



**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ**  
**ΡΟΗ ΑΤΜΟΥ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΟΦΥΣΙΑ**

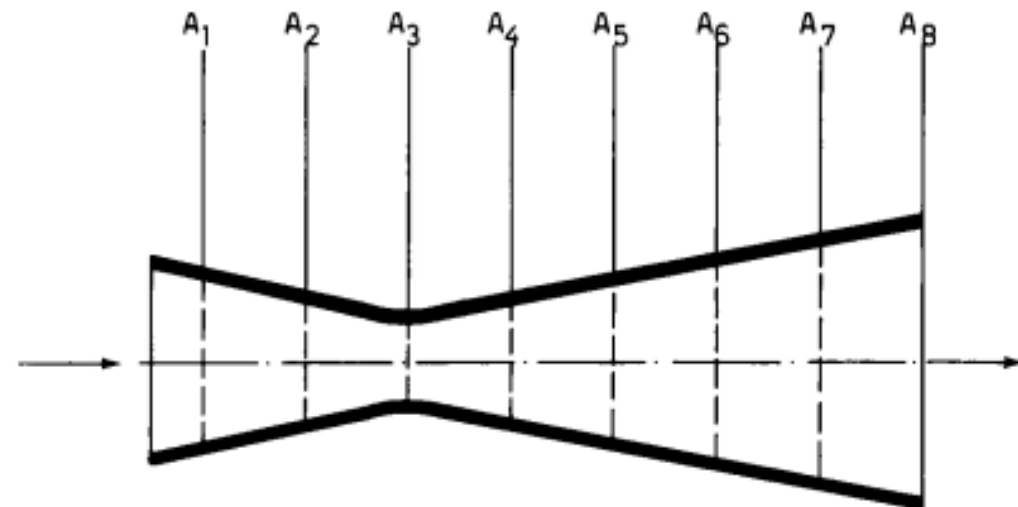
**Νίκος Μ. Κατσουλάκος**  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.



ΓΝΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

# Εξίσωση συνέχειας

- ❑ Πρόκειται για την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας
- ❑ Ο Ατμοστρόβιλος είναι ένα ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα, στο οποίο υπάρχει ροή μάζας μέσα στον ορισμένο όγκο του συστήματος
- ❑ Ισχύει ότι σε ορισμένο χρονικό διάστημα όση μάζα εισέρχεται, τόση και εξέρχεται από τον ατμοστρόβιλο (υποτίθεται ότι η ροή είναι σταθερή)
- ❑ Αν σε αγωγό μεταβαλλόμενης διατομής (προσομοιάζει στο στρόβιλο) οι πιέσεις εισόδου – εξόδου είναι σταθερές ισχύει η εξίσωση της συνέχειας



$$\dot{m} = \text{σταθερή}$$

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{c}{v}$$

- A: εμβαδόν διατομής
- c: ταχύτητα ρευστού
- v: ειδικός όγκος

# Εξίσωση ολικής ενέργειας

- Πρόκειται για την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας σε σταθερή, μονοδιάστατη ροή ατμού
- Έστω δύο αυθαίρετα επιλεγμένα σημεία (1 και 2) κατά μήκος της ροής. Τότε θα ισχύει:

$$Q + \dot{m} \cdot \left( h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right) = \dot{m} \cdot \left( h_2 + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right) + P$$

- **h**: ειδική ενθαλπία του ατμού (J/kg)
- **c**: ταχύτητα ατμού σε m/s
- **z**: το ύψος πάνω από ένα επίπεδο αναφοράς
- **g**: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- **Q**: η θερμική ισχύς που χάνεται από το κέλυφος του στροβίλου / θερμικές απώλειες (W)
- **P**: η παραγόμενη ισχύς (W)

# Εξίσωση ολικής ενέργειας

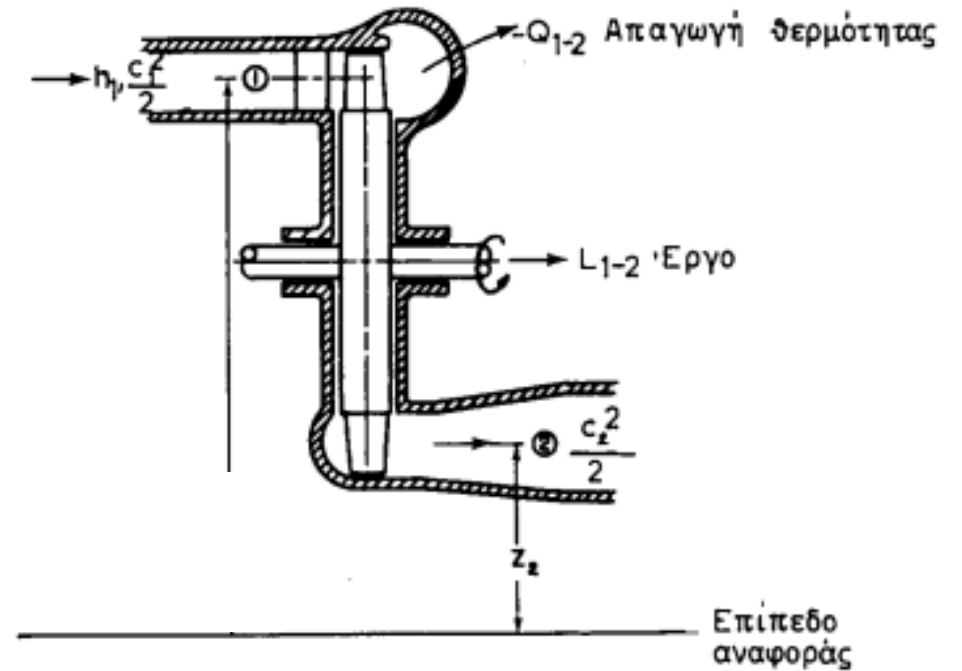
- Διαιρώντας διά την παροχή μάζας, η εξίσωση γίνεται:

$$q + h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 = h_2 + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot z_2 + L$$

- **q**: Το πηλίκο των απωλειών θερμότητας διά την παροχή μάζας που έχει διαστάσεις J/kg
- **L**: Το πηλίκο της ισχύος δια την παροχή μάζας που έχει διαστάσεις J/kg (ωφέλιμο έργο)

- Σε σχέση με τις ενθαλπίες οι όροι της κινητικής και δυναμικής ενέργειας είναι αμελητέοι, οπότε απλοποιημένα:

$$q + h_1 = h_2 + L$$



Σχ. 11.4.  
Εφαρμογή της εξίσωσης ενέργειας σε απλό στρόβιλο μιας σειράς πτερυγίων.

Δηλαδή σε σχέση με τον ιδανικό στρόβιλο, στην πραγματικότητα η διαφορά ενθαλπίας εισόδου και ενθαλπίας εξόδου είναι ίση με το έργο μείον τις απώλειες

# Εξίσωση της ορμής

- ❑ Προέρχεται από τη βασική αρχή της φυσικής, κατά την οποία η δύναμη που απαιτείται για να προκαλέσει μεταβολή της ταχύτητας ενός σώματος είναι ίση με τη μάζα επί την επιτάχυνση ( $F = m \cdot \alpha$ )
- ❑ Αν εφαρμοστεί μεταξύ δύο διατομών ενός στροβίλου και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η παροχή μάζας είναι σταθερή, τότε θα έχουμε:

$$F = \dot{m} \cdot (c_2 - c_1)$$

- ❑ Αυτή είναι η δύναμη που ασκείται πάνω στον ατμό
- ❑ Αντίθετη και ίση προς τη δύναμη αυτή θα είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο στο οποίο προσπίπτει ο ατμός

$$F = -R = \dot{m} \cdot (c_1 - c_2)$$

## Εφαρμογή 1

Σε εγκατάσταση ατμοστροβίλου η παροχή ατμού που εισέρχεται στο συμπυκνωτή (εξάτμιση) είναι ίση με 6.300 kg/h και η πίεση στο συμπυκνωτή είναι 0,08 bar. Με τι ταχύτητα εισέρχεται ο ατμός στο συμπυκνωτή, αν η διατομή του σωλήνα στο σημείο αυτό είναι 0,6m<sup>2</sup>. Υποτίθεται ότι ο ατμός εισέρχεται στο συμπυκνωτή σε κατάσταση κορεσμού.

### ΛΥΣΗ

Θα πρέπει να εφαρμόσουμε την εξίσωση της συνέχειας:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{c}{v} \quad \text{Από αυτήν προκύπτει ότι η ταχύτητα είναι:} \quad c = \frac{\dot{m} \cdot v}{A}$$

Γνωρίζουμε την παροχή μάζας καθώς και τη διατομή. Χρειάζεται ακόμη να προσδιορίσουμε τον ειδικό όγκο. Υποθέτουμε ότι στην είσοδο του συμπυκνωτή εισέρχεται κορεσμένος ατμός. Έτσι, από τον Πίνακα Γ2 του παραρτήματος, για πίεση 0,08 bar, προκύπτει ότι ο ειδικός όγκος είναι περίπου 18 m<sup>3</sup>/kg.

Αντικαθιστώντας τα αριθμητικά δεδομένα στην εξίσωση, προκύπτει ότι η ταχύτητα του ατμού είναι

$$c = 52,5 \text{ m/s}$$

## Εφαρμογή 2

Το ακροφύσιο ενός σωλήνα νερού έχει διάμετρο εισόδου 7,6 cm και διάμετρο εξόδου 3 cm. Το νερό εισέρχεται στο ακροφύσιο με ταχύτητα 3,3 m/s. Προσδιορίστε τη δύναμη που ασκείται στο ακροφύσιο λόγω της μεταβολής της ταχύτητας του νερού.

### ΛΥΣΗ

Εφαρμόζουμε, κατ' αρχάς, την εξίσωση της συνέχειας για να προσδιορίσουμε την ταχύτητα εξόδου. Ο ειδικός όγκος του νερού είναι σταθερός και έτσι η εξίσωση απλοποιείται ως εξής:

$$A_1 \cdot c_1 = A_2 \cdot c_2$$

Αντικαθιστώντας τα αριθμητικά δεδομένα στην εξίσωση, προκύπτει ότι η ταχύτητα του νερού στην έξοδο είναι  $c_2 = 21,2 \text{ m/s}$

Επειδή δεν αλλάζει η διεύθυνση του ρευστού, η δύναμη που ασκείται στο ακροφύσιο προσδιορίζεται από τη μεταβολή της ταχύτητας. Δηλαδή είναι:

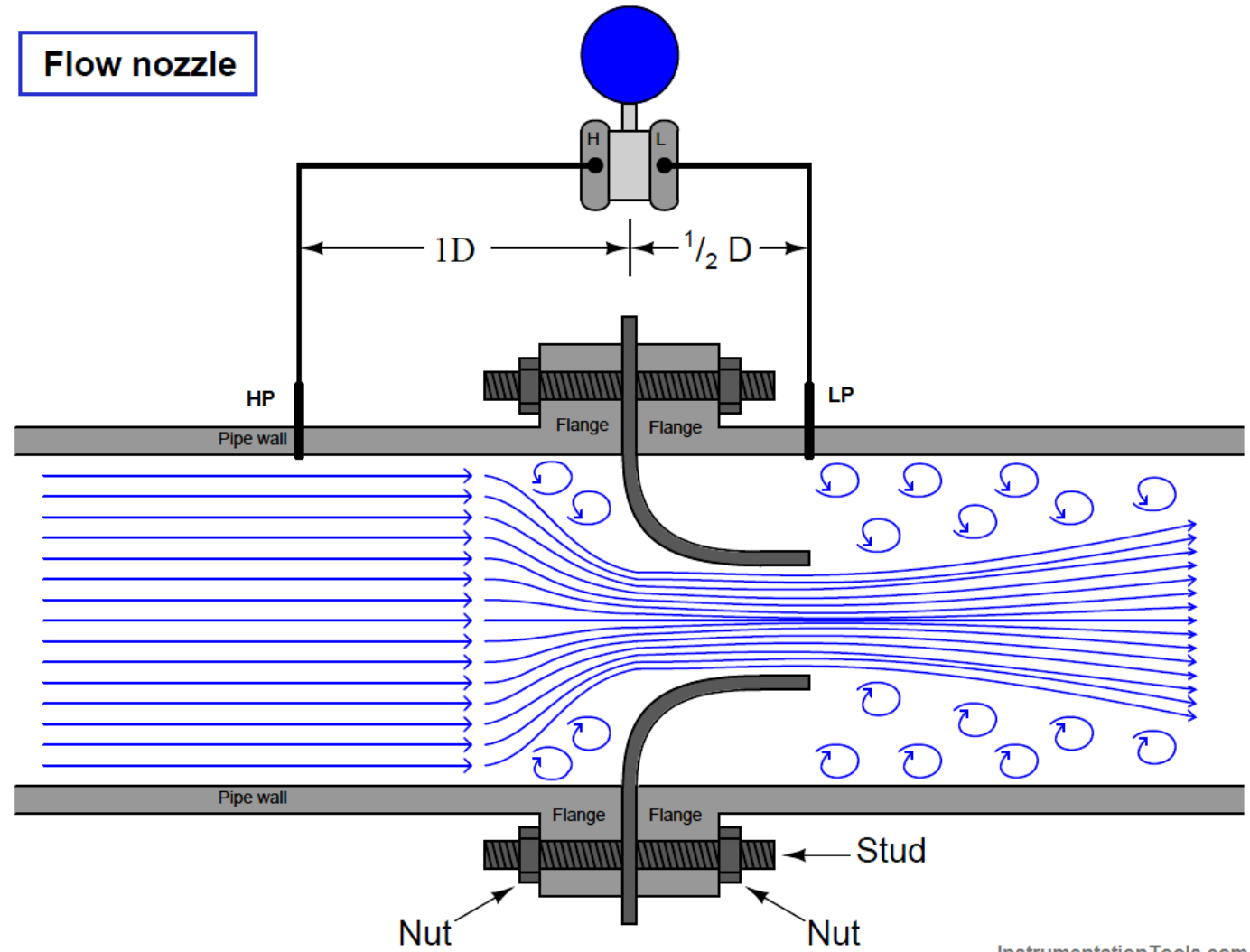
$$R = \dot{m} \cdot (c_1 - c_2)$$

Η παροχή μάζας προκύπτει από την παροχή όγκου διαιρώντας διά τον ειδικό όγκο (πυκνότητα) που για το νερό είναι  $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Με βάση τα αριθμητικά δεδομένα προκύπτει ότι η παροχή μάζας είναι περίπου  $15 \text{ kg/s}$ .

Έτσι, τελικά, η δύναμη είναι  $R = -268 \text{ N}$  και έχει διεύθυνση αντίθετη της ροής



ΡΟΗ ΣΕ  
ΠΡΟΦΥΣΙΑ



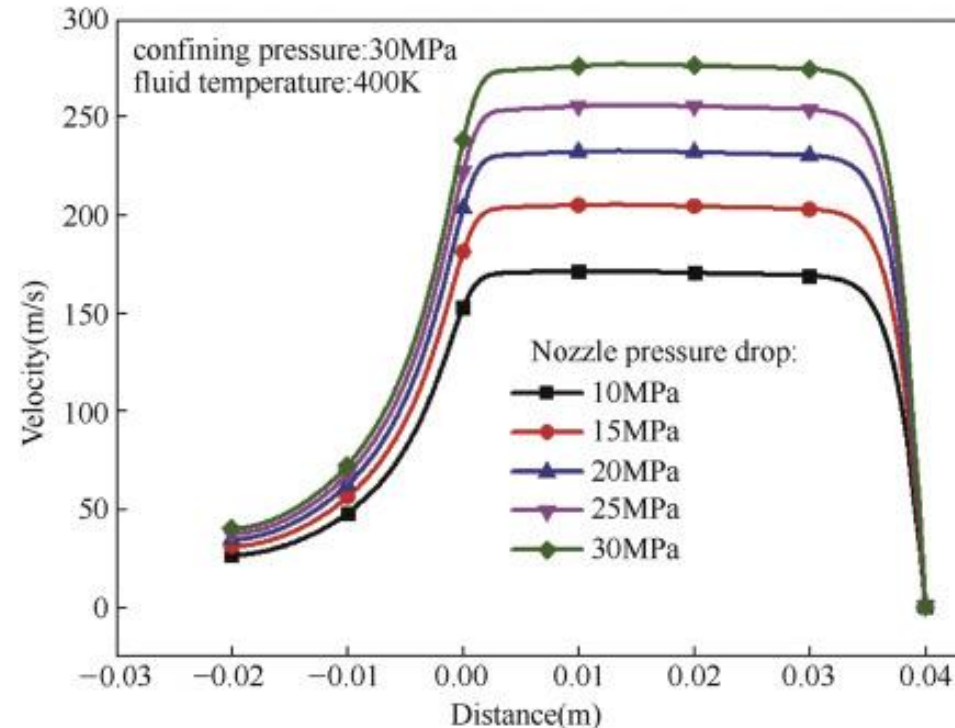
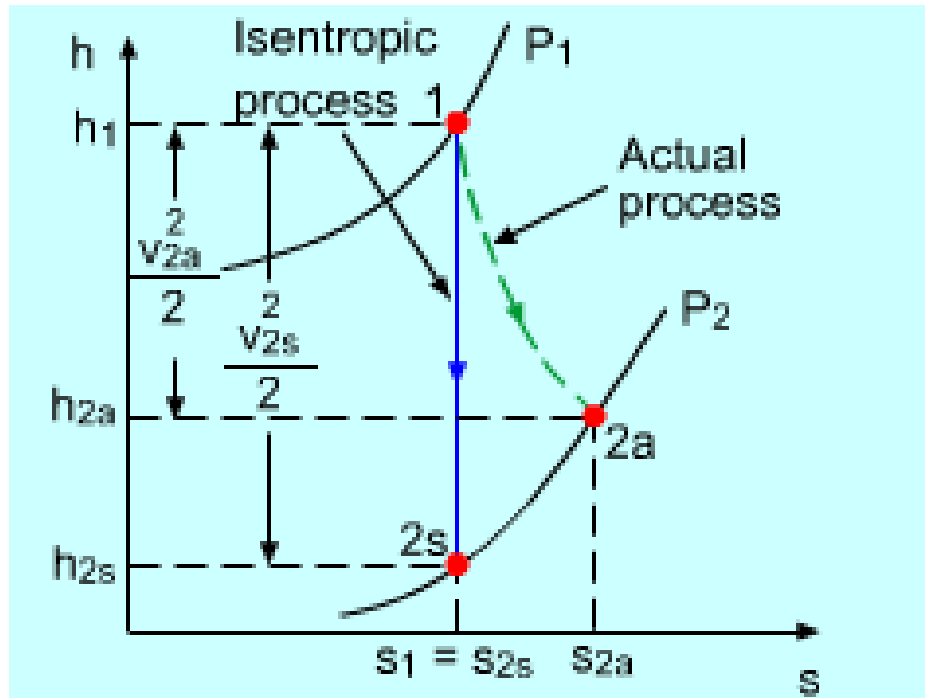
# Γενικώς περί προφυσίων



- ❑ Τα προφύσια ή ακροφύσια είναι διατάξεις με τις οποίες πετυχαίνουμε επιτάχυνση ή επιβράδυνση της ροής του ρευστού.
- ❑ Πρόκειται για αγωγούς με κατάλληλη αυξομείωση της διατομής, ώστε κατά μήκος τους η ροή να εκτονώνεται ή να συμπιέζεται – προφύσια εκτονώσεως ή συμπιέσεως
- ❑ Κυρίως, όμως, διακρίνονται ως **προφύσια επιταχύνσεως ή επιβραδύνσεως** αναλόγως της μεταβολής που προκαλούν στην ταχύτητα
- ❑ Στους στροβίλους μας ενδιαφέρουν τα προφύσια επιταχύνσεως
- ❑ Επίσης, τα προφύσια χρησιμεύουν **για να κατευθύνουν τη φλέβα του ατμού**, έτσι ώστε να προσβάλλει τα πτερύγια υπό κατάλληλη γωνία.

# Προφύσιο: αρχή λειτουργίας

- Η ροή του ατμού μέσα στο προφύσιο θεωρείται ως αδιαβατική (ισεντροπική) εκτόνωση, ιδανικά.
- Ο ατμός εισέρχεται στο προφύσιο με μικρή ταχύτητα και υψηλή πίεση. Η αρχική ταχύτητα ενίοτε παραλείπεται στους υπολογισμούς, διότι είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ταχύτητα εξόδου.
- Κατά την εκτόνωση του ατμού μέσα στο προφύσιο η ταχύτητα αυξάνεται, ενώ ελαττώνεται η πίεση.
- Η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική χωρίς να παράγεται έργο μέσα στο προφύσιο.



# Ταχύτητα ήχου

- ❑ Στην περίπτωση του ατμού ο ειδικός όγκος δεν είναι σταθερός και αυτό καθιστά δύσκολους τους υπολογισμούς της ταχύτητας
- ❑ Για διευκόλυνση χρησιμοποιείται η έννοια της ταχύτητας του ήχου ( $a$ ) και η σχέση της ταχύτητας του ατμού προς αυτήν.
- ❑ Η ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος (ή κύματος πύεσεως) δίνεται από τον τύπο:

$$a = \sqrt{k \cdot \frac{\bar{R}}{\mu} \cdot T}$$

- $k$ : ο εκθέτης της ισεντροπικής μεταβολής (σταθερή ποσότητα)
- $R$ : η παγκόσμια σταθερά των αερίων (σταθερή ποσότητα)
- $\mu$ : το μοριακό βάρος
- $T$ : η θερμοκρασία

Στους 0° C, η ταχύτητα του ήχου είναι:

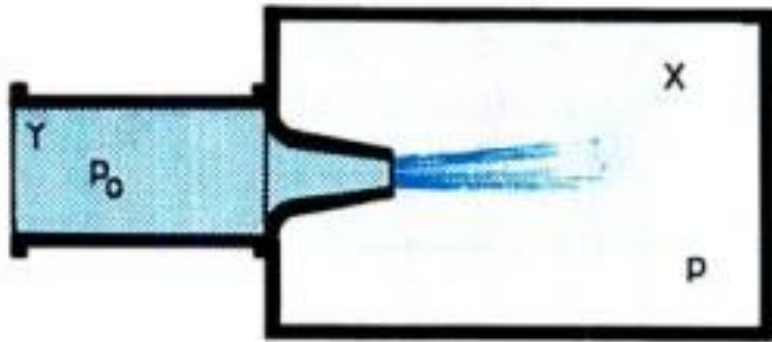
- ✓ Για τον **αέρα 330 m/s**
- ✓ Για τον **ατμό 450 m/s**

# Αριθμός Mach

- Ορίζεται ο αδιάστατος αριθμός Mach ως εξής:

$$M = \frac{c}{a}$$

- Δηλαδή είναι ο λόγος της ταχύτητας της ροής προς την ταχύτητα του ήχου στο ίδιο σημείο του ρευστού
- Με βάση τον αριθμό Mach οι ροές χαρακτηρίζονται:
  - ✓ Υποηχητικές,  $M < 1$
  - ✓ Ηχητικές,  $M = 1$
  - ✓ Υπερηχητικές,  $M > 1$



## Συγκλίνον ακροφύσιο – κρίσιμη πίεση

Έστω ότι έχουμε ένα συγκλίνον ακροφύσιο μέσα από το οποίο διέρχεται ατμός με πίεση  $p_0$  προς ένα χώρο που επικρατεί πίεση  $p$ .

- Εάν  $p_0 = p$  δεν δημιουργείται ροή
- Εάν  $p < p_0$  δημιουργείται ροή με συγκεκριμένη ταχύτητα
- Εάν παραμείνει σταθερή η  $p_0$  και μειώνεται η  $p$ , σε κάθε ελάττωση της  $p$ , αντιστοιχεί και κάποια αύξηση της ταχύτητας ροής ( $c$ )
- Υπάρχει ένα όριο, που **αν η  $p$  μειωθεί πέρα από αυτό, δεν παρατηρείται επιπλέον αύξηση της ταχύτητας**. Αυτό το όριο είναι ένα κρίσιμο σημείο της ροής και η πίεση που αντιστοιχεί σε αυτό λέγεται **κρίσιμη πίεση ( $p_k$ )**. Η ταχύτητα που αντιστοιχεί είναι η μέγιστη ταχύτητα που λέγεται **κρίσιμη ταχύτητα ( $c_k$ )**.
- Η σχέση  $p_k/p_0$  λέγεται **κρίσιμη σχέση** και αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ρευστών

# Συγκλίνον ακροφύσιο – εξισώσεις

Τύπος υπολογισμού κρίσιμης πίεσης:

$$p_{κ} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot p_o$$

Τύπος υπολογισμού κρίσιμης ταχύτητας:

$$c_{κ} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot p_o \cdot v_o}$$

- $k$ : ο εκθέτης της ισεντροπικής μεταβολής
- $v_o$ : ο ειδικός όγκος του ρευστού στην είσοδο του ακροφυσίου

Ο εκθέτης της ισεντροπικής μεταβολής έχει τις ακόλουθες τιμές:

- ✓ **1,3** για υπέρθερμο ατμό
- ✓ **1,135** για ξηρό κορεσμένο
- ✓ **1,035 + 0,1\*x** για τον υγρό ατμό σε συνάρτηση με το βαθμό ξηρότητας

## Συγκλίνον ακροφύσιο – συμπεράσματα

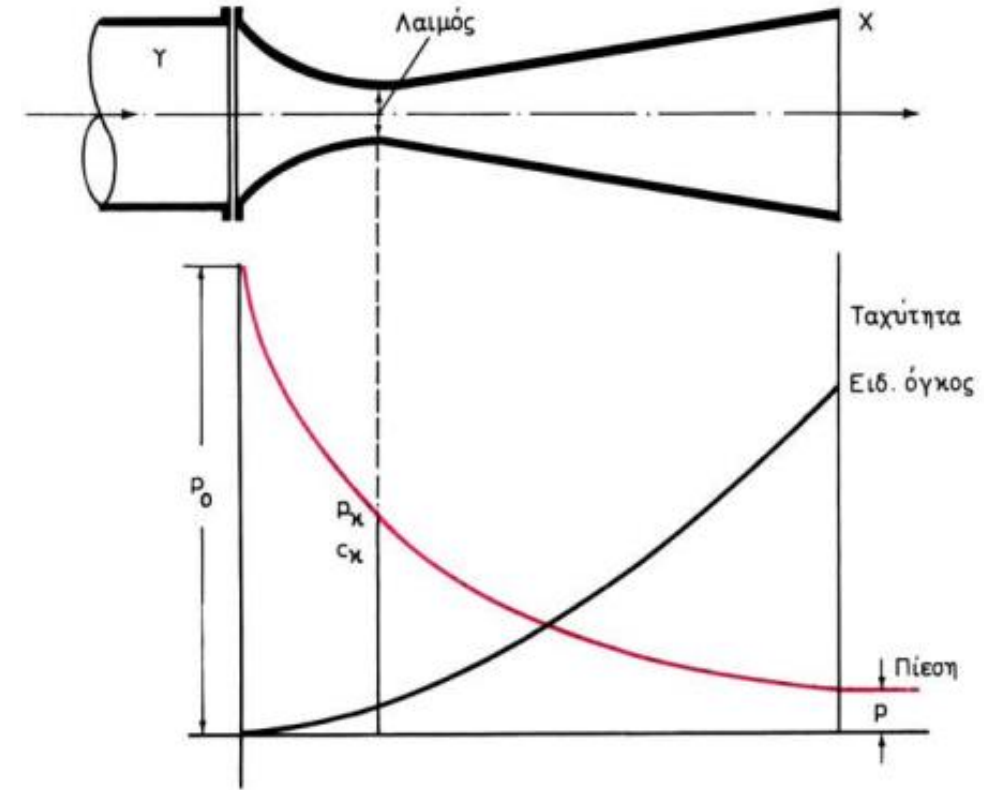
- ❑ Για ξηρό ατμό η κρίσιμη πίεση είναι  $p_k = 0,577 * p_o$
- ❑ Για υπέρθερμο ατμό η κρίσιμη πίεση είναι  $p_k = 0,546 * p_o$
- ❑ Η ταχύτητα που επιτυγχάνεται στο συγκλίνον ακροφύσιο όταν στην έξοδο επικρατεί κρίσιμη πίεση προκύπτει περίπου ίση με την ταχύτητα του ήχου στον ατμό

*Συνεπώς, η χρήση του συγκλίνοντος προφυσίου δε μας επιτρέπει να εκμεταλλευτούμε τις υψηλές πιέσεις ατμού ώστε να πάμε σε υπερηχητικές ροές και έτσι η λειτουργία να χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση.*



# Συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο

- ❑ Με σκοπό την επίτευξη υπερηχητικών ταχυτήτων, έγιναν πολλοί πειραματισμοί ώστε να κατασκευαστεί το κατάλληλο ακροφύσιο
- ❑ Το 1890 ο Σουηδός μηχανικός **de Laval** εισήγαγε το **συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο που λέγεται και εκτονωτικό** και έτσι επιτεύχθηκε υπερηχητική ταχύτητα ατμού, πάνω από 800 m/s.
- ❑ Στο λαιμό του ακροφυσίου η πίεση γίνεται ίση με την κρίσιμη
- ❑ **Αν η πίεση στην έξοδο είναι μικρότερη της κρίσιμης, τότε η ταχύτητα συνεχίζει να αυξάνει πέρα από την κρίσιμη στο αποκλίνον τμήμα**
- ❑ Η σχεδίαση του ακροφυσίου γίνεται έτσι, ώστε η πίεση του ατμού στην έξοδο του ακροφυσίου να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την πίεση στο χώρο που καταλήγει ο ατμός, ώστε να υπάρχει ροή.



# Σύνοψη για τη ροή των ασυμπίεστων ρευστών

- Από την εξίσωση της συνέχειας, προκύπτει ότι η ελάττωση της διατομής προκαλεί αύξηση της ταχύτητας

$$\dot{m} = \text{σταθερή}$$

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{\rho}{\nu}$$

- Με βάση το νόμο του Bernoulli (σταθερό το άθροισμα δυναμικής και κινητικής ενέργειας) κάθε μεταβολή της ταχύτητας προκαλεί αντίστροφη μεταβολή της πίεσης. Έτσι, αύξηση της ταχύτητας σημαίνει μείωση της πίεσης.
- Έτσι, η μείωση της διατομής π.χ. σε ένα συγκλίνον ακροφύσιο οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας
- Τα παραπάνω ισχύουν για τα ασυμπίεστα ρευστά

# Σύνοψη για τη ροή συμπιεστών ρευστών

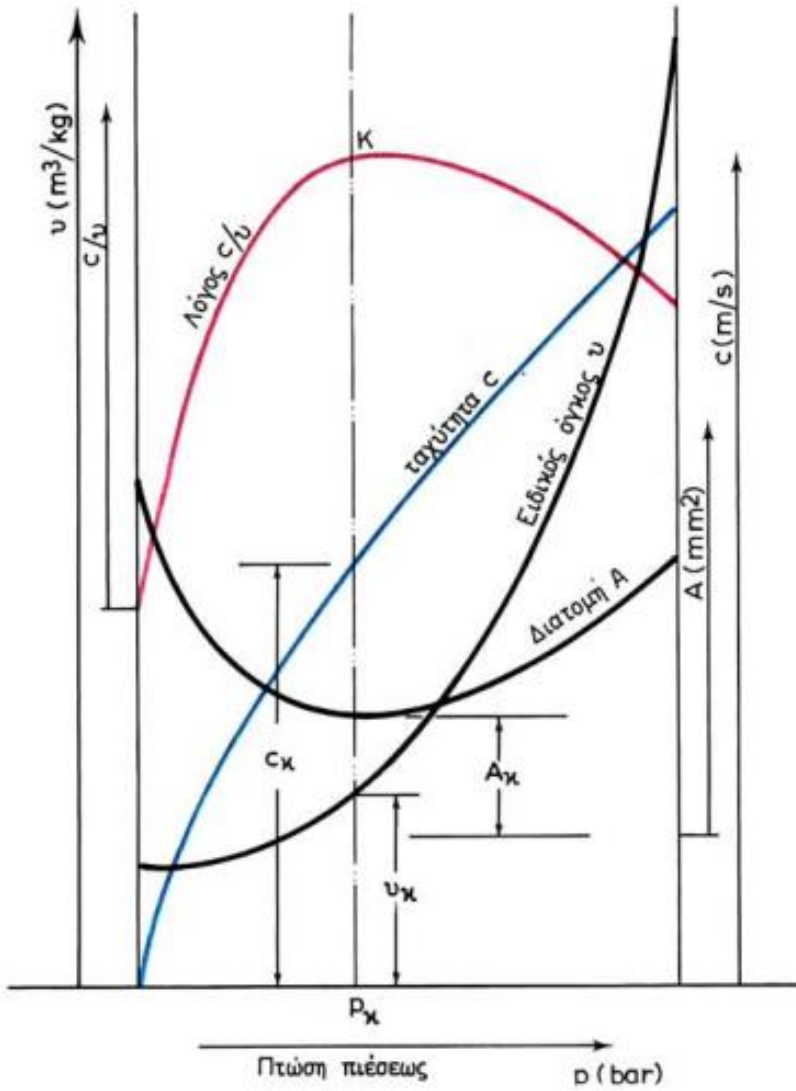
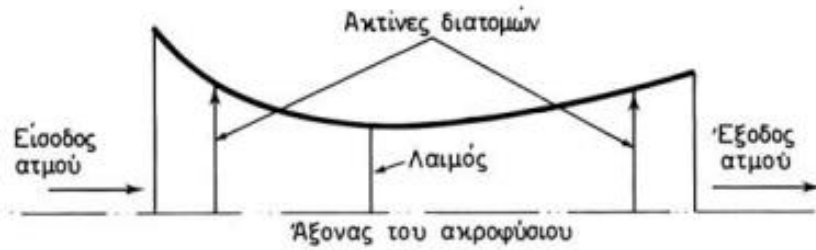
- ❑ Ο ατμός ανήκει στα συμπιεστά ρευστά, που έχουν ως χαρακτηριστικό το ότι η ελάττωση της πίεσης (εκτόνωση) οδηγεί σε αύξηση του ειδικού όγκου (πυκνότητας).
- ❑ Εξετάζοντας την εξίσωση της συνέχειας, μπορούμε να πούμε πως όταν αυξάνεται ο λόγος  $c/v$ , τότε η διατομή ελαττώνεται, ενώ όταν μειώνεται ο λόγος  $c/v$ , τότε η διατομή αυξάνεται.

$$\dot{m} = \text{σταθερή}$$

$$\dot{m} = A \cdot \frac{c}{v}$$

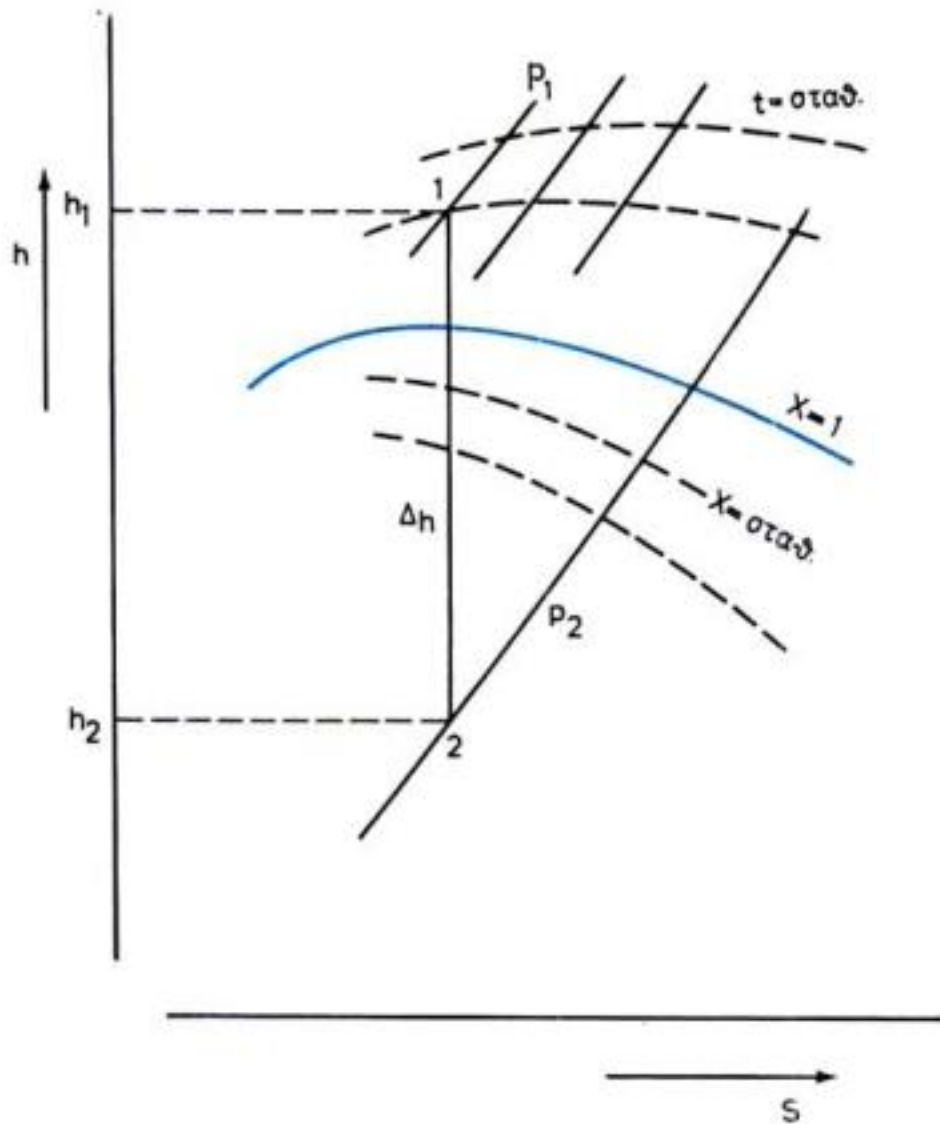
- ❑ *Όταν ο ειδικός όγκος μεγαλώνει λιγότερο από όσο μεγαλώνει η ταχύτητα, τότε ο λόγος  $c/v$  αυξάνεται και η διατομή γίνεται μικρότερη*
- ❑ *Όταν ο ειδικός όγκος μεγαλώνει περισσότερο από όσο μεγαλώνει η ταχύτητα, τότε ο λόγος  $c/v$  μειώνεται και η διατομή γίνεται μεγαλύτερη.*

# Διάγραμμα καθορισμού σχήματος ακροφυσίου



- ❑ Η καμπύλη  $c/v$  παρουσιάζει μέγιστο, στο σημείο K, στο οποίο αντιστοιχεί η ελάχιστη διατομή του ακροφυσίου (λαιμός) και η οποία είναι η κρίσιμη διατομή
- ❑ Στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου η αύξηση της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη από την αύξηση του όγκου και παρά τη στένωση της διατομής, υπάρχει ροή ατμού.
- ❑ Στο αποκλίνον τμήμα, η αύξηση του όγκου είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της ταχύτητας και απαιτείται αύξηση της διατομής για να υπάρξει ροή.
- ❑ Το συγκλίνον ακροφύσιο χρησιμοποιείται για τον ατμό μόνο όταν αυξάνει ο λόγος  $c/v$ . Προσθέτοντας το αποκλίνον τμήμα, επιτρέπουμε την αύξηση του όγκου του ατμού, δηλαδή μεγαλύτερη εκτόνωση και, συνεπώς, μεγαλύτερη ταχύτητα ατμού που είναι και το ζητούμενο.

# Ισεντροπική ροή ατμού σε ακροφύσιο



- ❑ Έστω ιδανικό συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο στο οποίο δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων, δεν υπάρχουν τριβές μεταξύ ατμού και τοιχωμάτων ούτε τριβές μεταξύ των στρωμάτων ατμού
- ❑ Τότε η ροή διαμέσω αυτού θα είναι ισεντροπική και θα παριστάνεται με την ευθεία 1-2 στο διάγραμμα  $h-s$
- ❑ Στην ιδανική αυτή περίπτωση, η κινητική ενέργεια του ατμού στην έξοδο του ακροφυσίου αναπτύσσεται μέσω κατανάλωσης της θερμικής ενέργειάς του
- ❑ Δηλαδή, η αύξηση της κινητικής ενέργειας του ατμού είναι ίση με τη διαφορά ενθαλπίας  $\Delta h$ .

# Ισεντροπική ροή - υπολογισμοί

- Βασιζόμαστε στην αρχή διατήρησης της ενέργειας, στην οποία οι απώλειες θερμότητας είναι μηδενικές (ισεντροπική ροή) και το έργο επίσης μηδενικό (μέσα στα προφύσια δεν παράγεται έργο). Έτσι η εξίσωση μεταξύ εισόδου και εξόδου γράφεται:

$$0 + h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 = h_2 + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot z_2 + 0$$

- Θεωρούμε ότι η είσοδος και η έξοδος του ατμού γίνεται στο ίδιο επίπεδο (αλλά και να μην ίσχυε αυτό οι διαφορές στις στάθμες θα ήταν πολύ μικρή σε σχέση με τους υπόλοιπους όρους της εξίσωσης), οπότε:

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2}$$

$$h_1 - h_2 = \Delta h = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2000}$$

J/kg

kJ/kg

# Ισεντροπική ροή - υπολογισμοί

- Με βάση τα προηγούμενα μπορεί να διατυπωθεί και η εξίσωση προσδιορισμού της ταχύτητας εξόδου (ασχολούμαστε με την περίπτωση που οι μονάδες της ενθαλπίας είναι kJ/kg)

$$c_2 = \sqrt{2000 \cdot \Delta h + c_1^2}$$

ή ισοδύναμα:

$$c_2 = 44,72 \cdot \sqrt{\Delta h + \left(\frac{c_1}{44,72}\right)^2}$$

- Η ταχύτητα στην είσοδο του ακροφυσίου είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ταχύτητα εξόδου. Έτσι, σε πρακτικούς υπολογισμούς μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι κοντά στο μηδέν. Έτσι, κατά προσέγγιση, η ταχύτητα εξόδου του ατμού από το ακροφύσιο είναι:

$$c_2 = \sqrt{2000 \cdot \Delta h}$$

ή ισοδύναμα:

$$c_2 = 44,72 \cdot \sqrt{\Delta h}$$

## Εφαρμογή 3

Σε τριών ακροφυσίων ατμοστροβίλου εκτονώνει υπέρθερμο ατμό, πίεσης 24 bar και θερμοκρασίας 370°C στα 14 bar. Η παροχή του ατμού είναι 8kg/s. Να βρεθεί η ταχύτητα του ατμού στην έξοδο του ακροφυσίου καθώς και επιφάνεια της διατομής εξόδου. Υποτίθεται ότι τα ακροφύσια λειτουργούν ιδανικά.

### ΛΥΣΗ

Θεωρούμε ότι η διαδικασία γίνεται χωρίς απώλειες, συνεπώς η ροή μέσα στο ακροφύσιο γίνεται ισεντροπικά. Χαράζουμε την ισεντροπική εκτόνωση στο διάγραμμα Mollier και βρίσκουμε ότι η πτώση ενθαλπίας είναι  $3190 - 3030 = 160 \text{ kJ/kg}$ .

Θεωρώντας αμελητέα την ταχύτητα εισόδου, προκύπτει ότι η ταχύτητα εξόδου είναι:

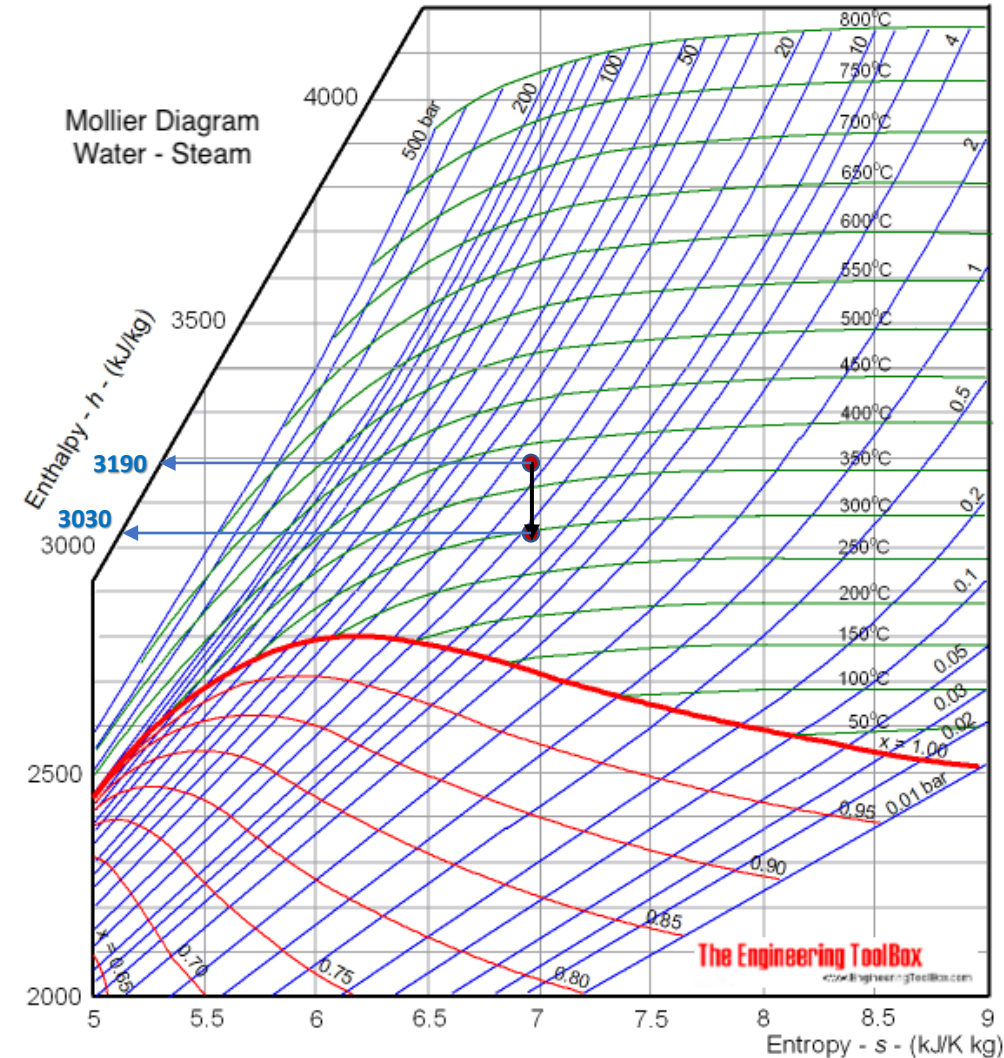
$$c_2 = 44,72 \cdot \sqrt{\Delta h} = 565,67 \text{ m/s}$$

Η διατομή βρίσκεται με βάση την εξίσωση της συνέχειας. Από τον Πίνακα Γ3 (ιδιότητες υπέρθερμου ατμού) βρίσκουμε τον ειδικό όγκο για πίεση 14 bar και θερμοκρασία 300°C, ο οποίος είναι 0,17 m<sup>3</sup>/kg.

Συνεπώς

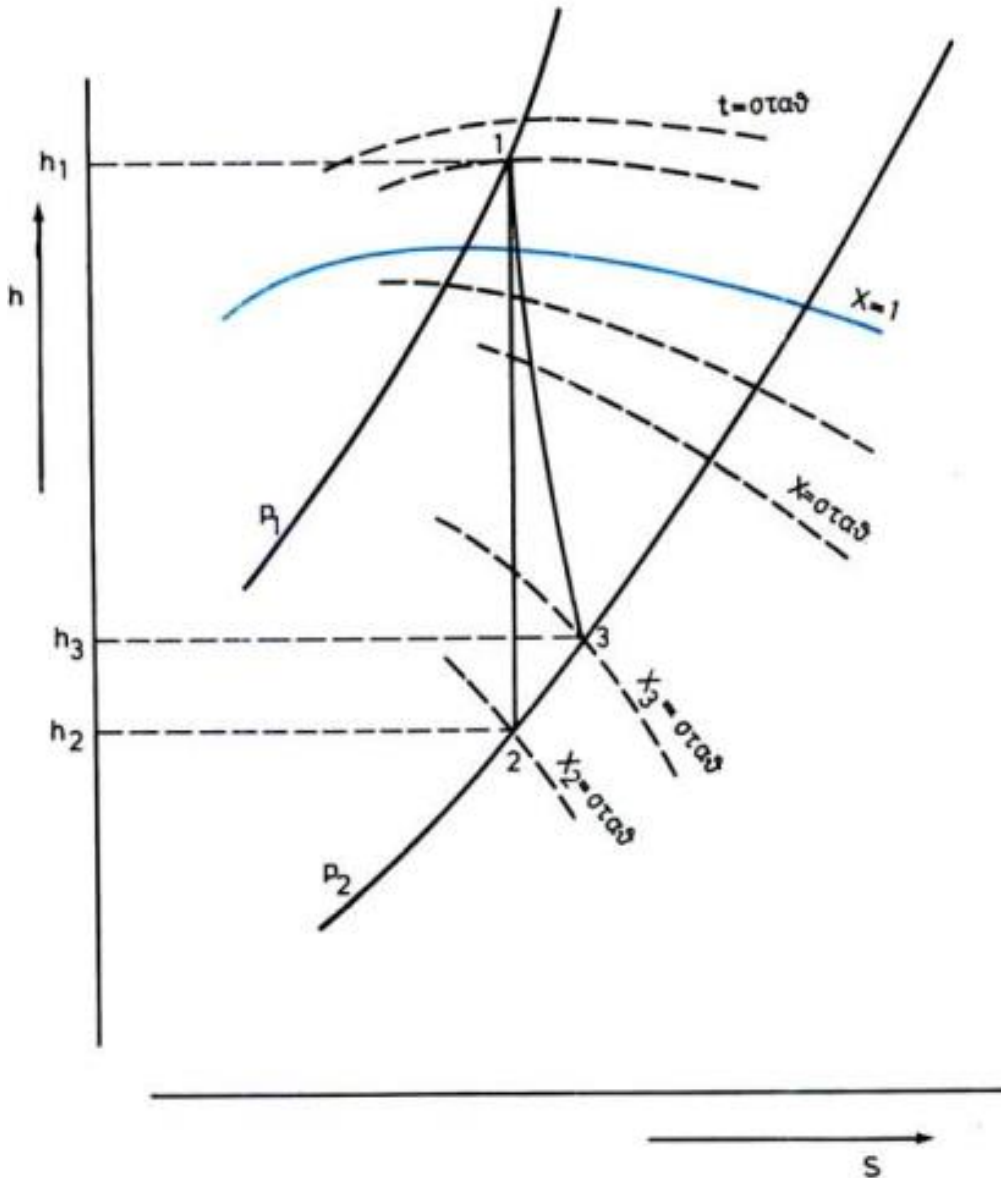
$$A_2 = \frac{\dot{m} \cdot v_2}{c_2} = 0,0024 \text{ m}^2$$

Οπότε κάθε ακροφύσιο έχει διατομή 0,0008 m<sup>2</sup>





# Πραγματική ροή ατμού σε ακροφύσιο



- Στην πραγματικότητα, η ροή ατμού στα ακροφύσια παρουσιάζει απώλειες:
- ✓ Διαφυγές θερμότητας
- ✓ Τριβές ατμού στα τοιχώματα
- ✓ Στροβιλισμοί λόγω κρούσεων στα τοιχώματα
- ✓ Εκτροπή ατμού στην έξοδο
- Η πραγματική μεταβολή είναι η 1-3 και όχι η 1-2.
- Η ταχύτητα στην έξοδο είναι μικρότερη σε σχέση με την ιδανική περίπτωση
- Η κινητική ενέργεια που χάνεται λόγω απωλειών μετατρέπεται σε θερμότητα
- Ουσιαστικά, στο ακροφύσιο ο ατμός αναθερμαίνεται

# Συντελεστής ταχύτητας

- Έστω ότι η **πραγματική ταχύτητα** του ατμού στην έξοδο είναι  $c_{\pi}$ , μικρότερη της  $c_2$  που αντιστοιχεί στην ισεντροπική μεταβολή (ιδανική ταχύτητα).
- Ορίζεται ο **λόγος της πραγματικής ταχύτητας στην έξοδο προς την ιδανική ως συντελεστής ταχύτητας**

$$\varphi = \frac{c_{\pi}}{c_2}$$

- Συνήθως, οι τιμές του  $\varphi$  κυμαίνονται από 0,93 έως 0,97
- Λαμβάνοντας υπ' όψιν τους τύπους υπολογισμού της ταχύτητας στην έξοδο για την ισεντροπική ροή και θεωρώντας ότι  $\Delta h$  είναι η πτώση της ενθαλπίας κατά την ισεντροπική ροή, θα έχουμε:

$$c_{\pi} = 44,72 \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta h}$$

# Βαθμός απόδοσης ακροφυσίου

- Ορίζεται ως **βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου** ο λόγος της **πραγματικής κινητικής ενέργειας στην έξοδο** ως προς την **ιδανική**.

$$n_{\varphi} = \frac{\frac{c_{\pi}^2}{2}}{\frac{c_2^2}{2}} = \varphi^2$$

- Οπότε οι τιμές του  $n_{\varphi}$  κυμαίνονται από  $(0,93)^2$  έως  $(0,97)^2$ , δηλαδή από 0,865 έως 0,94
- Ο **συντελεστής απωλειών** ορίζεται ως:

$$\lambda = 1 - n_{\varphi}$$

# Βαθμός απόδοσης – περαιτέρω υπολογισμοί

- Στο διάγραμμα η διαφορά  $h_3 - h_2$  παριστάνει το μέτρο των απωλειών του ακροφυσίου. Έτσι, εναλλακτικά, ο βαθμός απόδοσης μπορεί να προσδιοριστεί από τις ενθαλπίες ως εξής:

$$n_\varphi = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_2}$$

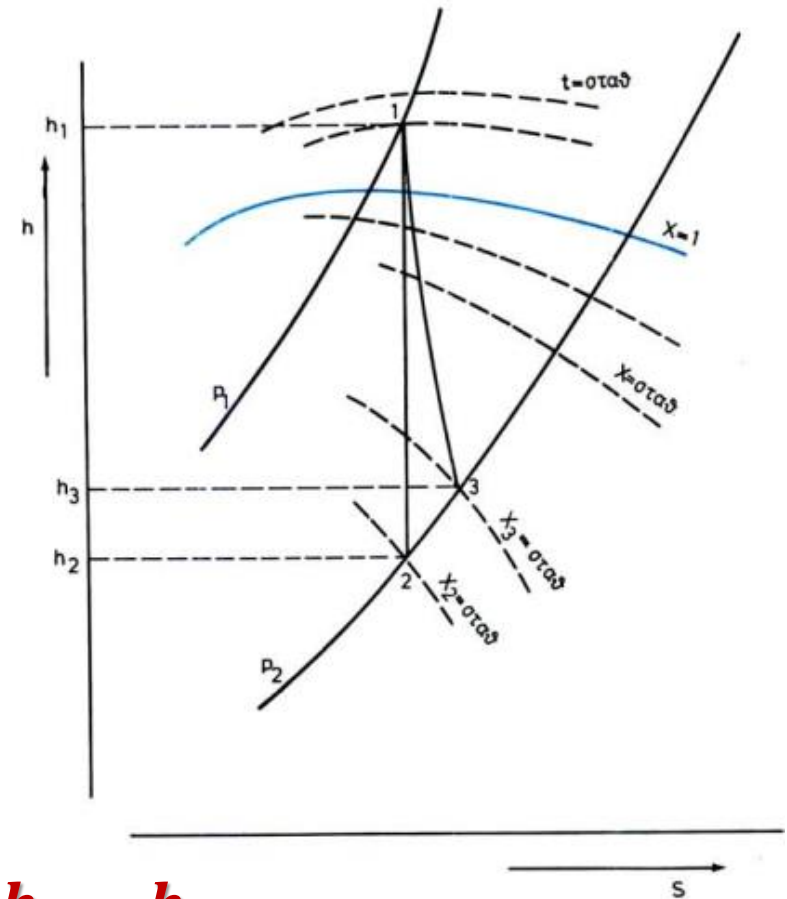
- Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$(h_1 - h_2) \cdot n_\varphi = h_1 - h_3 \quad \text{ή εναλλακτικά:} \quad (h_1 - h_2) \cdot \varphi^2 = h_1 - h_3$$

- Όμως, ισχύει ότι:  $c_\pi = 44,72 \cdot \varphi \cdot \sqrt{\Delta h}$  που γράφεται ισοδύναμα:  $c_\pi = 44,72 \cdot \sqrt{\varphi^2 \cdot \Delta h}$

- Έτσι, τελικά προκύπτει η πραγματική ταχύτητα συναρτήσει της πραγματικής διαφοράς ενθαλπίας:

$$c_\pi = 44,72 \cdot \sqrt{h_1 - h_3}$$



## Εφαρμογή 4

Σε ατμοστρόβιλο ο ατμός εισέρχεται σε συγκλίνον – αποκλίνον ακροφύσιο που θεωρείται ιδανικό, με πίεση 35bar και θερμοκρασία 420°C. Στην έξοδο του ακροφυσίου η πίεση του ατμού είναι 0,15bar. Προσδιορίστε:

A) την κρίσιμη πίεση

B) την κατάσταση του ατμού στο λαιμό του ακροφυσίου

Γ) την κρίσιμη ταχύτητα

Δ) την ταχύτητα εξόδου του ατμού από το ακροφύσιο

E) την κατάσταση του ατμού στην έξοδο από το ακροφύσιο

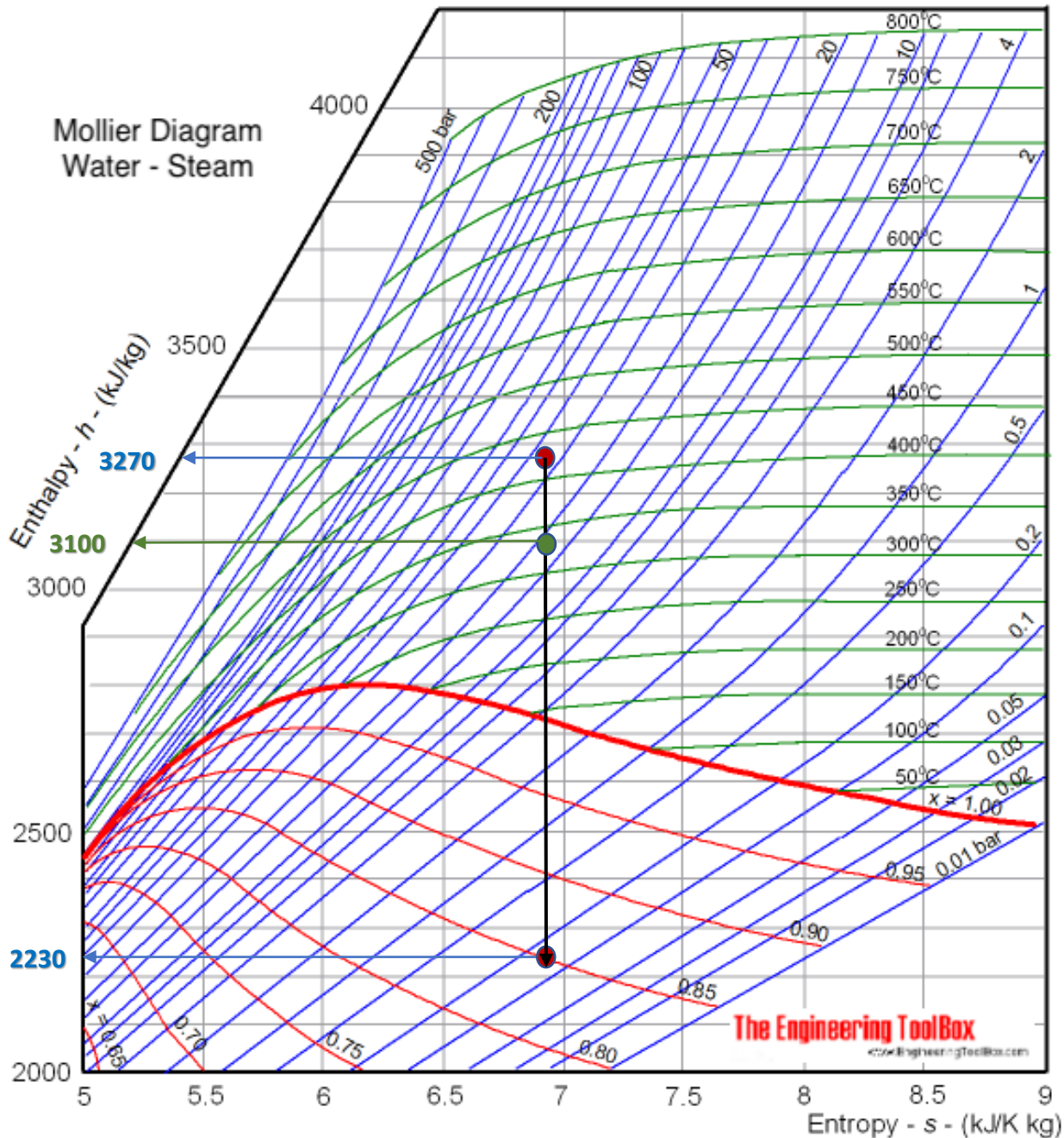
ΣΤ) την πραγματική ταχύτητα εξόδου από το ακροφύσιο, αν ο βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου είναι 94% καθώς και την κατάσταση του ατμού

### ΛΥΣΗ

A) Ο ατμός στην είσοδο είναι υπέρθερμος (βλέπε επόμενη διαφάνεια)

Συνεπώς, η κρίσιμη πίεση θα είναι:

$$p_k = 0,546 * p_o = 0,546 * 35 = 19,11 \text{ bar}$$



Β) Στο διάγραμμα έχει χαραχθεί η ισεντροπική μεταβολή μεταξύ εισόδου και εξόδου του ακροφυσίου.

Για να βρούμε την κατάσταση του ατμού στο λαιμό του ακροφυσίου, σκεφτόμαστε τα εξής:

- Στο λαιμό επικρατεί κρίσιμη πίεση
- Το σημείο που αντιστοιχεί στο λαιμό βρίσκεται πάνω στην ευθεία της ισεντροπικής μεταβολής
- Έχοντας υπολογίσει ότι η κρίσιμη πίεση είναι 19,11 bar, το σημείο που αντιστοιχεί στο λαιμό είναι το σημείο τομής της ευθείας της ισεντροπικής μεταβολής με την καμπύλη των 19 bar.

Το πράσινο σημείο αντιστοιχεί στην κατάσταση του ατμού στο λαιμό:

- ✓ Θερμοκρασία 330°C
- ✓ Υπέρθερμος
- ✓ Ενθαλπία 3100 kJ/kg

Γ) Η κρίσιμη ταχύτητα μπορεί να προκύψει από τον τύπο προσδιορισμού της ταχύτητας εξόδου. Εάν εφαρμοστεί η αρχή διατήρησης της ενέργειας μεταξύ εισόδου και λαιμού, τότε ο τύπος θα είναι:

$$c_k = 44,72 \cdot \sqrt{(h_1 - h_k)}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των ενθαλπιών, προκύπτει ότι  $c_k = 583 \text{ m/s}$

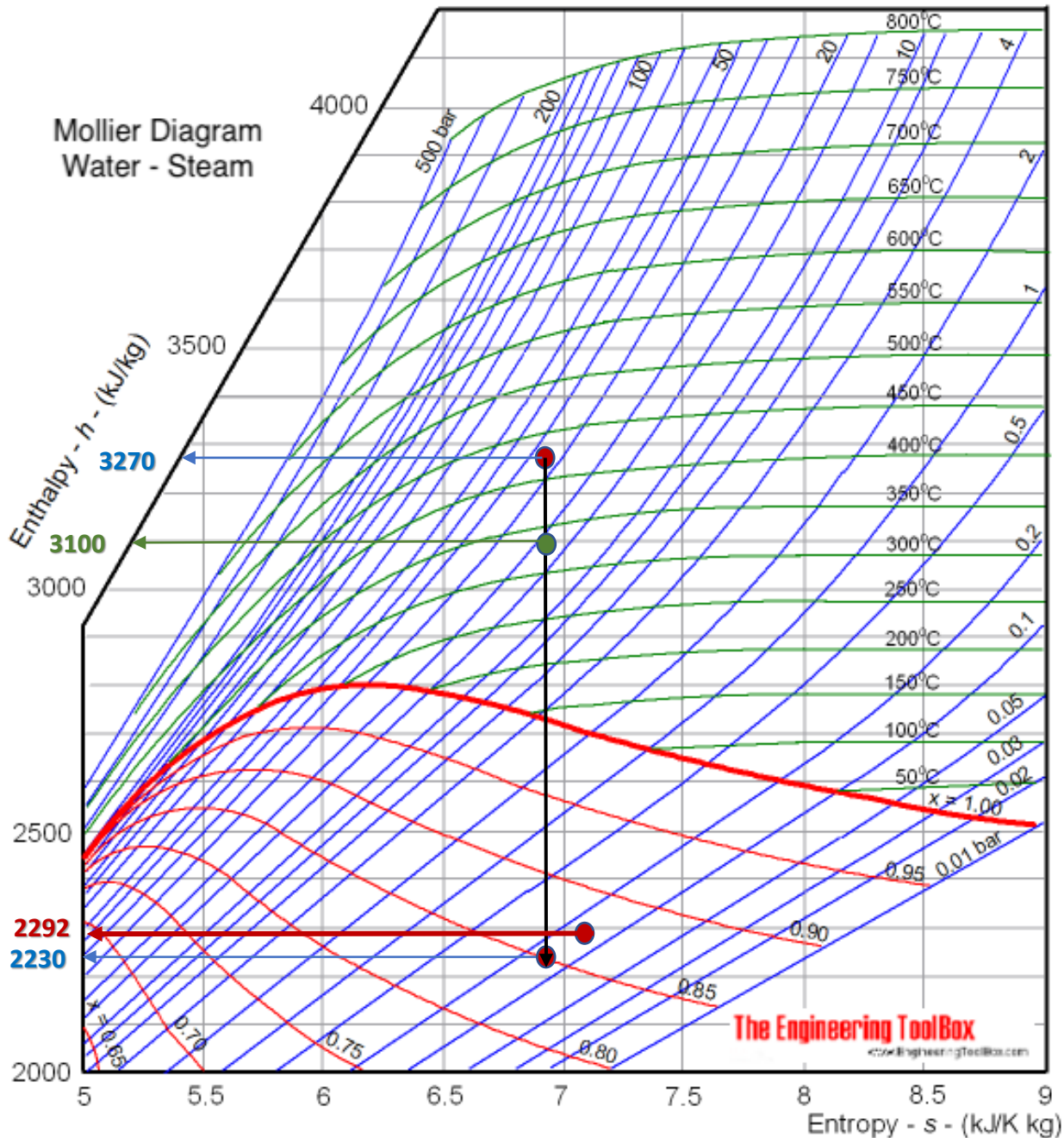
Δ) Με τον ίδιο τύπο υπολογίζουμε την ταχύτητα εξόδου από το ακροφύσιο

$$c_2 = 44,72 \cdot \sqrt{(h_1 - h_2)}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των ενθαλπιών, προκύπτει ότι  $c_2 = 1.442 \text{ m/s}$

Ε) Με βάση το διάγραμμα της προηγούμενης διαφάνειας, στην έξοδο η κατάσταση του ατμού έχει ως εξής:

- ✓ Πίεση 0,15 bar
- ✓ Υγρός ατμός
- ✓ Βαθμός ξηρότητας  $x=0,85$



ΣΤ) Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως εξής:

$$n_{\varphi} = \varphi^2 = \left( \frac{c_{\pi}}{c_2} \right)^2$$

Συνεπώς είναι:

$$c_{\pi} = c_2 \cdot \sqrt{n_{\varphi}}$$

Οπότε η πραγματική ταχύτητα είναι

$$c_{\pi} = 1.442 \cdot 0,97 = 1.399 \text{ m/sec}$$

Για να βρούμε το σημείο που αντιστοιχεί στην έξοδο του πραγματικού ακροφυσίου στο διάγραμμα, μπορούμε να αξιοποιήσουμε την εξίσωση:

$$n_{\varphi} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_2} \rightarrow h_3 = h_1 - n_{\varphi} \cdot (h_1 - h_2)$$

Οπότε η εντροπία στο σημείο που αντιστοιχεί στην έξοδο του πραγματικού ακροφυσίου είναι  $h_3 = 2292 \text{ kJ/kg}$

Το σημείο αυτό θα έχει πίεση ίδια με την πίεση εξόδου του ιδανικού, δηλαδή 0,15 bar. Η ξηρότητα προκύπτει 0,87.