



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής &
Βελτιστοποίησης

ΘΕΡΜΙΚΕΣ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ
(5^ο Εξάμηνο Σχολής Μηχ.Μηχ. ΕΜΠ)

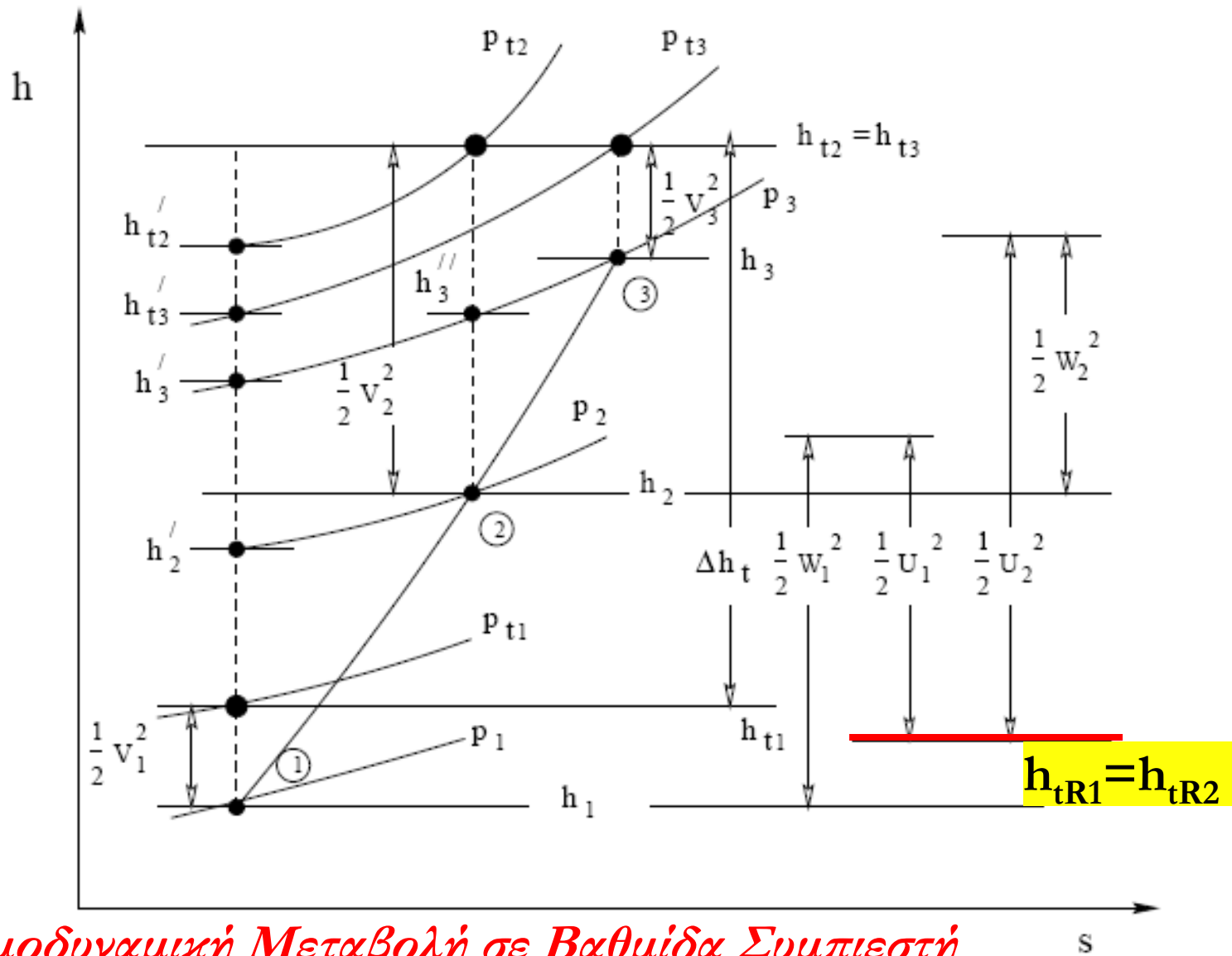
*Η ΠΟΛΥΤΡΟΠΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ
ΣΤΟ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ & ΣΤΡΟΒΙΛΟ*

Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

kgianna@mail.ntua.gr

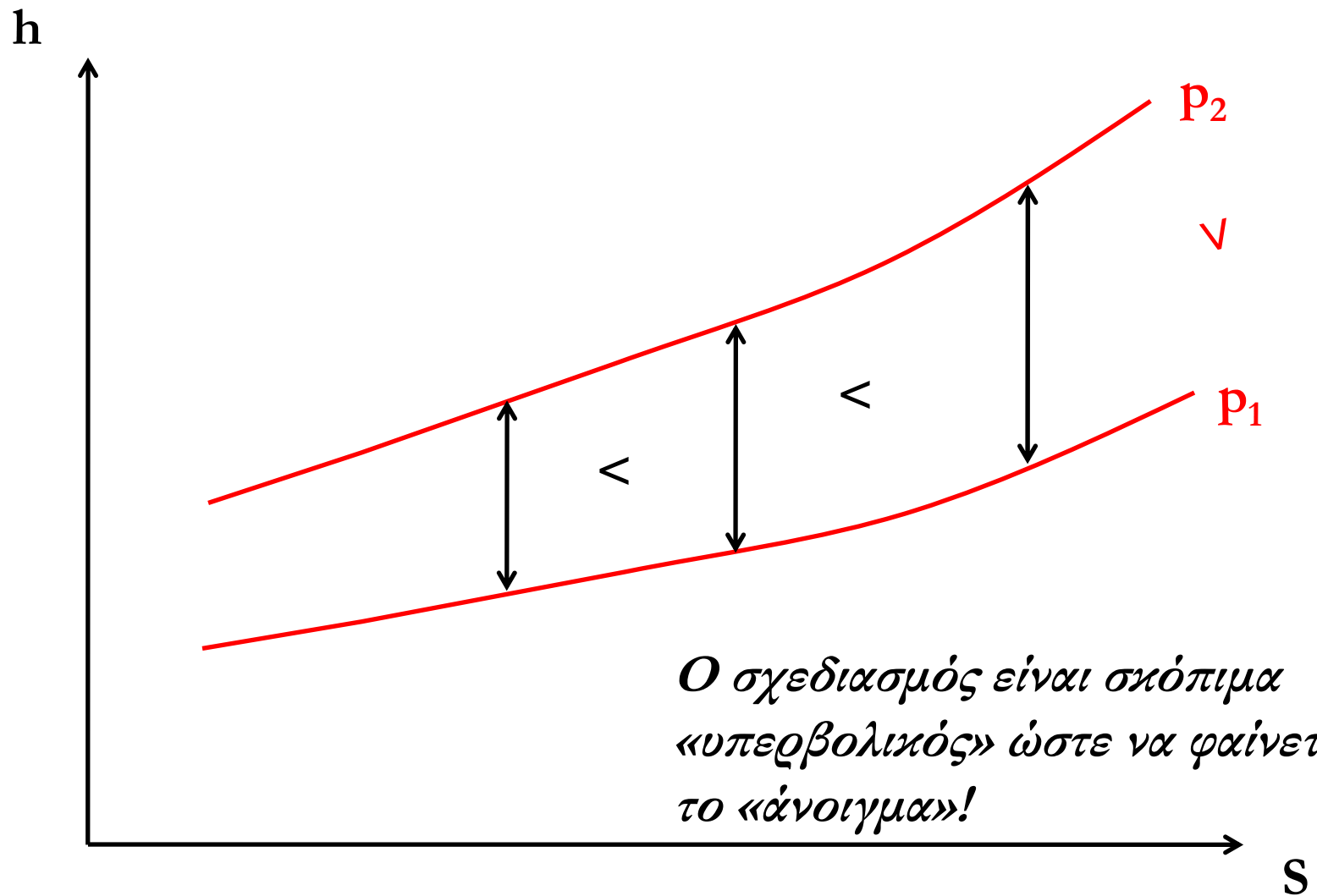
<http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/research/>

Η ανάγκη για ένα τέτοιο «μοντέλο»



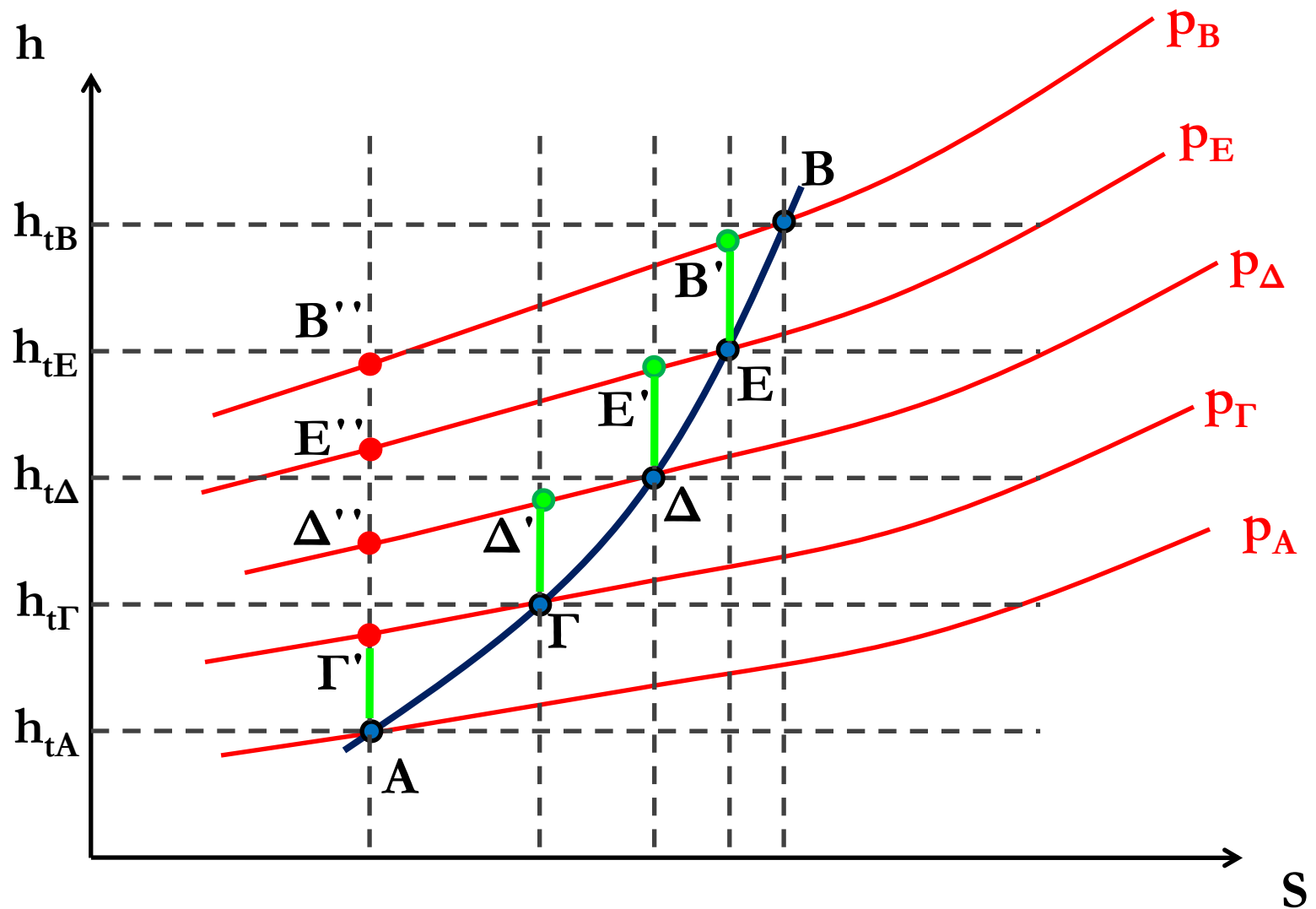
Θερμοδυναμική Μεταβολή σε Βαθμίδα Συμπιεστή

Οι Ισόθλιπτες στο (S,h)

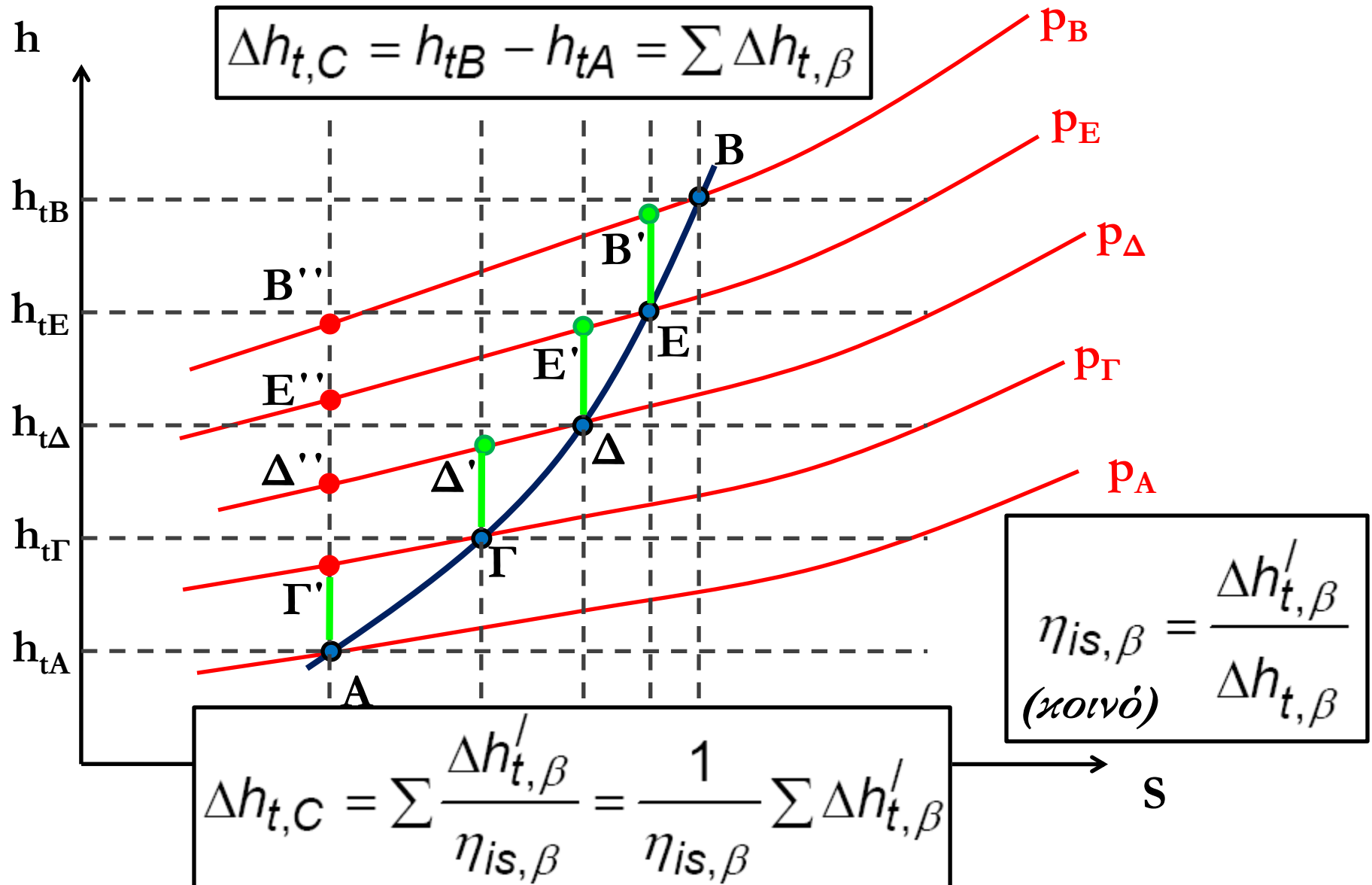


*Ο σχεδιασμός είναι σκόπιμα
«υπερβολικός» ώστε να φαίνεται
το «άνοιγμα»!*

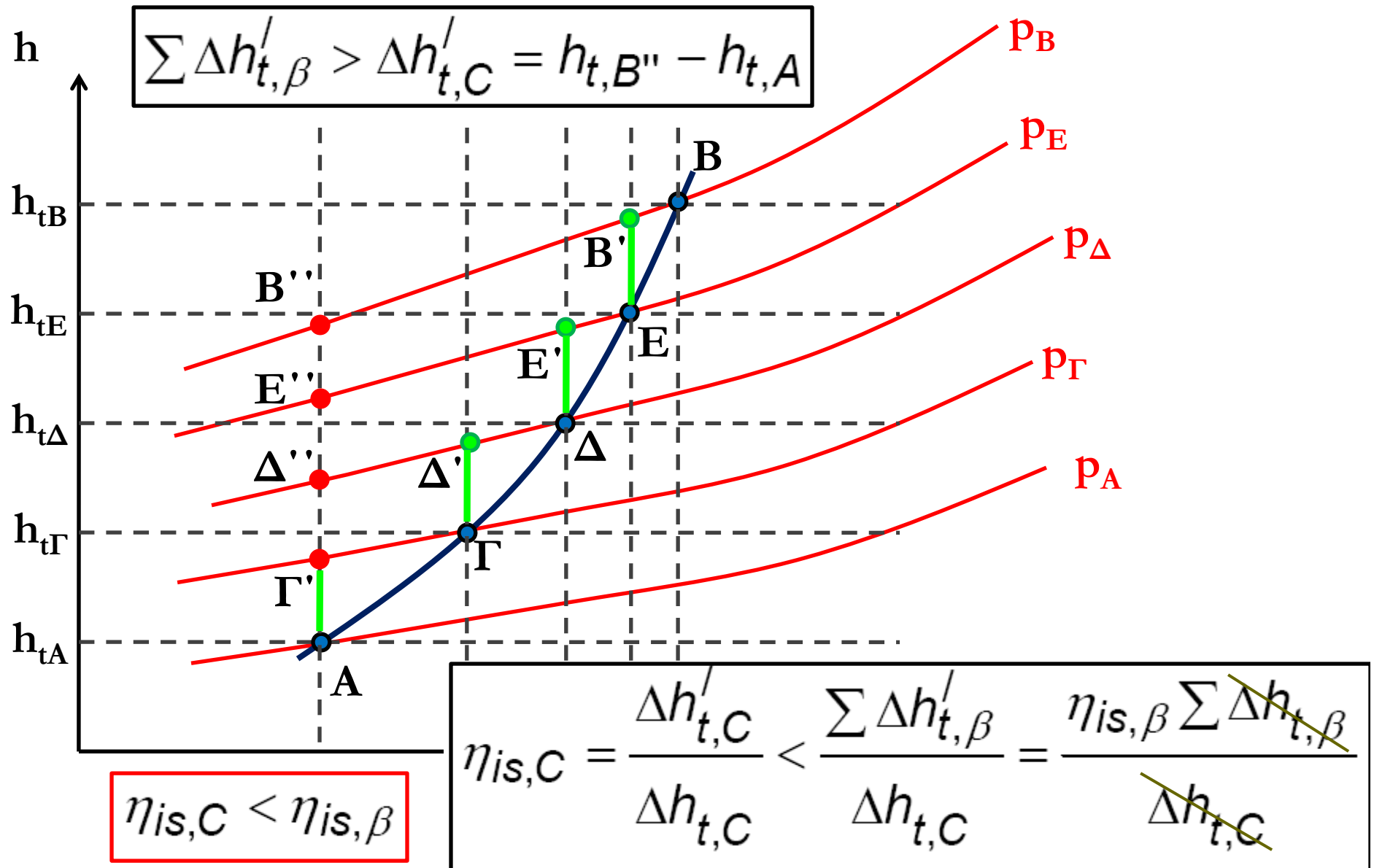
Θερμοδυναμική Μεταβολή σε Συμπιεστή



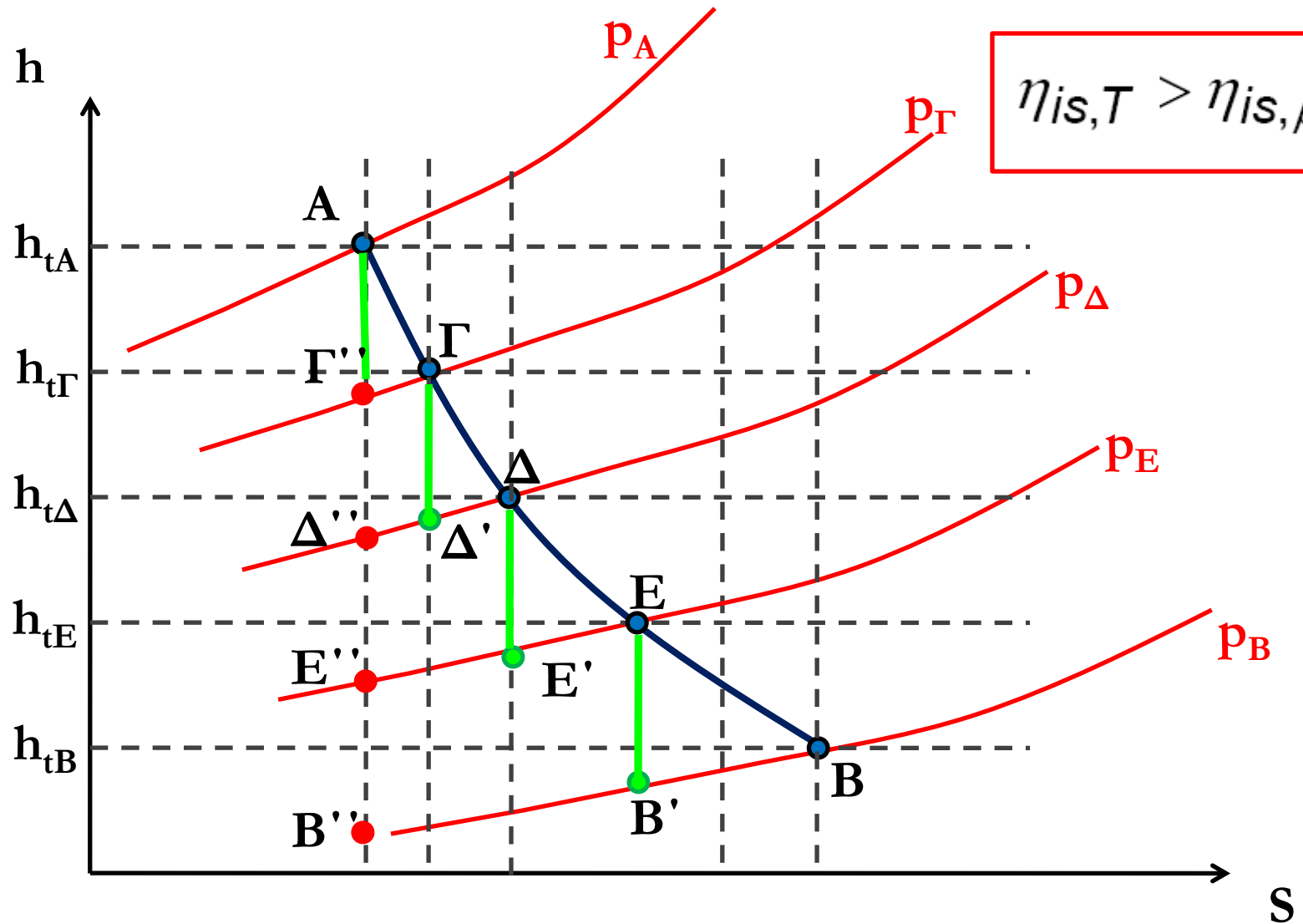
Θερμοδυναμική Μεταβολή σε Συμπιεστή



Θερμοδυναμική Μεταβολή σε Συμπιεστή



Θερμοδυναμική Μεταβολή σε Στρόβιλο



Πολυτροπική Μεταβολή σε Συμπιεστή



«Άπειρες μικρές βαθμίδες».

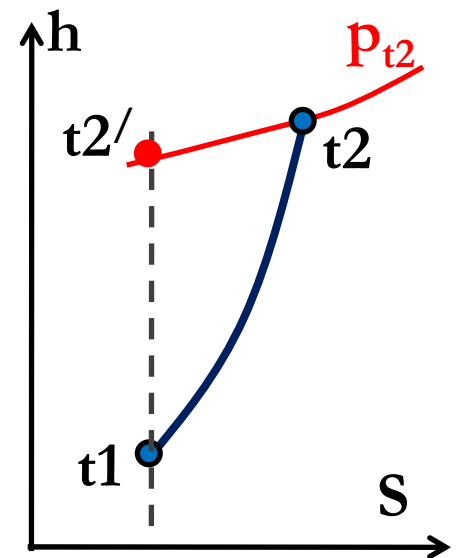
Πολυτροπικός βαθμός συμπιεστή & μικρής βαθμίδας

$$\eta_{is,\beta} = \eta_{p,\beta} = \eta_{p,C} = \frac{dT_t'}{dT_t} = \text{σταθ.}$$

Από την ισεντροπική $1 \rightarrow 2'$ στην πραγματική $1 \rightarrow 2$:

$$\begin{aligned} \frac{T_t}{\rho_t^{\gamma-1}} = \text{σταθ.} &\Rightarrow \frac{dT_t'}{T_t} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{dp_t}{p_t} \Rightarrow \\ \rho_t^{\gamma} &\Rightarrow \frac{\eta_{p,C} dT_t}{T_t} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{dp_t}{p_t} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{T_t}{\rho_t^{\gamma \eta_{p,C}}} = \text{σταθ.}$$



Πολυτροπική Μεταβολή σε Συμπιεστή



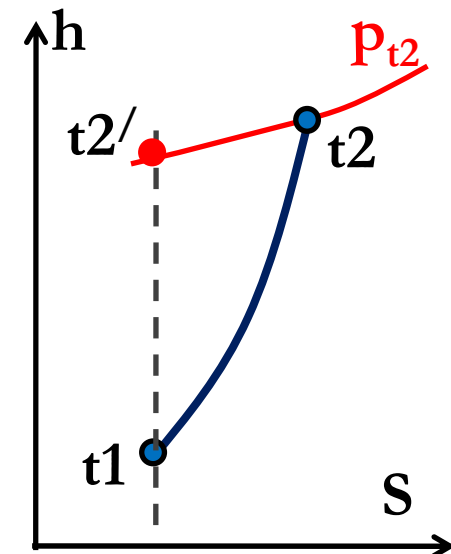
«Άπειρες μικρές βαθμίδες».



$$\frac{T_{t\alpha}}{T_{t1}} \cdot \frac{T_{t\beta}}{T_{t\alpha}} \cdot \frac{T_{t\gamma}}{T_{t\beta}} \dots \frac{T_{t2}}{T_{t\omega}} = \left(\frac{p_{t\alpha}}{p_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma\eta_{p,C}}} \cdot \left(\frac{p_{t\beta}}{p_{t\alpha}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma\eta_{p,C}}} \dots \left(\frac{p_{t2}}{p_{t\omega}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma\eta_{p,C}}}$$

$$\frac{T_{t2}}{T_{t1}} = \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma\eta_{p,C}}}$$

$$\frac{\gamma-1}{\gamma\eta_{p,C}} = \frac{n-1}{n}$$



Πολυτροπική Μεταβολή σε Στρόβιλο



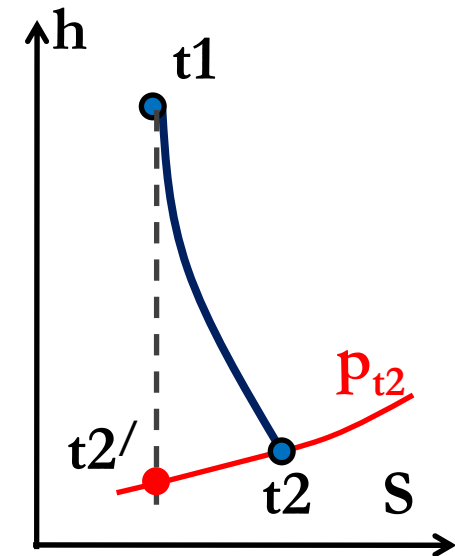
«Άπειρες μικρές βαθμίδες».



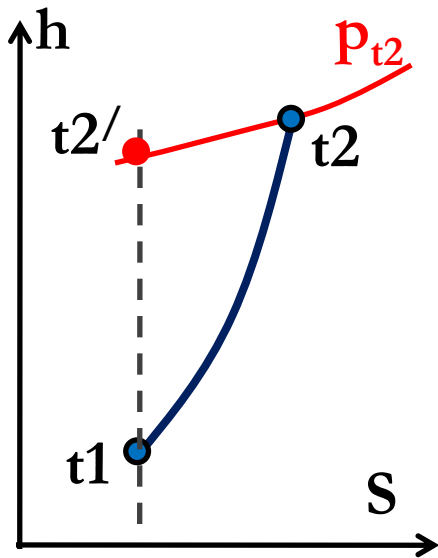
$$\frac{T_t}{p_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \eta_{p,T}} = \text{σταθ.}$$

$$\frac{T_{t2}}{T_{t1}} = \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma} \eta_{p,T}}$$

$$\eta_{p,T} \frac{\gamma-1}{\gamma} = \frac{n-1}{n}$$

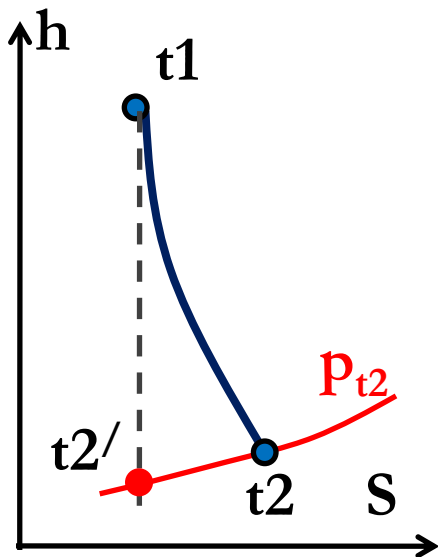


Ισεντροπικός Βαθμός απόδοσης Συμπιεστή/Στροβίλου



$$\eta_{is,C} = \frac{h_{t2'} - h_{t1}}{h_{t2} - h_{t1}} = \frac{\frac{h_{t2'} - 1}{h_{t1}}}{\frac{h_{t2} - 1}{h_{t1}}} = \frac{\left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1}$$

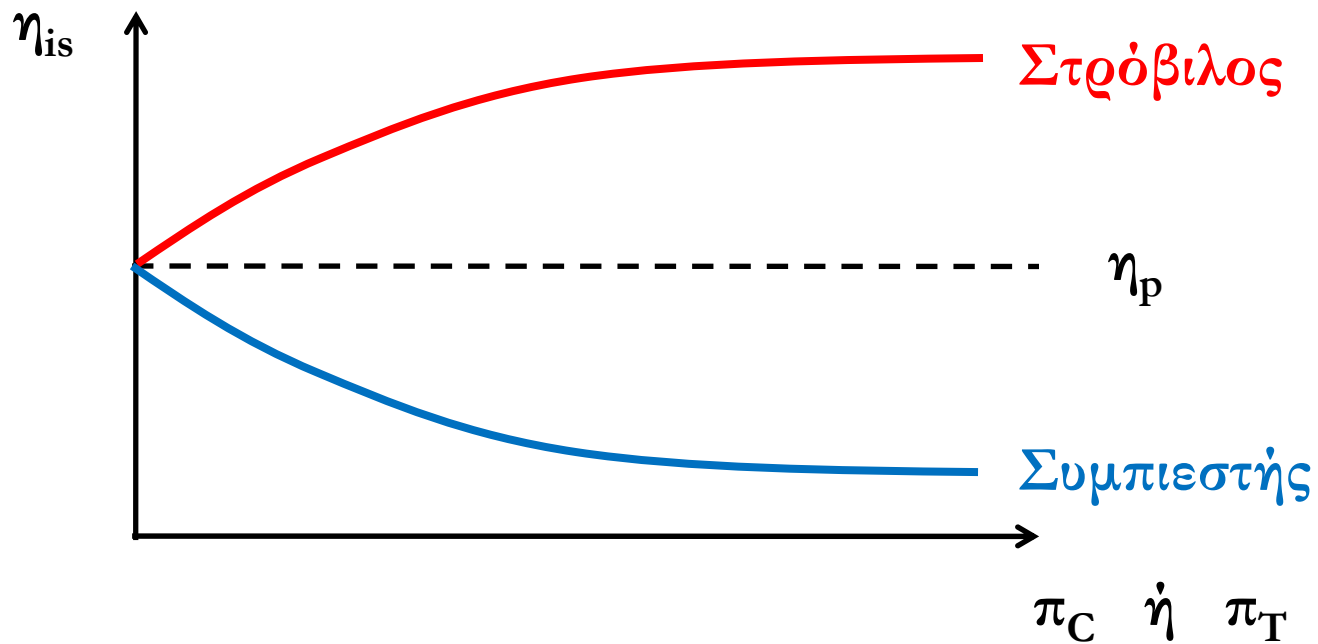
$$\pi_C = \frac{p_{t2}}{p_{t1}}$$



$$\eta_{is,T} = \frac{h_{t1} - h_{t2}}{h_{t1} - h_{t2'}} = \frac{1 - \frac{h_{t2}}{h_{t1}}}{1 - \frac{h_{t2'}}{h_{t1}}} = \frac{1 - \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{n-1}{n}}}{1 - \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$$\pi_T = \frac{p_{t1}}{p_{t2}}$$

Το φαινόμενο της αναθέρμανσης στο στρόβιλο



Η Πολυτροπική Μεταβολή στη Θερμοδυναμική



Πολυτροπική μεταβολή: $\frac{dq_{total}}{dh} = \beta = \text{σταθ.}$

$$q_{total} = \underbrace{du}_{\text{τριβές}} + \underbrace{pdv}_{\text{ογκομεταβολή}} = dh - vdp \Rightarrow \frac{q_{total}}{dh} = 1 - \frac{vdp}{dh} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow vdp = (1 - \beta)C_p dT \Rightarrow vdp = (1 - \beta) \frac{\gamma}{\gamma - 1} RdT$$

Όμως:

$$RdT = pdv + vdp \Rightarrow \dots \Rightarrow \frac{dp}{p} = \frac{dv}{v} \left(\gamma \frac{1 - \beta}{\beta\gamma - 1} \right) \Rightarrow \boxed{pv^n = \text{σταθ.}}$$

με $n = \frac{\gamma(\beta - 1)}{\beta\gamma - 1} \quad \beta = \frac{n - \gamma}{\gamma(n - 1)}$



$$pV^n = \text{σταθ.}$$

Ισόθλιπτη μεταβολή: $n = 0$

Ισοθερμοκρασιακή μεταβολή: $n = 1$

Ισόχωρη μεταβολή: $n = \pm\infty$

Ισεντροπική μεταβολή: $n = \gamma$ $pV^\gamma = \text{σταθ.}$



1. Συνθέτουμε έναν πολυβάθμιο αξονικό συμπιεστή με βαθμίδες πολυτροπικού βαθμού απόδοσης 0,88 επιθυμώντας αυτός να δίνει (συνολικό) λόγο πίεσης ίσο με 4 με την ίδια αύξηση ολικής θερμοκρασίας ανά βαθμίδα. Η τελευταία δεν πρέπει να ξεπερνά τους 25 K. Το εργαζόμενο μέσο θα είναι αέρας, που θεωρείται ως τέλειο αέριο και η θερμοκρασία εισόδου θα είναι 288 K. Υπολογίστε τον ελάχιστο αριθμό βαθμίδων που θα απαιτηθούν καθώς και το λόγο πίεσης της πρώτης και της τελευταίας βαθμίδας του πολυβάθμιου αξονικού συμπιεστή.

Άσκηση 37



37. Πολυβάθμιος αξονικός συμπιεστής έχει δέκα βαθμίδες. Κάθε βαθμίδα δίνει λόγο πίεσης 1,3 και έχει πολυτροπικό βαθμό απόδοσης ίσο με $\eta_{p,\beta} = 0,90$.

(α) Υπολογίστε το λόγο ολικών θερμοκρασιών (έξοδος/είσοδος) του συμπιεστή.

(β) Επαληθεύσετε αριθμητικά, με βάση την απάντησή σας στο προηγούμενο ερώτημα, ότι ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης όλου του συμπιεστή είναι ίσος με 0,90.

(γ) Υπολογίστε τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης $\eta_{is,\beta}$ της 1ης, 2ης, 5ης και 10ης βαθμίδας.

(δ) Υπολογίστε τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης $\eta_{is,C}$ ολόκληρου του συμπιεστή.



34. Υπολογίστε τον αριθμό Mach της ροής σε μια διατομή ενός συμπεστού όταν γνωρίζετε ότι:

(α) Το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας (τέλειο αέριο)

(β) Ο συμπεστούς διακινεί το 85% της μέγιστης παροχής που μπορεί να διακινήσει. Η μέγιστη παροχή αντιστοιχεί στο να δημιουργηθεί ηχητική κατάσταση (αριθμός Mach=1) στη διατομή που αναλύουμε.

(γ) Η ροή στη διατομή αυτή θεωρείται αξονική.



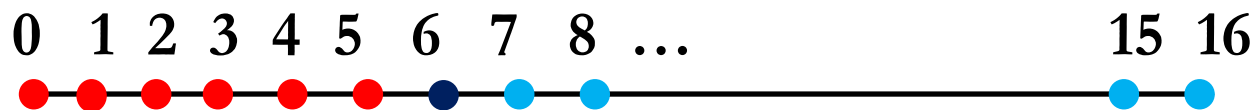
44. Ένας πολυβάθμιος αξονικός συμπιεστής αποτελείται από έναν αριθμό βαθμίδων που θεωρούνται ως «πολλές μικρές βαθμίδες». Κάθε μια από αυτές έχει συντελεστή φόρτισης ίσο με 0,2733. Λειτουργώντας με αέρα στις συνθήκες αναφοράς, ο συμπιεστής έχει λόγο πίεσης 5, ισεντροπικό βαθμό απόδοσης κάθε βαθμίδας ίσο με 0,888 και γραμμική ταχύτητα περιστροφής στη (σταθερή παντού) μέση ακτίνα του μονοδιάστατου υπολογισμού ίση με 275 m/sec.

Υπολογίστε τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή και το αριθμό βαθμίδων του.

Άσκηση 14



14. Ένας αξονικός συμπιεστής δίνει λόγο πίεσης 6,3 και αποτελείται από 16 βαθμίδες. Οι πρώτες 6 βαθμίδες έχουν βαθμό απόδοσης ολικών-προς-ολικές συνθήκες ίσο με 90% και οι επόμενες 10 ίσο με 89%. Θεωρώντας ότι όλες οι βαθμίδες προσδίδουν το ίδιο έργο ανά μονάδα μάζας του διερχομένου ρευστού, προσδιορίστε τη συνολική απόδοση ολικών προς ολικές συνθήκες του πολυβάθμιου συμπιεστή, για θερμοκρασία εισόδου 288 K. Θεωρείστε ότι κάθε βαθμίδα πραγματοποιεί λόγο πίεσης λίγο μεγαλύτερο από τη μονάδα και χρησιμοποιείτε κάθε παραδοχή που αυτό συνεπάγεται. Το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας που θεωρείται τέλειο αέριο.



Άσκηση 26



26. Σχεδιάζουμε, έναν πολυβάθμιο αξονικό συμπιεστή, για λειτουργία με αέρα και επιθυμητή αύξηση ολικής θερμοκρασίας 160 K. Θα υπολογίσουμε το πλήθος βαθμίδων που θα χρειασθούν, με τις παρακάτω απλουστευτικές παραδοχές: (α) αρχές μονοδιάστατης ανάλυσης σε σταθερή ακτίνα όπου η γραμμική ταχύτητα περιστροφής είναι 260 m/sec, (β) ίδια αύξηση ολικής θερμοκρασίας σε κάθε βαθμίδα, (γ) η τροφοδοσία του συμπιεστή θα γίνεται από το περιβάλλον χωρίς οδηγία πτερύγια και (δ) κάθε περιστρεφόμενη πτερύγωση να λειτουργεί οριακά στη μέγιστη επιτρεπόμενη επιβράδυνση (χρησιμοποιείτε στοιχεία από τη θεωρία που έχετε διδαχθεί). Εκτιμείστε το πλήθος βαθμίδων που θα χρειασθούν, παρουσιάζοντας σύντομα αλλά καθαρά κάθε παραδοχή ή στοιχείο που χρησιμοποιήσατε. Η αξονική ταχύτητα διατηρείται σταθερή κατά μήκος του συμπιεστή και ίση με 150 m/sec.