εισροής του ακροφυσίου αλλά σημαντική στο αποκλίνον τμήμα εκροής.

A. Να ελεγχθεί ποια αποτελέσματα των ερωτημάτων (α) έως (θ) επηρεάζονται από τις απώλειες της πραγματικής ροής και γιατί.

B. Να απαντηθεί επίσης το τελικό ερώτημα (ι).

ΛΥΣΗ: A. Με βάση την εκφώνηση η εξέλιξη της ροής και τα αποτελέσματα των υποερωτημάτων (α) έως και (δ) της ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 9.8.8 παραμένουν τα ίδια και για την προκειμένη περίπτωση, διότι η απώλεια

9.8.17 Πραγματική ροή με συμπύκνωση ατμού σε ακροφύσιο Laval μικρού ατμοστροβίλου

(9.8.8Γ 9.8.1I)

Το κωνικό ακροφύσιο τετραγωνικής διατομής ενός μικροατμοστροβίλου με στροφέιο μερικής προσβολής λειτουργεί με παροχή 396 kg/h με τροφοδότηση από θάλαμο στασιμότητας υδρατμού υπό πίεση 20 bar και θερμοκρασία 400 °C. Η εκτόνωση υπό πραγματικές συνθήκες ολοκληρώνεται στον χώρο του στροφείου υπό υπερπίεση 0,2 bar. Ζητούνται:

(α) Τα καταστατικά μεγέθη στον θάλαμο στασιμότητας και στην εισροή του ακροφυσίου.

(β) Διαστάσεις της διατομής εισόδου στο ακροφύσιο με ταχύτητα εισροής 20 m/s,

(γ) Πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα, ταχύτητα, αριθμός Mach και διαστάσεις στην ελάχιστη διατομή ('λαιμός'),

(δ) Θερμοκρασία, απώλεια ενθαλπικής πτώσης, βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου, πυκνότητα, ταχύτητα και αριθμός Mach εκροής,

(ε) Διαστάσεις της διατομής εκροής και μήκος του ακροφυσίου με την παραδοχή γωνίας συγκλίνοντος τμήματος προσροής 40° και αποκλίνοντος τμήματος εκροής 14° ,

(στ) Η ισχύς του ατμοστροβίλου Laval με δεδομένο βαθμό εκμετάλλευσης του ειδικού έργου εκροής από το ακροφύσιο 45%, ο οποίος λειτουργεί σε χώρο με πίεση προσαρμοσμένη στη πίεση εκροής του ακροφυσίου.

(ζ) Η λειτουργία του ακροφυσίου και η διεργασία εκτόνωσης να παρασταθούν σε σκαριφήματα.

(η) Να δοθεί συνοπτική περιγραφή της συλλειτουργίας ακροφυσίου με το στροφέιο του στροβίλου.

Παρατήρηση: Πρόκειται για το ακροφύσιο της ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 9.8.8 αλλά με θερμοκρασία στασιμότητας 400°C (αντί των 450°C) και λειτουργία εν μέρει στη περιοχή του ένυδρου ατμού. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ροής στο ακροφύσιο δείχνει το σκαρίφημα (από **ΣΧΗΜΑ 9.3/2**, για τη ταχύτητα αντί u διάβαζε c), καθώς και το διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας με τη ρευστοθερμική διεργασία ποσοτικοποιημένη.

ΛΥΣΗ: “Πραγματική” ανάλυση της ροής υδρατμού γίνεται με την χρήση των **ΠΙΝΑΚΩΝ** ατμού **9.2-1 έως -4 ΡΔΜ** ή και με το διάγραμμα Mollier **ΣΧΗΜΑ 9.2/3β**. Εδώ χρησιμοποιούμε τους λεπτομερείς Πίνακες

9.8.18 Απώλειες ανεμισμού και τριβής στροφέιου στον χώρο περιστροφής αυτού **(9.4.4Α)**

Μικροατμοστρόβιλος μιας βαθμίδας ισόθλιπτης λειτουργίας φέρει δισκόμορφο στροφέιο με μία στεφάνη πτερυγίων (ατμοστρόβιλος Laval) μέσης διαμέτρου 700 mm με ύψος πτερυγίων 20 mm και παράγει ηλεκτρική ισχύ $P_e = 180 \text{ kW}$ στον αριθμό στροφών $n = 4.800 \text{ min}^{-1}$ υπό συνθήκες μερικής προσβολής της πτερύγωσης και πίεσης εκροής (εξόδου από την πτερωτή) κεκορεσμένου ατμού 1 bar στο περίκλειστο περίβλημά του. Ζητούνται:

(α) Η ισχύς απωλειών επιφανειακής τριβής του στροφέιου (δίσκου) $P_{\Delta i}$.

(β) Η ισχύς απωλειών ανεμισμού P_{AP} της πτερύγωσης στο περιβάλλον ατμού για βαθμό μερικής προσβολής $\varepsilon = 0,1$ **(β1)** για κατασκευή με περιφερειακό περίβλημα προστασίας ανεμισμού της πτερύγωσης και **(β2)** χωρίς το περίβλημα.

(γ) Ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης $\eta = P_e / (P_e + P_{\Delta i} + P_{AP})$ για την περίπτωση (β2).

(δ) Επίσης να επανεκτιμηθεί η τιμή του συντελεστή $k_{\Delta i}$ στον τύπο σχ. (9.4.16) ΡΔΜ και σε περίπτωση ουσιαστικής διαφοράς να επαναληφθεί ο υπολογισμός.

ΛΥΣΗ: Δεδομένα: Κορεσμένος ατμός υπό $1 \text{ bar} \approx 1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$ έχει – από Πίνακες Ατμού –

θερμοκρασία 100°C , πυκνότητα $0,5977 \text{ kg/m}^3$ και δυναμικό ιξώδες $\mu = 12,27 \times 10^{-6} \text{ kg/(s}\cdot\text{m)}$. Επίσης

είναι $n = 4800/60 = 80 \text{ s}^{-1}$

9.8.19 Χαρακτηριστικοί αριθμοί για ατμοστροβίλους: Ταξινόμηση κατά τη καμπύλη του Κορντιέ

(9.6.2 Α)

Με την βοήθεια των απλών τύπων της παραγράφου 1.2.4 ΡΔΜ ή των σχ.(9.5.1 και .2) να καθορισθούν τα διαστήματα τιμών των αδιάστατων χαρακτηριστικών αριθμών πίεσης ψ , παροχής ϕ και ισχύος λ για αξονικούς και ακτινικούς ατμοστροβίλους σύμφωνα με την καμπύλη του Κορντιέ (Cordier), **ΣΧΗΜΑ 1.2/2 ΡΔΜ**, δηλ. για μια βαθμίδα βέλτιστης απόδοσης, γνωρίζοντας, ότι οι τιμές αριθμών ταχυστροφίας σ και διαμέτρου δ είναι $0,15 < \sigma < 0,7$ και $3,84 < \delta < 1,5$ για αξονικούς αεριο – και ατμοστροβίλους και $0,13 < \sigma < 0,23$ και $4,3 < \delta < 2,8$ για ακτινικούς.

Όπου απαιτηθεί ο βαθμός απόδοσης να ληφθεί $\eta = 0,85$.

ΛΥΣΗ: Χρησιμοποιούμε ως βάση τα διαστήματα των σχ. (9.5.1 και 2) ανά ζεύγη τιμών δ, σ προσέχοντας, ότι στις μικρότερες τιμές του δ αντιστοιχούν οι μεγαλύτερες τιμές του σ , και αντιστρόφως. Π.χ. για τον αριθμό πίεσης, σχ. (9.2.5), σε αξονική πτερύγωση είναι:

.20 **Ανάλυση πολυβάθμιδου αντίθλιπτου ατμοστροβίλου συμπύκνωσης (στροβίλος αντίδρασης)** **9.8-23**

Ατμός υπό 10 bar και 250 °C εισρέει σε στροβίλο αντίθλιψης (αντίδρασης) ισχύος 8,5 MW και εκρέει στον συμπυκνωτή υπό πίεση 0,2 bar με βαθμό αναθέρμανσης (λόγω απωλειών τριβής) $v = 1 + f' = 1,04$. Ο στροβίλος διαθέτει έντεκα αλληπάλληλες βαθμίδες ($i = 11$) με πτερύγια υπό σχετική γωνία εισροής $\beta_1 = 100^\circ$ και εκροής $\beta_2 = 20^\circ$, με βαθμό αντίδρασης $r = 50\%$, περιστρέφεται με $n = 3.000 \text{ min}^{-1}$ και έχει μέση διάμετρο πτερύγωσης 1,3 m. Ζητούνται:

(α) Το ειδικό έργο και η ενθαλπική πτώση σε κάθε βαθμίδα λαμβάνοντας τη γραμμή εκτόνωσης στο διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας σαν ευθεία.

(β) Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι στις παραπάνω καταστάσεις του διεργαζόμενου ατμού είναι η ενθαλπία εισροής $h_E = 2.943,2 \text{ kJ/kg}$ ($s_E = 6,9266 \text{ kJ/kg K}$) και εκροής $h_\Sigma = 2.282,2 \text{ kJ/kg}$ να υπολογισθεί ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου και της κάθε βαθμίδας χωρίς να ληφθούν υπόψη οι όροι κινητικής ενέργειας.

(γ) Να υπολογισθεί το ύψος πτερυγίων στη πρώτη, την έκτη και τη τελευταία βαθμίδα δεδομένου ότι ο ειδικός όγκος έχει αντίστοιχες τιμές $v = 0,2327, 6,5874, \dots, 7,036 \text{ m}^3/\text{kg}$.

(δ) Δείξτε ότι ο ατμοστροβίλος είναι αντίθλιπτος (με πτερύγωση αντίδρασης) και μάλιστα με βαθμό αντίδρασης $r = 0,5$.

(ε) Να επαληθευθούν οι παραπάνω δεδομένες καταστάσεις ατμού στην εισροή, εκροή και στην έκτη βαθμίδα με τους ΠΙΝΑΚΕΣ ατμού 9.2-1 έως -4 ΡΔΜ.

(στ) Ποιο είναι το μεγάλο κατασκευαστικό πλεονέκτημα στροβίλων αντίθλιψης με $r = 50\%$ αναφορικά με τη διαμόρφωση των πτερυγίων;

ΛΥΣΗ: (α) Το ειδικό έργο Y_{EU} υπολογίζεται με την εξίσωση του Euler από τα τρίγωνα ταχυτήτων (με περιστροφική ταχύτητα $u = \omega \times R$, $\omega = 2\pi \times n$ με $n = 3000/60 = 50 \text{ s}^{-1}$,

9.8.21 Ch!!!!!! Αν είναι ίδια με 9.8.6!!!!!!

Να λυθεί με το (θ) Υπέρθερμος ατμός από Πίνακες Ατμού ή/και Διάγραμμα Mollier h-s

9.8.22 Εκροή αέρα και υδρατμού από στόμιο σε αεριο- και ατμοφυλάκιο, αντιστοίχως, προς κίνηση αεροεκτονωτή και ατμοστροβίλου (9.8.6 9.8.1ΣΤ)

Δοχείο πίεσης υπό σταθερή υπερπίεση 24 bar και σταθερή θερμοκρασία 360 °C λειτουργεί κατά περίπτωση είτε (Α) με θερμό αέρα ή (Β) με υπέρθερμο υδρατμό με εκροή εκτόνωσης σε χώρο χαμηλότερης πίεσης προσαρμοζόμενης στις συνθήκες εξόδου του μέσω στρογγυλεμένου στομίου διαμέτρου 25 mm. Ζητείται να υπολογισθούν:

(α) Οι καταστατικές συνθήκες μέσα στο δοχείο,

(β) Η ταχύτητα εκροής, σχ.(9.3.44β) ΡΔΜ, με συντελεστή απωλειών ταχύτητας $\varphi_\Sigma = 0,975$,

(γ) Η εκρέουσα παροχή μάζας,

(δ) Η δύναμη ορμής κατά την εκροή,

(ε) Απώλειες ενθαλπικής πτώσης,

(ζ) Θερμική πτώση μετατρεπόμενη σε ωφέλιμο έργο,

(η) Βαθμός απόδοσης της συσκευής του στομίου

(θ) Τιμές ρευστοθερμικών μεγεθών ροής στην έξοδο του στομίου υπολογισμένες με τους ρευστοθερμικούς τύπους.

Οι αναγκαίες για την επίλυση ιδιότητες των δύο αερίων είναι για τον αέρα $\gamma = 1,4$, $R = 287,06 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ και για τον υπέρθερμο υδρατμό $\gamma = 1,3$, $R = 461,527 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

(ι) Κατά περίπτωση, με τον αέρα κινείται αεριοστρόβιλος (αεριοεκτονωτής) και με τον υδρατμό ατμοστρόβιλος. Να υπολογισθεί η διαθέσιμη ισχύς ροής για τη κίνηση των μηχανών.

Με το (ι) είναι ίδια με την 9.8.6 !!!!!

ΛΥΣΗ: (α) Η παρούσα περίπτωση απεικονίζεται στο σκαρίφημα (από **ΣΧΗΜΑ 9.3/13 ΡΔΜ**): **Εκτόνωση αερίου σε στόμιο** στο διάγραμμα ενθαλπίας–εντροπίας h_s , διεργασία ισεντροπική (ισ), διεργασία πραγματική στατικών (σ) και ολικών (τ) μεγεθών, οπότε χρησιμοποιούμε τους ίδιους συμβολισμούς.

9.8.22

.26 Διαστασιολόγηση πολυβάθμιδου ατμοστροβίλου με βέλτιστο λόγο απόλυτης ταχύτητας εισροής προς τη περιφερειακή u/c_1 c_1/u

Ο διατιθέμενος υδρατμός στην είσοδο πολυβάθμιδου αξονικού ατμοστροβίλου δράσης έχει πίεση $p_0 = 6,2 \text{ bar}$ και θερμοκρασία $t_0 = 627^\circ\text{C}$, ενώ η αντιπίεση (πίεση στην έξοδο του στροβίλου) είναι $p_A = 1 \text{ atm}$. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης εκτιμάται σε $\eta_s = 86\%$ και η γωνία κλίσης των ακροφυσίων ατμού στην ακίνητη περύγωση είναι 16° ως προς το επίπεδο περιστροφής. Τα περύγια του στροφέιου έχουν ίσες γωνίες εισροής και εκροής, περιστρέφονται με ταχύτητα $u = 260 \text{ m/s}$ και οι ταχύτητες εισροής-εκροής είναι ίσες. Γνωρίζοντας, ότι ο βέλτιστος λόγος ταχυτήτων περιστροφής προς απόλυτη ταχύτητα εισροής είναι $u/c_1 = \sin \alpha_1 / 2$, όταν οι σχετικές ταχύτητες είναι ίσες $w_1 = w_2$ και οι γωνίες $\beta_2 = 180^\circ - \beta_1$, ζητούνται:

(α) Δώστε σε σκαρίφημα τα τρίγωνα ταχυτήτων προς αισθητοποίηση των δεδομένων μεγεθών.

(β) Να υπολογισθεί η θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα και ο αριθμός των βαθμίδων για ατμό με ισεντροπικό εκθέτη $\gamma = 1,333$ και ειδική σταθερά $R = 461,53 \text{ J/(kg K)}$.

(γ) Να αποδειχθεί ο παραπάνω βέλτιστος λόγος $(u/c_1)_{\text{ΒΕΛΤ}} = \sin \alpha_1 / 2$ με τη βοήθεια των τριγώνων ταχυτήτων **διαφορίζοντας** τον βαθμό απόδοσης της περύγωσης

$$\eta = \frac{u(c_{1u} - c_{2u})}{c_1^2 / 2} = \frac{\text{ειδική Έργο βαθμίδας απο εξίσωση του Euler}}{\text{ειδική Έργο ταχύτητας εισροής}} \quad \text{ως προς } u/c_1 \text{ με την}$$

προϋπόθεση, ότι οι σχετικές ταχύτητες είναι ίσες $w_2 = w_1$ καθώς και οι σχετικές γωνίες (δηλ. οι κλίσεις των κινητών περυγίων) $\beta_2 = 180^\circ - \beta_1$.

ΛΥΣΗ: (α) Τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου – εξόδου στη βαθμίδα: **τσεκ!!!!!!**

(β) Ισεντροπική πτώση θερμοκρασίας από T_0 σε T_s κατά την εκτόνωση στο ακροφύσιο από

9.8.23:.....

9.8.24 Σύστημα ατμοστροβίλου: Περιγραφή της ρευστοθερμικής διεργασίας και κατανομή ειδικού έργου

Το αριστερό σκαρίφημα δείχνει το κύκλωμα λειτουργίας ενός συστήματος ατμοστροβίλου με υπερθερμαντήρα ατμού γνωστού ως θερμοδυναμικού κύκλου Clausius-Rankine (Κλάουσιους-Ράνκιν)

απεικονιζομένου στο διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας $T-s$ για κυκλοφορία του εργαζόμενου ρευστού χωρίς απώλειες. Ζητούνται:

α. Να περιγραφεί το κύκλωμα και να κατονομασθούν τα έξι υποσυστήματά του.

β. Να δοθεί η μετατροπή ή/και μεταφορά ειδικού έργου (ισοζύγια ενέργειας) σε κάθε υποσύστημα και ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης του ατμοστροβιλικού συστήματος οριζόμενος ως $\eta_{ΘΕΩΡ} = (\text{εξαγόμενο ωφέλιμο ειδικό έργο στον στρόβιλο } Y_{ΣΤΡ}) / (\text{εισαγόμενη θερμότητα})$.

ΛΥΣΗ: (α) 1: αγωγός παροχέτευσης του νερού (= υγροποιημένου ατμού = συμπυκνώματος),

1→2 : ισεντροπική συμπίεση του νερού στην **αντλία**,

2→2α : ισοβαρής εισαγωγή θερμότητας στο νερό,

2α→3 : εισαγωγή θερμότητας και ατμοποίηση στον **λέβητα** με $p = \text{στθ}$ και $T = \text{στθ}$,
