

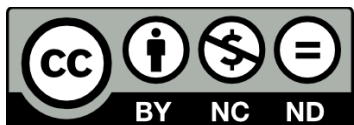


# Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική

## Ενότητα 9: Κύκλο Brayton

Χατζηαθανασίου Βασίλειος  
Καδή Στυλιανή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





# Κύκλο Brayton



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

---

1. Ανοικτό κύκλο Brayton
2. Κλειστό κύκλο Brayton
3. Αποκλίσεις πραγματικών κύκλων από τα ιδανικά



# Κύκλο Brayton (1/2)

- Το κύκλο Brayton χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με συστήματα καύσης φυσικού αερίου. Ένας αερόψυκτος πυρηνικός αντιδραστήρας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή θερμότητας. Η μεταφορά ισχύος στο κύκλο αυτό γίνεται από ένα αεριοστρόβιλο.

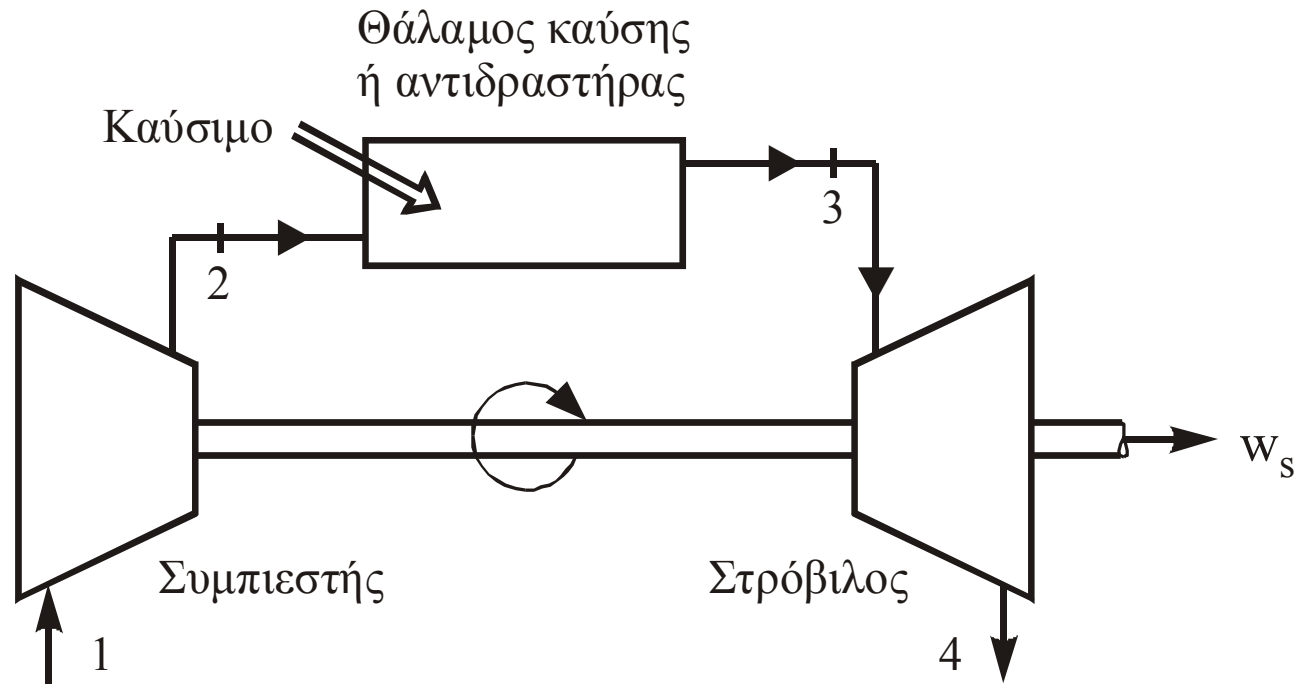


# Κύκλο Brayton (2/2)

- Εμπορικοί αεριοστροβίλοι σχεδιάζονται σήμερα για θερμοκρασίες στη περιοχή των  $1400^{\circ}\text{C}$ , ενώ αναμένεται το όριο να αυξηθεί στους  $1600^{\circ}\text{C}$ . Ακόμη και με αυτή την υψηλή θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, οι αποδόσεις στο κύκλο Brayton κυμαίνονται μεταξύ 20 και 30% μόνο. Παρ' όλα αυτά, το μικρό κόστος των αεριοστροβίλων (ανά  $\text{Kwh}$ ), κάνουν τη χρήση τους ελκυστική για εγκαταστάσεις αιχμής.



# Ανοικτό κύκλο Brayton (1/2)



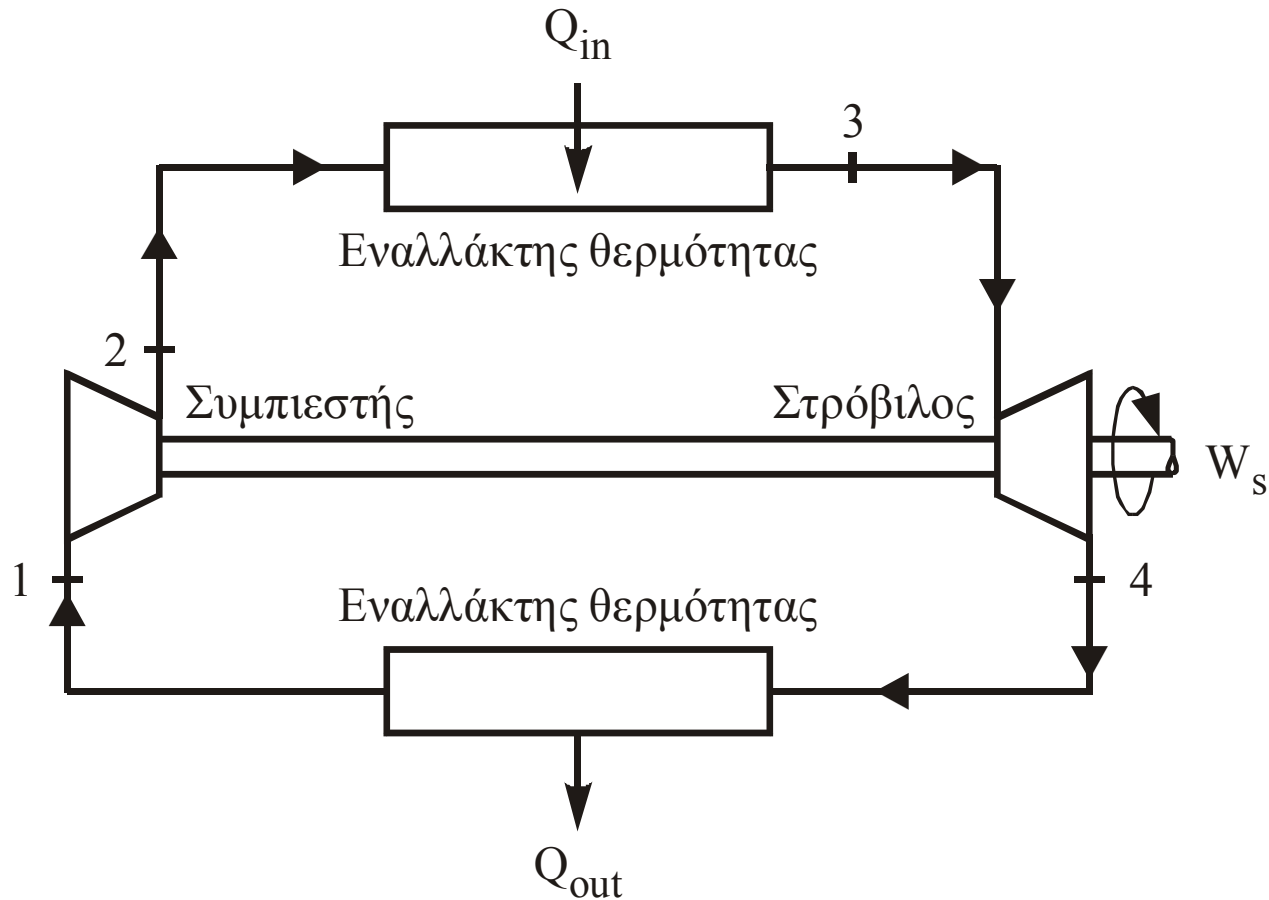


# Ανοικτό κύκλο Brayton (2/2)

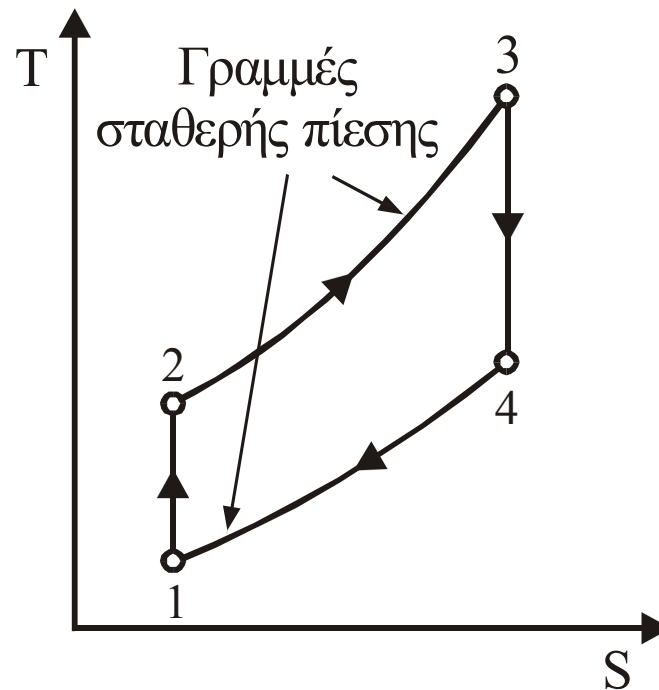
1. Αέρας εισέρχεται στον συμπιεστή σε ατμοσφαιρική πίεση  $p_1$  και θερμοκρασία  $T_1$ . Συμπιέζεται αδιαβατικά σε μια υψηλότερη πίεση  $p_2$  και θερμοκρασία  $T_2$ .
2. Θερμότητα προστίθεται από τον θάλαμο καύσης ή τον αντιδραστήρα σε σταθερή πίεση με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας σε  $T_3$ .
3. Το αέριο εκτονώνεται αδιαβατικά στον στρόβιλο. Η θερμοκρασία μειώνεται σε  $T_4$ .
4. Το θερμό αέριο αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα.



# Κλειστό κύκλο Brayton (1/3)



# Κλειστό κύκλο Brayton (2/3)



# Κλειστό κύκλο Brayton (3/3)

- 1-2 Ισεντροπική συμπίεση (σε συμπίεστή)
- 2-3 Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας ( $P=ct$ )
- 3-4 Ισεντροπική εκτόνωση (σε στρόβιλο)
- 4-1 Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας ( $P=ct$ )



# Ανάλυση κύκλου Brayton (1/9)

- Το καθαρό έργο που αποδίδει το κύκλο Brayton είναι το έργο που αποδίδει ο στρόβιλος μείον το έργο εισόδου του συμπιεστή:
- $\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_T - \dot{W}_C = \dot{m}(h_3 - h_4) - \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (1)$



# Ανάλυση κύκλου Brayton (2/9)

- Επειδή  $dh=c_p dT$ , για τη περίπτωση σταθερής  $c_p$ , θα είναι:

- $$\dot{W}_T = \dot{m}c_p (T_3 - T_4) \quad (2)$$

- $$\dot{W}_C = \dot{m}c_p (T_2 - T_1) \quad (3)$$



# Ανάλυση κύκλου Brayton (3/9)

- Οι διαδικασίες 1-2 και 3-4 είναι ισεντροπικές  
είναι δε  $p_1=p_4$  και  $p_2=p_3$ . Θεωρώντας το αέριο  
ιδανικό ισχύει:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4}$$

όπου  $k = c_p/c_v$ .



# Ανάλυση κύκλου Brayton (4/9)

- Αν με  $r_p$  συμβολίσουμε το λόγο των πιέσεων, δηλαδή:

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} \quad (5)$$

η (4) γράφεται:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = r_p^{(k-1)/k} \quad (6)$$





# Ανάλυση κύκλου Brayton (5/9)

- Από τις (2), (3) και (4) προκύπτει:

$$\dot{W}_T = \dot{m}c_p T_3 \left[ 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right] \quad (7)$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}c_p T_2 \left[ 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right] \quad (8)$$



# Ανάλυση κύκλου Brayton (6/9)

- Το καθαρό έργο του κύκλου Brayton θα είναι τότε:

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_T - \dot{W}_C = \dot{m}c_p (T_3 - T_2) \left[ 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right]$$



# Ανάλυση κύκλου Brayton (7/9)

- Η θερμότητα που προστίθεται στο αέριο:

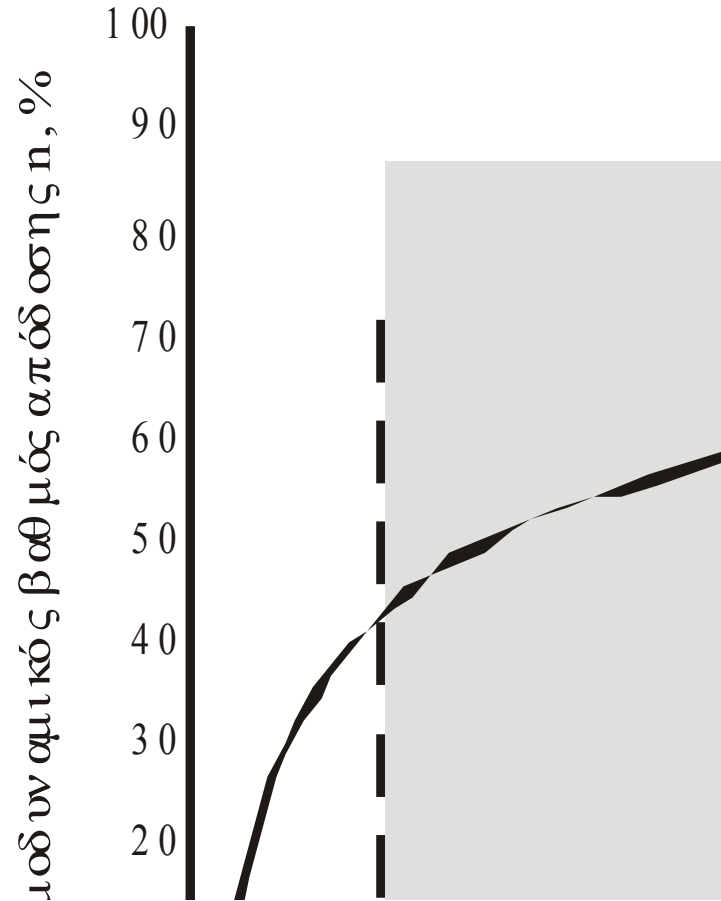
$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}c_p (T_3 - T_2)$$

- οπότε ο βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι:

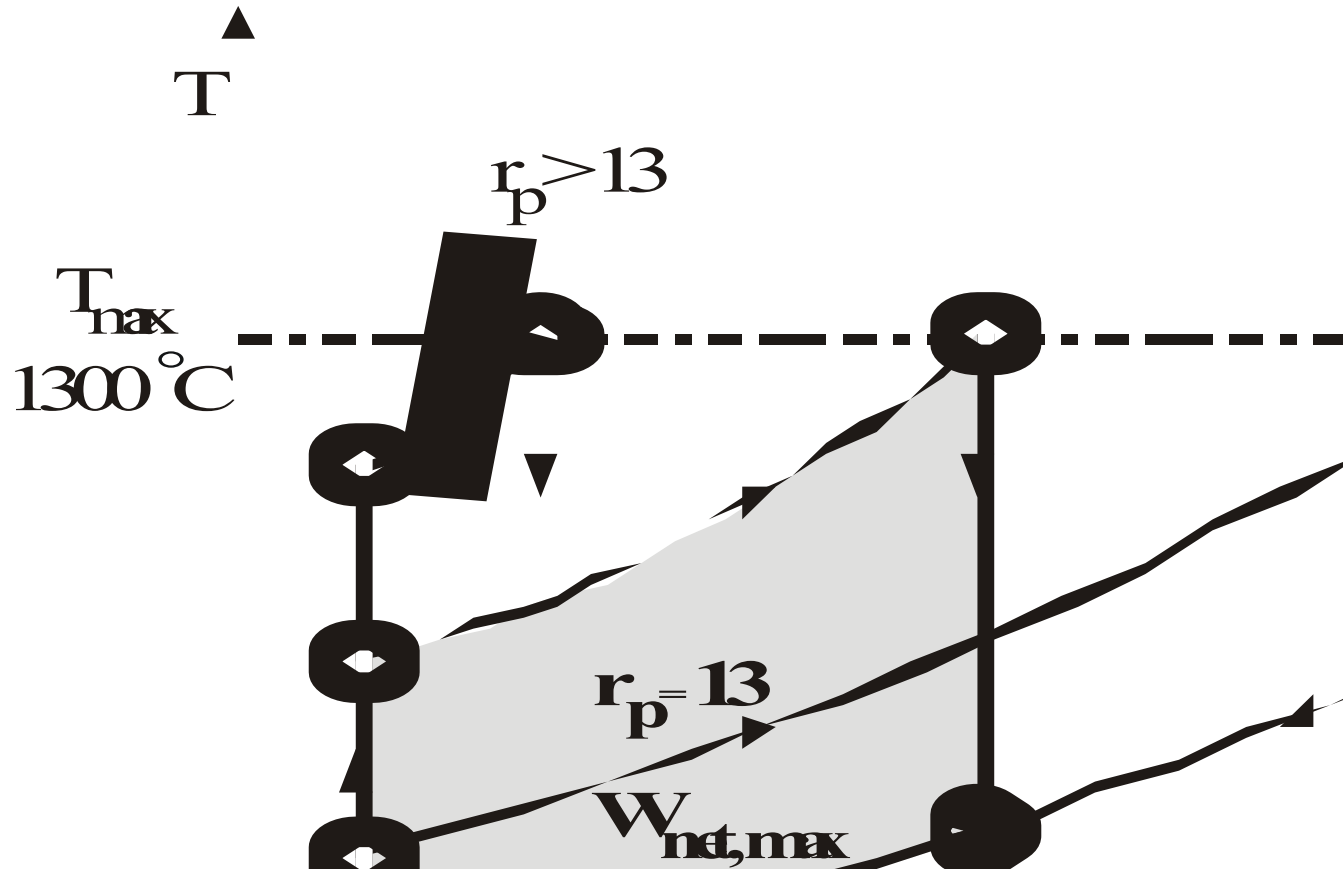
$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$



# Ανάλυση κύκλου Brayton (8/9)



# Ανάλυση κύκλου Brayton (9/9)

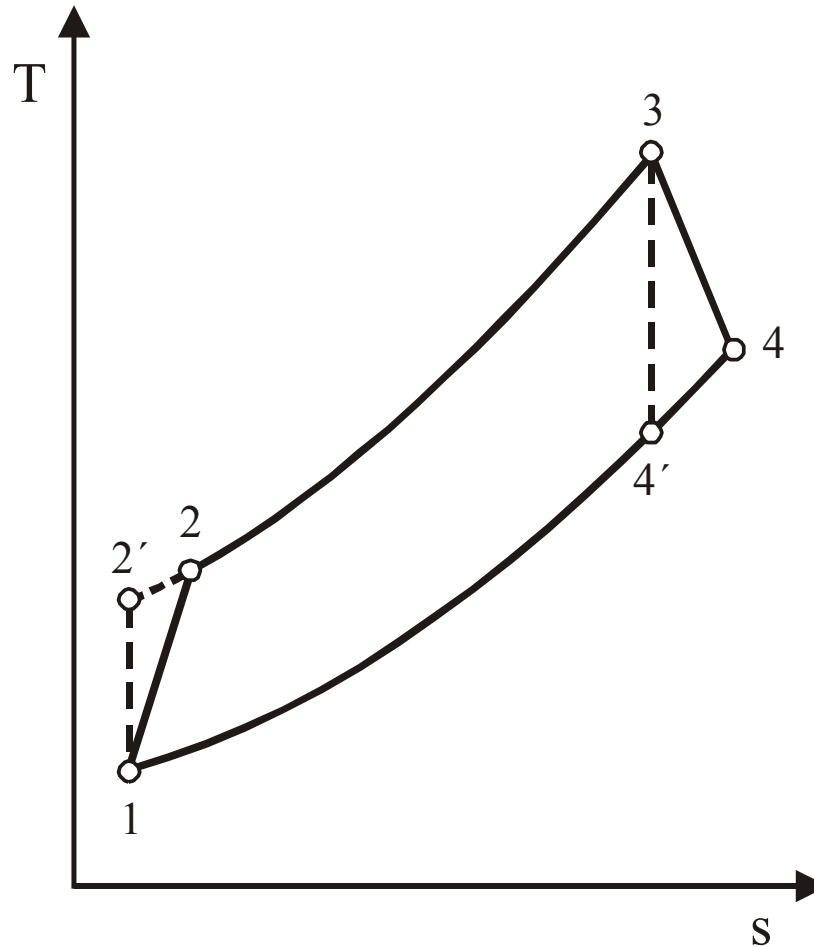


# Ανάπτυξη αεριοστροβίλων

- Η βελτίωση της απόδοσης του κύκλου έγινε με:
  - Αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο
    - Από τους 540 °C έφτασε στους 1425 °C.
    - Πρόβλημα τα οξειδία του αζώτου.
  - Αύξηση των αποδόσεων των συστατικών στοιχείων των στροβίλων
    - Καλύτερος αεροδυναμικός σχεδιασμός.
  - Επιπρόσθετες τροποποιήσεις στο βασικό κύκλο.
    - Ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση, αναθέρμανση.



# Αποκλίσεις πραγματικών κύκλων από τα ιδανικά (1/4)



# Αποκλίσεις πραγματικών κύκλων από τα ιδανικά (2/4)

- Συμπιεστής:

$$\eta_C = \frac{\text{ιδανικό έργο}}{\text{πραγματικό έργο}} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1} \approx \frac{T_{2'} - T_1}{T_2 - T_1}$$

- Στρόβιλος:

$$\eta_T = \frac{\text{πραγματικό έργο}}{\text{ιδανικό έργο}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4'}} \approx \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4'}}$$





# Αποκλίσεις πραγματικών κύκλων από τα ιδανικά (3/4)

$$\dot{W}_T = (\dot{m}c_p T_3) \left( 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right) n_T$$

$$\dot{W}_c = \frac{1}{n_{cp}} \left[ \dot{m}c_p T_2 \left( 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right) \right]$$

$$= \frac{1}{n_{cp}} \left[ \dot{m}c_p T_1 r_p^{(k-1)/k} \left( 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right) \right]$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_T - \dot{W}_c = \dot{m}c_p T_1 \left[ \left( n_T \frac{T_3}{T_1} - \frac{r_p^{(k-1)/k}}{n_{Cp}} \right) \left( 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right) \right]$$



# Αποκλίσεις πραγματικών κύκλων από τα ιδανικά (4/4)

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}c_p \left[ (T_3 - T_1) - T_1 \frac{r_p^{(k-1)/k} - 1}{n_{Cp}} \right]$$

$$n_o = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$n_{th} = \frac{T_1 \left[ n_T (T_3 / T_1) - r_p^{(k-1)/k} / n_{Cp} \right] \left( 1 - 1 / r_p^{(k-1)/k} \right)}{(T_3 - T_1) - T_1 (r_p^{(k-1)/k} - 1) / n_{Cp}}$$



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζηαθανασίου Βασίλειος, Καδή Στυλιανή. «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ. Κύκλο Brayton». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS423/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

---

# Σημειώματα

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

