

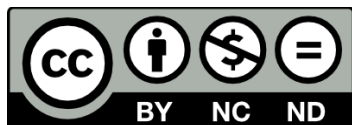


# ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Ενότητα 4: Καύση

Χατζηαθανασίου Βασίλειος,  
Καδή Στυλιανή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



# 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.



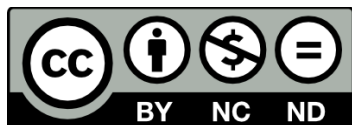
# Χρηματοδότηση

- 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.





# Καύση



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. Τέλεια καύση
2. Ατελής καύση
3. Θερμογόνος δύναμη
4. Σύσταση-ποσότητα καυσαερίων
5. Βαθμός απόδοσης



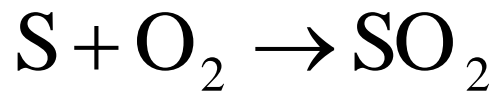
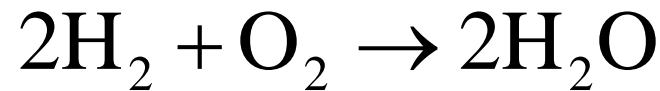
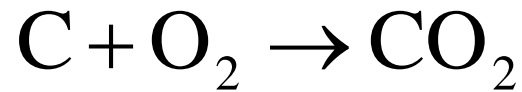
# Καύση

- Η ταχεία χημική αντίδραση του οξυγόνου με τα καύσιμα στοιχεία των καυσίμων.
- Τα κύρια συστατικά των ορυκτών καυσίμων που καίγονται είναι ο άνθρακας, το υδρογόνο και το θείο.

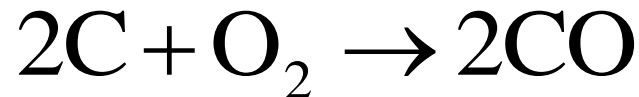


# Εξισώσεις καύσης

- Χημικές εξισώσεις για τέλεια καύση :



- Ατελής καύση:



# Κριτήρια τέλειας καύσης

1. Επαρκής ποσότητα αέρα (οξυγόνου).
2. Καλή ανάμιξη οξυγόνου και καυσίμου.
3. Το μίγμα καυσίμου και αέρα πρέπει να έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη ή ίση με την θερμοκρασία ανάφλεξης.
4. Ο όγκος της εστίας καύσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε το μίγμα να έχει αρκετό χρόνο για να καεί.





# Ατελής καύση

- $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + 10200 \text{kJ/kg}$
- $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2 + 23700 \text{kJ/kg}$
- $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 33900 \text{kJ/kg}$



# Σύσταση αέρα

	Κατά μάζα %	Κατ' όγκο %
Οξυγόνο	23.14	20.95
Αζωτο	75.53	78.09
Αργό	1.28	0.93
Διοξ. άνθρακα	0.05	0.03



# Εξισώσεις καύσης (1/2)

- Εξισώσεις της καύσης: με βάση τη θεωρητική ποσότητα του οξυγόνου που χρειάζεται προκειμένου να γίνει η καύση.



# Εξισώσεις καύσης (2/2)

Καύσιμη ύλη	Μοριακό βάρος	Εξίσωση	Θερμότητα Καύσης(kJ/kg)
Άνθρακας	12	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	32 853
Υδρογόνο	2	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	142 130
Θείο	32	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	9 320
Υδρόθειο	34	$H_2S + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	16 543
Μεθάνιο	16	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	55 687
Εθάνιο	30	$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	51 959
Προπάνιο	44	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	50 095
Βουτάνιο	58	$C_4H_{10} + \frac{13}{2}O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	49 629
Πεντάνιο	72	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	51 260



# Καύση άνθρακα

- $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- $1 \text{ kmol } C + 1 \text{ kmol } O_2 \rightarrow 1 \text{ kmol } CO_2$
- $12,011 \text{ kg } C + 31,999 \text{ kg } O_2 \rightarrow 44,01 \text{ kg } CO_2$

ή

- $1 \text{ kg } C + 2,664 \text{ kg } O_2 \rightarrow 3,664 \text{ kg } CO_2$



# Εξισώσεις καύσης και σχέσεις ποσοτήτων για τέλεια καύση

Εξίσωση αντίδρασης	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$S + O_2 \rightarrow SO_2$
Ισοζύγιο γραμμομορίων	1kmolC+1kmolO <sub>2</sub> = 1 kmol CO <sub>2</sub>	1kmolH <sub>2</sub> +0.5kmolO <sub>2</sub> = 1 kmol H <sub>2</sub> O	1kmolS+1kmol O <sub>2</sub> = 1 kmol SO <sub>2</sub>
Ισοζύγιο μαζών	1kgC +2,664kgO <sub>2</sub> = 3,664 kg CO <sub>2</sub>	1kgH <sub>2</sub> +7,937 kgO <sub>2</sub> = 8,937 kg H <sub>2</sub> O	1kgS+0,998 kgO <sub>2</sub> = 1,998 kg SO <sub>2</sub>



# Στοιχειακή ανάλυση

---

- $C + H + S + O + N + W + A = 1$



# Θερμογόνος δύναμη του καυσίμου (1/2)

- *Θερμογόνος δύναμη* ( $\Theta\Delta$ ) του καυσίμου είναι η θερμότητα που εκλύεται κατά την πλήρη καύση ανά μονάδα μάζας του καυσίμου.
- Διακρίνουμε αντίστοιχα την *ανώτερη θερμογόνο δύναμη* ( $A\Theta\Delta$ )  $H_o$  και την *κατώτερη θερμογόνο δύναμη* ( $K\Theta\Delta$ )  $H_u$ . Οι τιμές αυτές διαφέρουν κατά την ενθαλπία εξάτμισης του νερού που υπάρχει στα καυσαέρια.





# Θερμογόνος δύναμη του καυσίμου (2/2)

$$A\Theta\Delta = \left[ 32850C + 142130 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 9320S \right] \text{ kJ/kg}$$

$$K\Theta\Delta = A\Theta\Delta - h_{fg} (W + 8,937H)$$

$$K\Theta\Delta = \left[ 32850C + 120320 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 9320S - 2440W \right] \text{ kJ/kg}$$



# Αέρας καύσης (1/3)

$$O_{\min} = 2,664C + 7,937H + 0,998S - O \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg καυσίμου}}$$

$$l_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,232} \frac{\text{kg αέρα}}{\text{kg καυσίμου}}$$

$$l_{\min} = 11,48C + 34,2H + 4,3S - 4,31O \frac{\text{kg αέρα}}{\text{kg καυσίμου}}$$

$$l_{\min} = 11,48C + 34,2 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 4,3S \frac{\text{kg αέρα}}{\text{kg καυσίμου}}$$



# Αέρας καύσης (2/3)

- Ποσότητες σε kmol:
- C kg C αντιδρούν με  $C/12$  kmol  $O_2$  και δίνουν  $C/12$  kmol  $CO_2$
- H kg  $H_2$  αντιδρούν με  $H/4$  kmol  $O_2$  και δίνουν  $H/2$  kmol  $H_2O$
- S kg S αντιδρούν με  $S/32$  kmol  $O_2$  και δίνουν  $S/32$  kmol  $SO_2$



# Αέρας καύσης (3/3)

- Ποσότητες σε kmol:

$$O_{\min} = \frac{C}{12} + \frac{1}{4} \left( H - \frac{O}{8} \right) + \frac{S}{32} \quad \frac{\text{kmolO}_2}{\text{kg καυσίμου}}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} = 0,397 \left[ C + 3 \left( H - \frac{O - S}{8} \right) \right] \quad \frac{\text{kmol αέρα}}{\text{kg καυσίμου}}$$



# Περίσσεια αέρα

## Λόγος αέρα

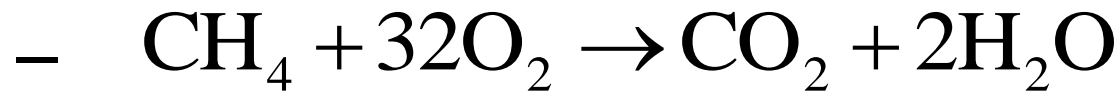
$$\lambda = \frac{\ell}{\ell_{\min}}$$

- Συνήθεις τιμές του  $\lambda$  :
  - αέρια καύσιμα  $\lambda=1,08 - 1,1$
  - υγρά καύσιμα  $\lambda=1,1 - 1,2$
  - στερεά καύσιμα  $\lambda=1,2 - 1,4$



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (1/9)

- Καύσιμο με δεδομένο χημικό τύπο, π.χ. καύση μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ) με λόγο αέρα  $\lambda=1,1$ .



$$\text{O}_{\min} = 2\text{kmol/kmol CH}_4 \quad \text{L}_{\min} = \frac{2}{0,21} = 9,52\text{kmol/kmolCH}_4$$

- $L = L_{\min} \cdot \lambda = 9,52 \cdot 1,1 = 10,472 \text{ kmol/kmol CH}_4$



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (2/9)

- Αριθμός kmol συστατικών καυσαερίων:

$$n_{\text{CO}_2} = 1$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 2$$

$$n_{\text{O}_2} = (\lambda - 1)O_{\text{min}} = (1,1 - 1) \cdot 2 = 0,2$$

$$n_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L = 8,273$$

- Ο συνολικός αριθμός των kmol των καυσαερίων είναι:

$$n_p = 1 + 2 + 0,2 + 8,273 = 11,473 \text{ kmol}$$



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (3/9)

- Ποσοστά των kmoles των συστατικών είναι:
  - $x_{\text{CO}_2} = 0,0872$
  - $x_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1743$
  - $x_{\text{N}_2} = 0,7211$
  - $x_{\text{O}_2} = 0,0174$





# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (4/9)

- Στερεά ή υγρά καύσιμα.
- Καυσαέρια:
  - $\text{CO}_2$  και  $\text{SO}_2$  από το καύσιμο.
  - N από καύσιμο και αέρα.
  - $\text{O}_2$  λόγω περίσσειας αέρα.
  - $\text{H}_2\text{O}$  λόγω υγρασίας του καυσίμου.



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (5/9)

## ❖ Ξηρά καυσαέρια:

- Από την καύση 1 kg C παράγονται 3.664 kg CO<sub>2</sub> και απαιτούνται 2.664 kg O<sub>2</sub>.
- Αέρας: μίγμα δύο μόνο συστατικών, O<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>, με κατά βάρος αναλογία 23,21% O<sub>2</sub> και 76,79% N<sub>2</sub>.
- Ποσότητα του αζώτου που υπάρχει στον απαιτούμενο αέρα της καύσης και η οποία θα εμφανιστεί στα καυσαέρια είναι:  $2,664 \times (76,79/23,21) = 8,814$  kg.
- Συνολική ποσότητα των καυσαερίων που προκύπτει από την τέλεια καύση 1 kg C είναι:

$$3.664 + 8.814 = 12.48 \text{ kg.}$$



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (6/9)

- Από την καύση του διαθέσιμου υδρογόνου (H-O/8), στα ξηρά καυσαέρια θα εμφανιστεί μόνο η ποσότητα του N<sub>2</sub> που υπάρχει στον αέρα που χρειάζεται το διαθέσιμο υδρογόνο για να καεί. Αυτή είναι:

$$7,7937 \times (76,79/23,21) = 26,259 \text{ kg.}$$



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (7/9)

- Συνολική ποσότητα ξηρών καυσαερίων που παράγονται από τη στοιχειομετρική καύση του καυσίμου είναι:

$$m_{gOT} = 12,48C + 26,259 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 5,3S + N \quad \text{kg / kg καυσίμου}$$

- Ο δείκτης 'g' υποδηλώνει καυσαέριο, ο δείκτης 'ο' ότι αναφερόμαστε σε στοιχειομετρική καύση και ο δείκτης 'T' ότι αναφερόμαστε σε ξηρά καυσαέρια.



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (8/9)

- Η συνολική μάζα των υδρατμών στα καυσαέρια είναι:

$$m_{(H_2O)_o} = 8,937H + W \quad \text{kg / kg καυσίμου}$$

- Η συνολική ποσότητα των καυσαερίων που παράγεται από την τέλεια καύση 1 kg καυσίμου με στοιχειομετρικό αέρα είναι:

$$m_{go} = m_{goT} + m_{(H_2O)_o} \quad \text{kg / kg καυσίμου}$$



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων (9/9)

- Ποσότητα των καυσαερίων που παράγεται από την τέλεια καύση 1 kg καυσίμου με περίσσεια αέρα:

$$m_g = m_{g0} + l_{\min} (\lambda - 1) \quad \text{kg / kg καυσίμου}$$

ή

$$m_g = 1 - A + \lambda \cdot l_{\min} \quad \text{kg / kg καυσίμου}$$



# Μάζες των συστατικών των καυσαερίων σε kg/kg καυσίμου

Ουσία	Προκύπτει από καύση	Περιέχεται στο καύσιμο	Από τον αέρα καύσης
CO <sub>2</sub>	3,664c	-	-
H <sub>2</sub> O	8,937h	w	ξηρός
SO <sub>2</sub>	1,998s	-	-
O <sub>2</sub>	-	-*	$0,232(\lambda-1)l_{\min}$
N <sub>2</sub>	-	n	$0,768 \cdot l_{\min} \cdot \lambda$



# Σύσταση - ποσότητα καυσαερίων

- Συνολική ποσότητα καυσαερίων σε kmol:

$$n_p = \left[ \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + \frac{W}{18} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} \right] + L - \left[ \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right]$$

- ή

$$n_p = L + \frac{1}{12} \left[ 3H + \frac{3}{8}O + \frac{2}{3}W + \frac{3}{7}N \right] \text{ kmol / kg}$$





# Όγκος καυσαερίων

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{C}{12} RT / p$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \left( \frac{H}{2} + \frac{W}{18} \right) RT / p$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{S}{32} RT / p$$

$$V_{\text{N}_2} = \left( 0,79L + \frac{N}{28} \right) RT / p$$

$$V_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) O_{\min} RT / p$$

$$V_p = \left[ \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + \frac{W}{18} + \frac{S}{32} + \left( 0,79L + \frac{N}{28} \right) + (\lambda - 1) O_{\min} \right] \frac{RT}{p} = n_p \frac{RT}{p}$$



# Χαρακτηριστικά μεγέθη καυσαερίων (1/2)

- Ειδική θερμότητα καυσαερίων:

$$c_{p_v} \Big|_0^T = \sum_i \xi_i c_{p_i} \Big|_0^T$$

- $\xi_i$ : τα ποσοστά μάζας των μεμονωμένων συστατικών του καυσαερίου.
- $c_{p_i} \Big|_0^T$ : οι μέσες ειδικές θερμότητες των συστατικών.



# Χαρακτηριστικά μεγέθη καυσαερίων (2/2)

- *Σημείο δρόσου* υγρών καυσαερίων: η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η συμπύκνωση των υδρατμών που περιέχονται στο καυσαέριο.
- Η μερική πίεση των υδρατμών στα υγρά καυσαέρια (από την οποία προκύπτει το σημείο δρόσου) δίνεται από τη σχέση:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = X_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p$$

- $X_{\text{H}_2\text{O}}$  : το μοριακό ποσοστό (ποσοστό moles) των υδρατμών στα υγρά καυσαέρια
- $p$  : η πίεση του μίγματος του καυσαερίου.



# Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας (καύσης) (1/2)

- Είναι η θερμοκρασία των προϊόντων της καύσης όταν δεν υπάρχει ακτινοβολία θερμότητας προς τις επιφάνειες της εστίας.
- Είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να έχουν τα προϊόντα της καύσης.



# Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας (καύσης) (2/2)

$$T_{\text{ad}} = \frac{H_u + \lambda l_{\text{min}} c_{\text{PL}} \Big|_0^{T_1} \cdot T_1}{m_g \cdot c_{\text{pv}}^0 \Big|_0^{T_{\text{ad}}}}$$

- $H_u$  : θερμογόνος δύναμη
- $\lambda$  : λόγος αέρα
- $l_{\text{min}}$  : ελάχιστη ανάγκη σε αέρα
- $T_1$  : θερμοκρασία του αέρα
- $c_{\text{PL}} \Big|_0^{T_1}$  : ειδική θερμότητα αέρα
- $c_{\text{pv}}^0 \Big|_0^{T_{\text{ad}}}$  : ειδική θερμότητα καυσαερίων



# Βαθμός απόδοσης εστίας (1/2)

- Η θερμότητα που αφαιρείται από την εστία και χρησιμοποιείται π.χ. για την παραγωγή ατμού είναι μέρος της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου. Σαν *βαθμός απόδοσης* της εστίας ορίζεται ο λόγος της θερμότητας αυτής προς τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου.



# Βαθμός απόδοσης εστίας (1/2)

- $$\eta_F = \frac{q}{H_u} = \frac{h(T_1, T_B) - h(T_A)}{H_u}$$

- $h(T_1, T_B)$  : η ενθαλπία του μίγματος καυσίμου-αέρα.
- $h(T_A)$  : η ενθαλπία των καυσαερίων στην θερμοκρασία εξόδου τους  $T_A$  από την εστία.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζηαθανασίου Βασίλειος, Καδή Στυλιανή. «ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. Καύση». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS427/>.





# 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, Χειμερινό εξάμηνο 2014-2015



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.

