

# Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και εναλλακτικές πηγές ενέργειας

## Εισαγωγή

Η παραγωγή ενέργειας με καύση συμβατικών ορυκτών καυσίμων και προϊόντων τους είναι η συνηθέστερη μέθοδος παραγωγής διαφόρων μορφών ενέργειας (ηλεκτρική, θερμική κλπ.).

Η αντίδραση της καύσης είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα οξείδωσης και αναγωγής. Κατά την καύση, επειδή οι αντιδράσεις του άνθρακα και του υδρογόνου με το οξυγόνο του αέρα προς παραγωγή  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$  είναι εξώθερμες, παράγεται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας και φωτεινής ακτινοβολίας (φώς). Μέρος της παραγόμενης θερμότητας καταναλώνεται για τη διατήρηση του νερού υπό μορφή υδρατμών και απάγεται με τα καπναέρια στο περιβάλλον και η υπόλοιπη αξιοποιείται ως θερμική ενέργεια ή μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας (πχ. ηλεκτρική), αφού όμως προηγουμένως η θερμική ενέργεια μετατρέψει ποσότητα νερού σε ατμό (ατμοηλεκτρικά εργοστάσια). Τα αέρια της καύσης είναι  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , υδρατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ ) και  $\text{NO}_x$  (μείγμα  $\text{NO}$  και  $\text{NO}_2$ ),  $\text{SO}_2$  εκπέμπονται μέσω των καμινάδων των σταθμών παραγωγής ενέργειας στην ατμόσφαιρα με δέσμευση των λεπτομερών εκπομπών (λεπτομερή τεμαχίδια τέφρας) ή επικίνδυνων αερίων (π.χ.  $\text{SO}_2$ ).

## 1. Καύσιμα

Τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα ή προϊόντα τους που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ενέργειας διακρίνονται σε:

- **Στερεά καύσιμα**

Στα στερεά καύσιμα περιλαμβάνονται οι ορυκτοί άνθρακες (βιτουμενιούχοι άνθρακες, ανθρακίτες λιγνίτες, τύρφη κλπ.). Ως στερεά καύσιμα θεωρούνται ακόμη η βιομάζα και τα άχρηστα αστικά στερεά απορρίμματα (άχρηστα ελαστικά, πλαστικά, αποξηραμένη ιλύς εγκαταστάσεων βιολογικών καθαρισμών κλπ.).

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά (φυσικές και χημικές ιδιότητες) των στερεών ορυκτών καυσίμων που ενδιαφέρουν για τη χρήση τους στην παραγωγή ενέργειας είναι τα παρακάτω:

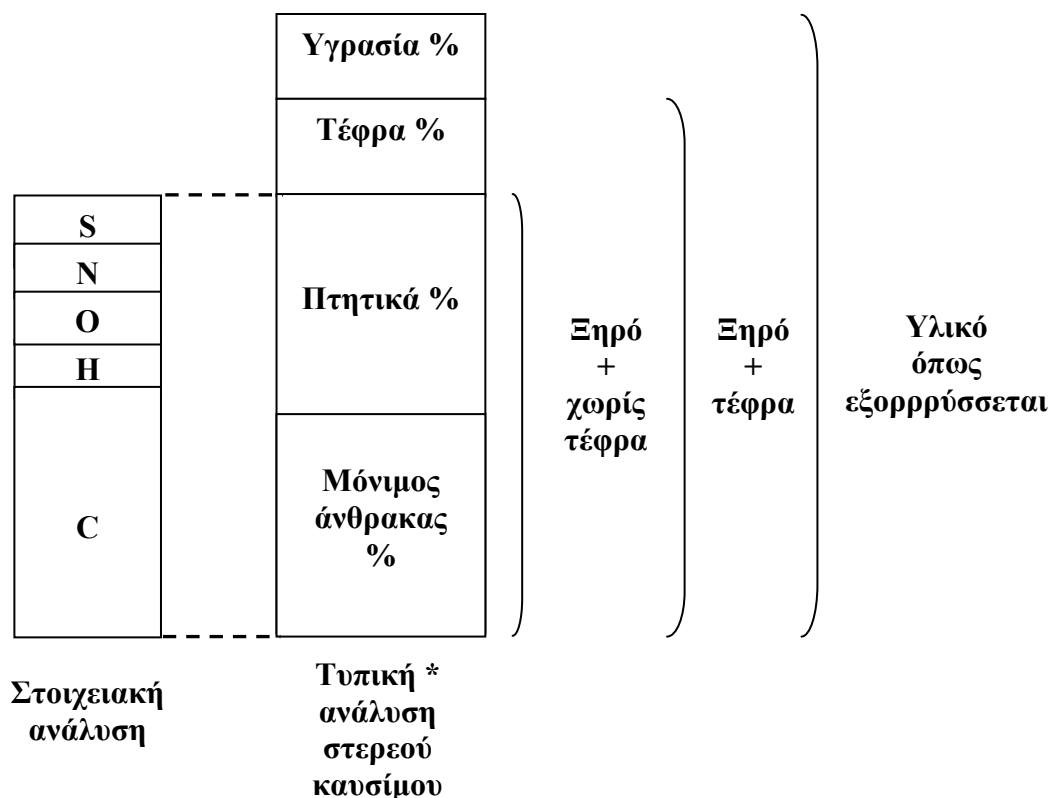
1. Η θερμογόνο δύναμη ή το θερμικό τους δυναμικό (Α.Θ.Δ., Η.Η.Υ. και Κ.Θ.Δ., Λ.Η.Υ.) δηλ. η περιεκτικότητά τους σε C, όπου:

- Α.Θ.Δ. (ανώτερη θερμογόνος δύναμη, **Higher Heating Value**) και
  - Κ.Θ.Δ. (κατώτερη θερμογόνος δύναμη, **Lower Heating Value**)
2. Η υγρασία του καυσίμου (όπως εξορύσσεται)
  3. Η περιεκτικότητά τους σε τέφρα (ανόργανες ύλες)
  4. Η κοκκομετρική τους ανάλυση
  5. Η αντοχή τους στη θραύση και λειοτρίβηση (δείκτης Hardgrove)
  6. Η επί τοις % περιεκτικότητά τους σε πτητικά (volatiles %)
  7. Οι επί τοις εκατό περιεκτικότητές τους σε S (θείο), Cl (χλώριο) και πτητιά μέταλλα (Hg, Cd κλπ.).

Πολύ σημαντικός για τη χρήση των στερεών καυσίμων είναι ο λόγος καυσίμου (fuel ratio), που δίνεται από την εξίσωση (1).

$$\text{Fuel ratio (F}_R\text{)} = \frac{\text{Μόνιμος άνθρακας}}{\text{Πτητικά}} \quad (1)$$

Τα στερεά καύσιμα αξιολογούνται με διάφορους τρόπους (αναλύσεις) που φαίνονται στο Σχήμα 1 (Zevenhoven; Καβουρίδης,1997).



\* Η τυπική ανάλυση του στερεού καυσίμου (**proximate analysis**) είναι ο ποσοτικός (%) προσδιορισμός με συγκεκριμένες μεθόδους (κατά ASTM) της υγρασίας, των πτητικών, του μόνιμου άνθρακα (με αφαίρεση) και της τέφρας του

Σχήμα 1. Μέθοδοι αξιολόγησης στερεών καυσίμων

Στο Σχήμα 2 δίνεται η κατάταξη, σύμφωνα με την *τυπική ανάλυση στερεών καυσίμων (proximate analysis)*, των διαφόρων τύπων αμερικανικών ορυκτών ανθράκων και του ελληνικού λιγνίτη. Από το διάγραμμα διαπιστώνεται η σημαντική διαφοροποίηση ως προς τη σύστασή του ελληνικού λιγνίτη από τους άλλους στερεούς ορυκτούς άνθρακες γεγονός που δικαιολογεί την πολύ χαμηλή θερμογόνο δύναμή του.

- **Αέρια καύσιμα**

Στα αέρια καύσιμα περιλαμβάνονται το φυσικό αέριο (κύριο συστατικό το μεθάνιο, CH<sub>4</sub>), αέριοι υδρογονάνθρακες βαρύτεροι του αιθανίου ( C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), που παράγονται από την απόσταξη πετρελαίου και αέρια από την εξαερίωση διαφόρων τύπων ανθράκων.

Για τη χρήση τους ενδιαφέρει η χημική τους σύσταση, η θερμογόνο δύναμή τους (Α.Θ.Δ. και Κ.Θ.Δ.), η ποσοστιαία (%) περιεκτικότητά τους σε S και η περιεκτικότητά τους σε αδρανή (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O).

- **Υγρά καύσιμα**

Τα υγρά καύσιμα είναι τα διάφορα κλάσματα απόσταξης αργού πετρελαίου (ελαφρά και βαρέα κλάσματα, το ντήζελ, η κηροζίνη κλπ.). Επίσης υγροί υδρογονάνθρακες (μεθανόλη, αιθανόλη) κ.α.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους που εξετάζονται για τη χρήση τους ως καυσίμων είναι:

1. Η θερμογόνος δύναμη
2. το ιξώδες
3. η πτητικότητα τους
4. το στερεό υπόλειμμα της καύσης και η περιεκτικότητά τους σε τέφρα
5. Η περιεκτικότητά τους σε H<sub>2</sub>O
6. Οι επί τοις εκατό περιεκτικότητές του σε S (θείο) και σε μεταλλικά συστατικά (Pb, V, Ni, Cu).

## **2. Θεωρητικός προσδιορισμός της ανώτερης θερμογόνου δύναμης (Α.Θ.Δ.) των συμβατικών ορυκτών καυσίμων**

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (Α.Θ.Δ.) των καυσίμων υπολογίζεται με τη βοήθεια θερμιδομέτρων.

- **Ανώτερη θερμογόνος δύναμη του ελληνικού λιγνίτη**

Για το θεωρητικό υπολογισμό της ΑΘΔ (HHV) του λιγνίτη λαμβάνεται υπόψη η θερμική ενέργεια που παράγει η πλήρης καύση (εξώθερμη αντίδραση) του C προς CO<sub>2</sub>, που ως γνωστόν είναι - **94030 cal/mol = -393.5 kJ/mol**.



Το αρνητικό πρόσημο (-94.03 kcal/mol) της αντίδρασης σημαίνει ότι κατά την καύση εκλύεται θερμότητα, δηλαδή η αντίδραση είναι έντονα εξώθερμη.

Άρα, από την καύση 12 g (1 mole) άνθρακα προκύπτει ενέργεια: (94030/12) = (7835.8 cal/g C) = **32.79 kJ / g C** (υπό μορφή CO<sub>2</sub>).

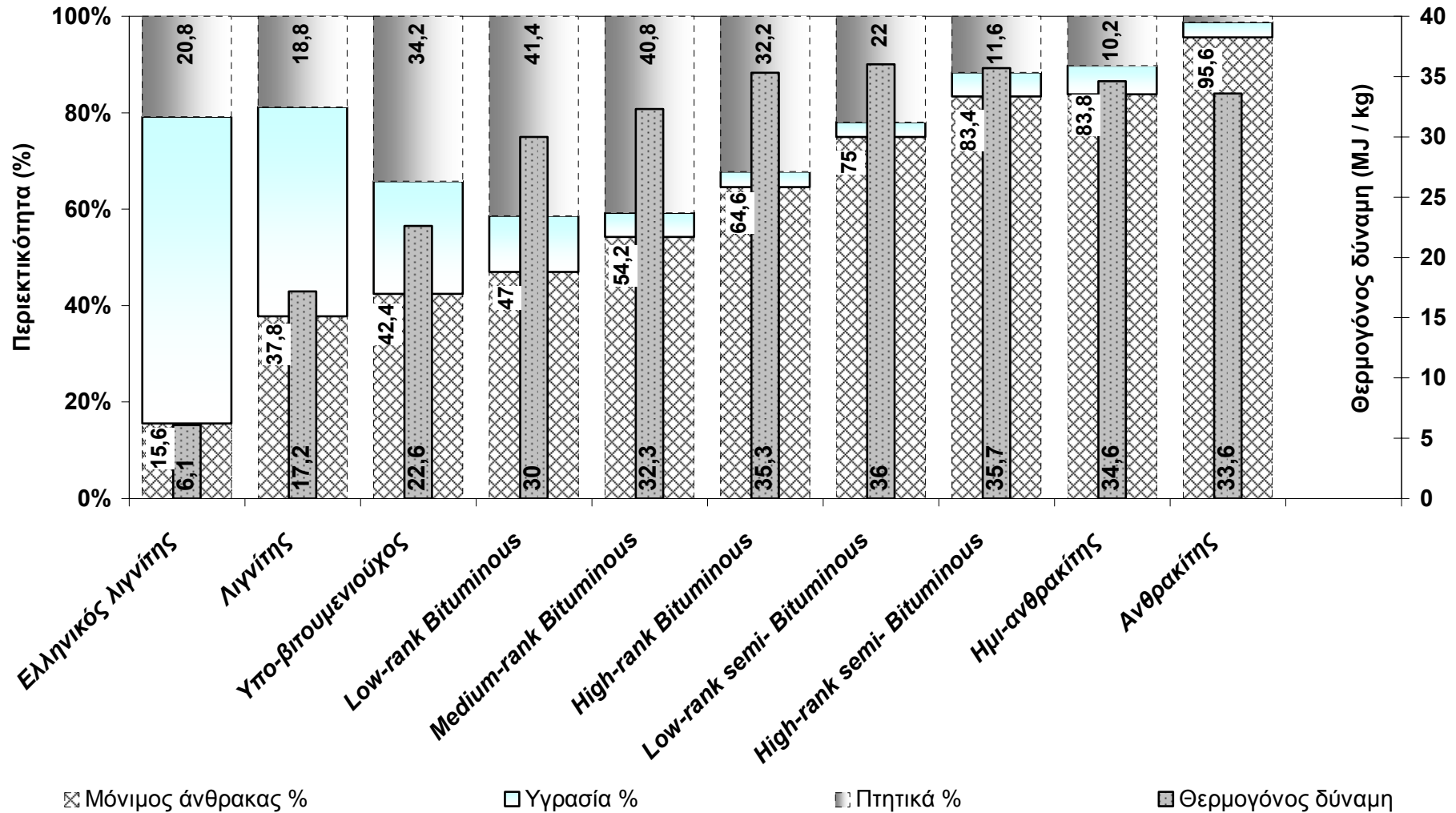
Επειδή όμως ο λιγνίτης Πτολεμαΐδας περιέχει μόνο 19% C (Μετிகάνης, 1997), η θερμογόνος δύναμή του είναι περίπου:

$$7835.8 \text{ cal/g C} \times 0.19 \times 0.9814 = 1461.1 \text{ cal/g ή}$$

**1461.1 kcal/kg λιγνίτη (ΑΘΔ) ή 6.12 MJ/kg λιγνίτη Πτολεμαΐδας,**

όπου 98.14% είναι το ποσοστό του οξειδούμενου άνθρακα.

Διάγραμμα κατάταξης ανθράκων (άνευ τέφρας) με αύξουσα περιεκτικότητα σε μόνιμο άνθρακα

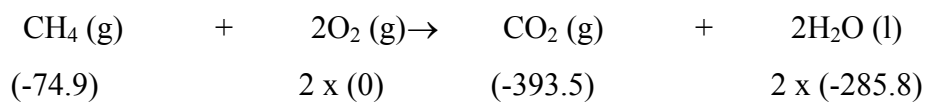


Σχήμα 1. Κατάταξη του ελληνικού λιγνίτη και των αμερικανικών ορυκτών ανθράκων (άνευ τέφρας) με αύξουσα περιεκτικότητα σε μόνιμο άνθρακα.

Η πραγματική τιμή της θερμογόνου δύναμης είναι μικρότερη ( $\approx 1380 \text{ kcal/kg}$ , **AΘΔ**) για τους λιγνίτες Πτολεμαΐδας εξαιτίας της μεγάλης ανομοιομορφίας στη σύστασή τους, ενώ η Κ.Θ.Δ. είναι (για τα στερεά καύσιμα) περίπου 4-5% χαμηλότερη της Α.Θ.Δ. δηλαδή περίπου  $1325 \text{ kcal/kg}$  στην περίπτωση του λιγνίτη Πτολεμαΐδας.

- **Θερμικό δυναμικό (ανώτερη θερμογόνος δύναμη, HHV) του μεθανίου ( $\text{CH}_4$ )**

Ο προσδιορισμός της Α.Θ.Δ. στην περίπτωση του μεθανίου προκύπτει από την αντίδραση οξείδωσης του μεθανίου προς  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$  (υγρό).



$$\Delta H = \sum H_{\text{προϊόντων}} - \sum H_{\text{αντιδρώντων}}$$

Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η ενθαλπία σχηματισμού του νερού (υπό υγρή μορφή) και η θερμότητα της αντίδρασης είναι η διαφορά της συνολικής ενθαλπίας σχηματισμού των προϊόντων και αυτής των αντιδρώντων.

$$\Delta H = [(-393.5) + 2 \times (-285.8)] - [(-74.9) + 2 \times (0)] = -890.2 \text{ kJ/mol } \text{CH}_4 \text{ (ενθαλπία αντίδρασης)}$$

$$\text{που ισοδυναμεί με: } \Delta H = (-890.2 \text{ kJ} / 22.4 \text{ L}) = -39.74 \text{ kJ/L } \text{CH}_4 = -39.74 \text{ MJ/m}^3 \text{ CH}_4.$$

Και στην περίπτωση αυτή η αντίδραση είναι εξώθερμη.

Στην παραπάνω τιμή της ενθαλπίας περιέχεται και η θερμότητα που ανακτάται από την υγροποίηση του παραγόμενου ατμού και αντιστοιχεί στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη (Α.Θ.Δ.) του  $\text{CH}_4$ .

Η αντίστοιχη τιμή για την Κ.Θ.Δ. είναι περίπου 10% μικρότερη (για τα αέρια καύσιμα) δηλαδή  $0.9 \times (-890.2 \text{ kJ/mol}) = -802 \text{ kJ/mol}$ .

Οι τιμές αυτές για το φυσικό αέριο είναι ελάχιστα μικρότερες (Α.Θ.Δ,  $38.3 \text{ MJ/m}^3$ ) και η αντίστοιχη Κ.Θ.Δ. είναι  $34.4 \text{ MJ/m}^3$ , λόγω του ότι το φυσικό αέριο δεν αποτελείται 100% από μεθάνιο, αλλά έχει τη σύνθεση που δίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1.Τυπική σύνθεση φυσικού αερίου*		
Methane - Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	70-90%
Ethane - Αιθάνιο	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0-20%
Propane - Προπάνιο	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	
Butane - Βουτάνιο	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	
Carbon Dioxide - Διοξείδιο άνθρακα	CO <sub>2</sub>	0-8%
Oxygen - Οξυγόνο	O <sub>2</sub>	0-0.2%
Nitrogen - Άζωτο	N <sub>2</sub>	0-5%
Hydrogen sulphide- Διοξείδιο του θείου	H <sub>2</sub> S	0-5%
Rare gases - Σπάνια αέρια	A, He, Ne, Xe	Ίχνη

\*Πηγή: Natural Gas.org

\*Source: Natural Gas.org

### 3. Μέθοδοι παραγωγής Η.Ε. με χρήση συμβατικών ορυκτών καυσίμων και προϊόντων τους

Οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση συμβατικών ορυκτών καυσίμων είναι:

- οι συμβατικές (Σχήμα 7) με καύση του καυσίμου για θέρμανση νερού και παραγωγή ατμού, περιστροφή ατμοστροβίλων και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια γεννητριών και
- οι εξελιγμένες (συνδυασμένος κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αεριοστροβίλους και ατμοστροβίλους ή συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας ή συνδυασμός των παραπάνω) με δυνατότητα χρήσης όλων των τύπων ορυκτών καυσίμων (Σχήματα 5 και 6) με στόχους:
  - την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης
  - τη μείωση της κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ορυκτά καύσιμα) και
  - τη μείωση των αερίων εκπομπών (π.χ. χρήση φυσικού αερίου) για προστασία του περιβάλλοντος.

- **Ενεργειακή απόδοση μεθόδων παραγωγής ενέργειας**

Η πραγματική ενεργειακή απόδοση (π.χ. ηλεκτρική ενέργεια) από την καύση των καυσίμων είναι υποπολλαπλάσια της ενέργειας (θερμότητα) που απελευθερώνεται από την αντίδραση καύσης τους και κυμαίνεται από 30-60% για τα διάφορα καύσιμα (άνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και μεθόδους παραγωγής ενέργειας (συμβατικές θερμικές, συνδυασμένου κύκλου παραγωγής θερμότητας και ατμού, fuel cells κλπ.). Στο γεγονός αυτό, της χαμηλής συνολικής ενεργειακής απόδοσης (μη τέλεια καύση και θερμικές απώλειες στο σύστημα και επίσης κατά τη μετατροπή από μια μορφή ενέργειας σε άλλη), οφείλεται η μεγάλη παραγωγή αερίων εκπομπών του θερμοκηπίου ανά μονάδα εισαγόμενης ή παραγόμενης ενέργειας και η σημαντική συμβολή άλλων αερίων εκπομπών (SO<sub>2</sub>, CO) στο φαινόμενο της *όξινης βροχής* και στην αιθαλομίχλη.

Οι εκπομπές **CO<sub>2</sub> (κύριο αέριο του θερμοκηπίου)** κατά τη λειτουργία σταθμών παραγωγής ενέργειας (π.χ. ηλεκτροπαραγωγή) εξαρτώνται τόσο από τη φύση του ορυκτού καυσίμου (λιθάνθρακας, λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο κλπ.), όσο και από την απόδοση καύσης (combustion efficiency) της μονάδας παραγωγής ενέργειας (τεχνολογική εξέλιξη της μεθόδου ή εφαρμογή μεθόδων συνδυασμένου κύκλου με συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας ή ατμού κλπ.)

Το είδος καυσίμου καθορίζει τις ιδιότητές του (χημική σύσταση, υγρασία, χημικός τύπος καυσίμου, ποσοστό μόνιμου άνθρακα κλπ.) δηλαδή το θερμικό δυναμικό του και τη συμπεριφορά του κατά την καύση.

Σήμερα κατά κύριο λόγο στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούνται ως καύσιμα ο άνθρακας (διάφοροι τύποι γαιανθράκων, λιγνίτες κλπ.), αλλά επίσης πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Τα τελευταία χρόνια επεκτείνεται ραγδαία η χρήση του φυσικού αερίου στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με χρήση μεθόδων συμπαραγωγής (cogeneration) λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει ως καύσιμο, τα οποία είναι:

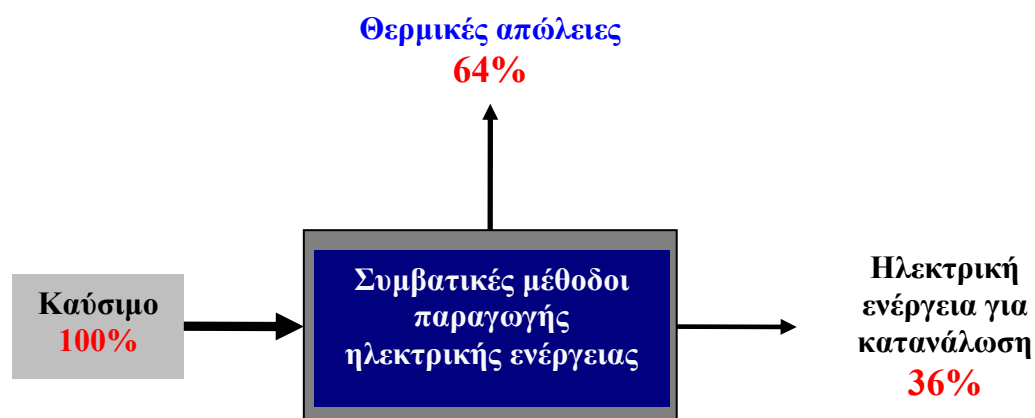
- η σχετικώς χαμηλή τιμή του ανά μονάδα όγκου ή θερμικού δυναμικού
- οι χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>
- οι ασήμαντες εκπομπές λεπτομερών τεμαχιδίων στην ατμόσφαιρα λόγω απουσίας ανοργάνων υλών (τέφρα) στο καύσιμο και
- οι ελάχιστες ή απουσία εκπομπών SO<sub>2</sub>

Τα παραπάνω ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου και οι τεχνολογικές εξελίξεις στους ηλεκτρομηχανολογικούς τομείς έδωσαν τη δυνατότητα αύξησης της ενεργειακής απόδοσης στον Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και από εναλλακτικές πηγές ενέργειας 9  
**Τσακαλάκης Κώστας**, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.– Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών

τομέα της παραγωγής ενέργειας (ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα) με εφαρμογή μεθόδων συμπαραγωγής. Οι μέθοδοι αυτές έχουν ως βασικές αρχές αυτές των συμβατικών μεθόδων και επιπλέον εκμεταλλεύονται τη μείωση των θερμικών απωλειών με ανάκτηση της θερμότητας των απαερίων της καύσης. Μεγάλο μέρος της θερμότητας των απαερίων δεσμεύεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού και χρήση του είτε για την παραγωγή συμπληρωματικής Η.Ε. (συνδυασμένος κύκλος, Σχήμα 6), είτε για την αξιοποίηση της θερμότητάς του σε θέρμανση, ξήρανση κλπ., είτε ταυτόχρονα και για τις δυο μορφές ενέργειας (συμπαραγωγή Η.Ε. και θερμότητας), (Σχήμα 5).

Οι χαμηλές εκπομπές περιβαλλοντικά βλαπτικών αερίων και λεπτομερών τεμαχιδίων και η σχετικώς χαμηλή τιμή του επέτρεψε τη χρήση του φυσικού αερίου σε μονάδες παραγωγής ενέργειας μέσα σε κατοικημένες περιοχές δηλαδή στη θέση κατανάλωσης της ενέργειας. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ελάττωση των θερμικών απωλειών στις φάσεις μεταφοράς και διανομής Η.Ε. και είχε ως επακόλουθο την παραπέρα αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των μεθόδων συνδυασμένου κύκλου και συμπαραγωγής και τη συνακόλουθη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.

Το κόστος μιας μονάδας συμπαραγωγής είναι μεν μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής μονάδας αλλά εξισοροπείται από τα σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η διεργασία.



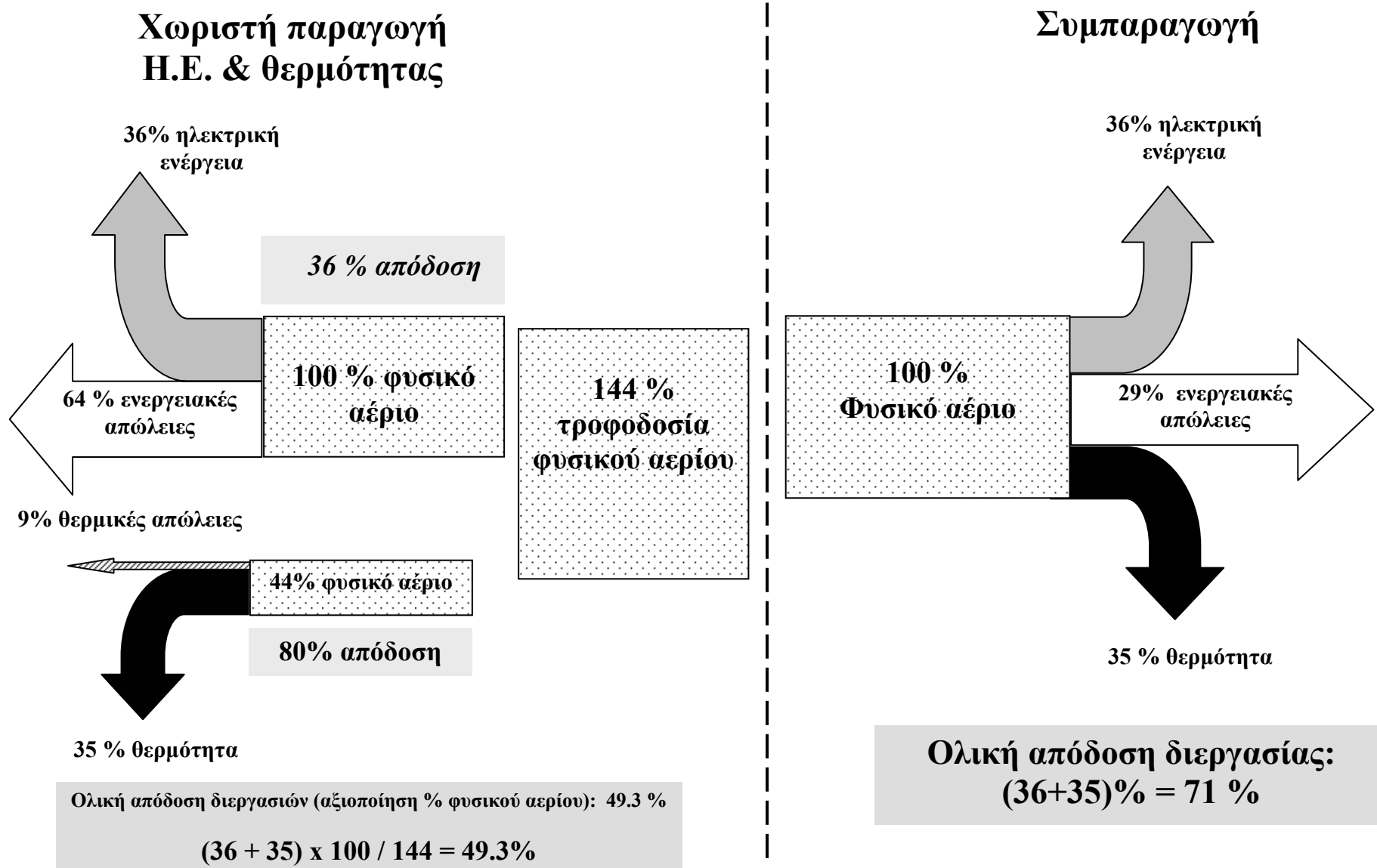
Σχήμα 2. Απλοποιημένο ισοζύγιο ενέργειας σε συμβατική μέθοδο παραγωγής Η.Ε.



Σχήμα 3. Απλοποιημένο ισοζύγιο ενέργειας για μέθοδο συμπαραγωγής Η.Ε. και θερμότητας

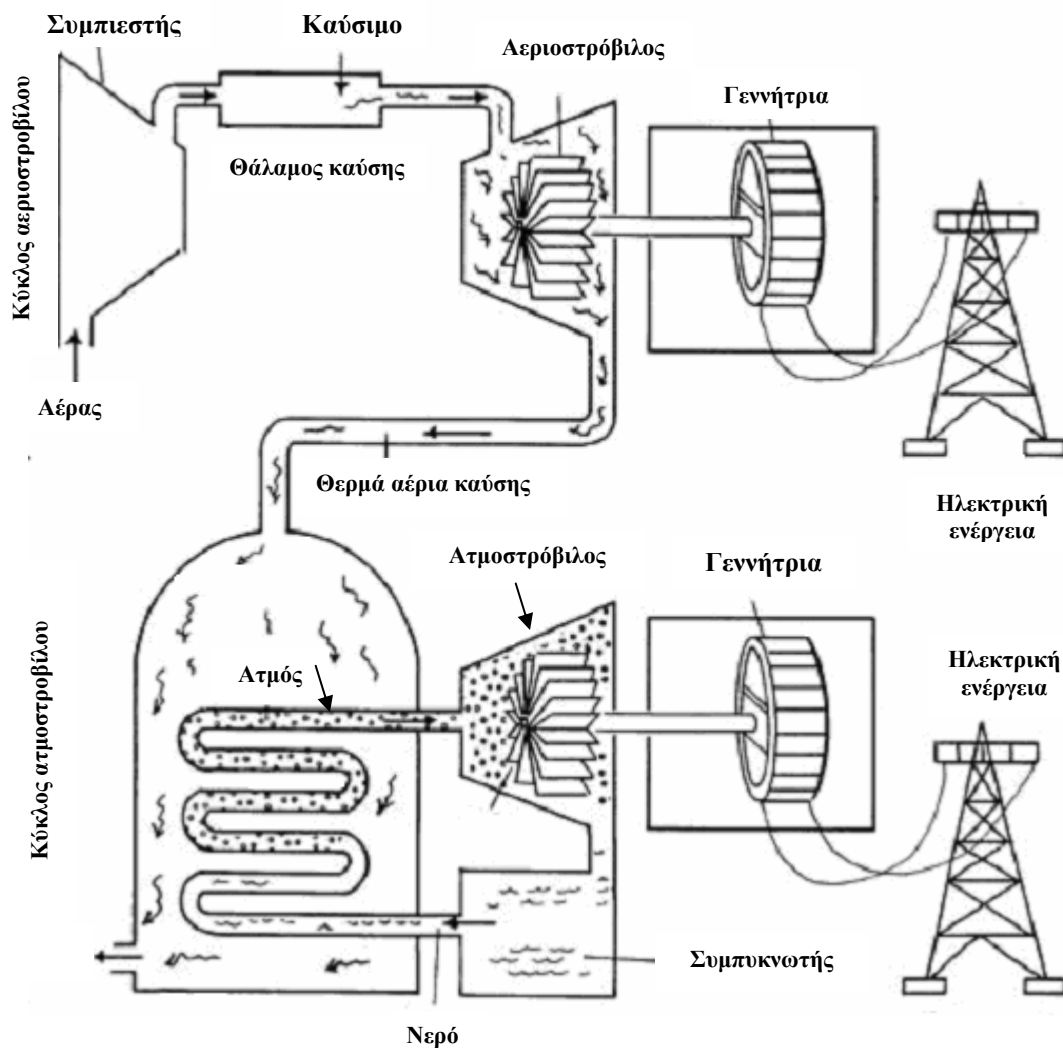
Στα Σχήματα 2 και 3 είναι φανερή η μείωση των θερμικών απωλειών και γίνονται αντιληπτά τα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή των μεθόδων συμπαραγωγής.

Από το Σχήμα 4 διαπιστώνεται η ποσοστιαία μείωση (44%) στην κατανάλωση καυσίμου για την παραγωγή ίδιας ποσότητας συνολικής ενέργειας. Επίσης, απεικονίζει την ποσοστιαία (%) κατανομή της χρήσιμης ενέργειας (χωρίς τις θερμικές απώλειες) που λαμβάνεται με την εφαρμογή της μεθόδου συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (50.7% και 49.3%, αντίστοιχα).



Σχήμα 4. Σύγκριση του ενεργειακού ισοζυγίου συμβατικής μεθόδου παραγωγής Η.Ε. και μεθόδου συμπαραγωγής Η.Ε. και θερμότητας





Σχήμα 6. Συνδυασμένος κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (αεριοστρόβιλος & ατμοστρόβιλος).

- **Απλοποιημένη εξήγηση της απόδοσης καύσης**

Για να εξηγηθεί η απόδοση της καύσης ορυκτών καυσίμων παρατίθεται το παρακάτω απλοποιημένο παράδειγμα παραγωγής και κατανάλωσης θερμικής ενέργειας.

**Υπολογισμός της απαιτούμενης ενέργειας (σε Btu) για την εξάτμιση 1 lb (453.6 g) νερού**

Η αρχική θερμοκρασία του νερού είναι 15.5 °C (60 °F) και η τελική του ατμού 100 °C (212 °F).

Από τον ορισμό είναι γνωστό ότι 1 Btu είναι η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας 1 lb (453.6 g) νερού κατά 1 °F.

Για να γίνει η εξάτμιση πρέπει πρώτα να γίνει βρασμός και κατόπιν μετατροπή του νερού των 100 °C (212 °F) σε ατμό.

Για την εξάτμιση 1 lb (453.6 g) νερού υπολογίζεται ότι η θερμότητα που απαιτείται είναι:

$$\text{Θερμότητα βρασμού} + \text{θερμότητα εξάτμισης} = 1122 \text{ Btu} = 1122 \times 1.055 \text{ kJ} = 1183.7 \text{ kJ}$$

Όπου:

1. Για το βρασμό η απαιτούμενη θερμότητα είναι: (1 lb νερού) x (1 Btu/lb· °F) x (212 – 60)°F = **152 Btu = 160.4 kJ (13.55%)**
2. Για την εξάτμιση 1 lb (453.6 g) νερού η θερμότητα εξάτμισης είναι: **970 Btu = 1023.4 kJ (86.45%)**

Έστω ότι θα χρησιμοποιηθεί φυσικό αέριο (CH<sub>4</sub>) για την ατμοποίηση του νερού. Είναι γνωστό ότι το θερμικό δυναμικό του φυσικού αερίου θερμοκρασίας 15.5 °C (60 °F) είναι: **1027 Btu / ft<sup>3</sup>** φυσικού αερίου = **36268 Btu/m<sup>3</sup>** φυσικού αερίου = **38263 kJ / m<sup>3</sup>** φυσικού αερίου = **38.26 MJ/m<sup>3</sup>** (A.G.A., H.H.V.) φυσικού αερίου.

Η τέλεια καύση του 1 ft<sup>3</sup> φυσικού αερίου θα απελευθερώσει θερμότητα 1027 Btu και θα παράγει ως προϊόντα CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O. Η θερμοκρασία των παραγόμενων αερίων (CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O) κατά την καύση είναι περίπου 982 °C (1800 °F).

Η μεταφορά της θερμότητας καύσης μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας στο νερό θα προκαλέσει πρώτα βρασμό και στη συνέχεια εξάτμισή του. Η επαφή των θερμών αερίων (982 °C), μέσω του εναλλάκτη, με το νερό (15.6 °C) θα μειώνει τη θερμοκρασία των αερίων και θα αυξάνει τη θερμοκρασία του νερού μέχρι να προκληθεί βρασμός και στη συνέχεια εξάτμισή του. Η απόδοση της διεργασίας θα ήταν 100% αν η τελική θερμοκρασία των αερίων από 982 °C γινόταν 15.6 °C.

Όμως, όπως είναι φανερό, η θερμοκρασία των αερίων δεν μπορεί να κατέλθει κάτω από τους 100 °C (212 °F) που είναι η θερμοκρασία έναρξης ατμοποίησης του νερού, επειδή πλέον δεν θα λάμβανε χώραν ανταλλαγή θερμότητας (αδύνατη η θέρμανση νερού θερμοκρασίας 100 °C από αέρια θερμοκρασίας 15.6 °C για να προκληθεί εξάτμιση).

Η απαγωγή όμως από το σύστημα αερίων, που έχουν θερμοκρασία τουλάχιστον 100 °C, αποτελεί ενεργειακή απώλεια (**waste heat**), που στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί στη θερμότητα βρασμού του νερού του παραδείγματος και ανέρχεται σε 13.55% του θερμικού δυναμικού του καυσίμου δηλ. 0.1355 x 1027 Btu = 139.2 Btu. Αν επίσης ληφθεί υπόψη ένα

Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και από εναλλακτικές πηγές ενέργειας 15  
**Τσακαλάκης Κώστας**, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.– Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών

πρόσθετο (5-10%) ποσοστό απωλειών στα τοιχώματα του εναλλάκτη θερμότητας, τότε η τελική % απόδοση σε ιδανικές συνθήκες καύσης θα κυμανθεί από 76.5-81.5%. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η διαθέσιμη ενέργεια (**Net heat**) ανέρχεται στο 76.5-81.5% της αρχικά διατιθέμενης (θερμικό δυναμικό του καυσίμου).

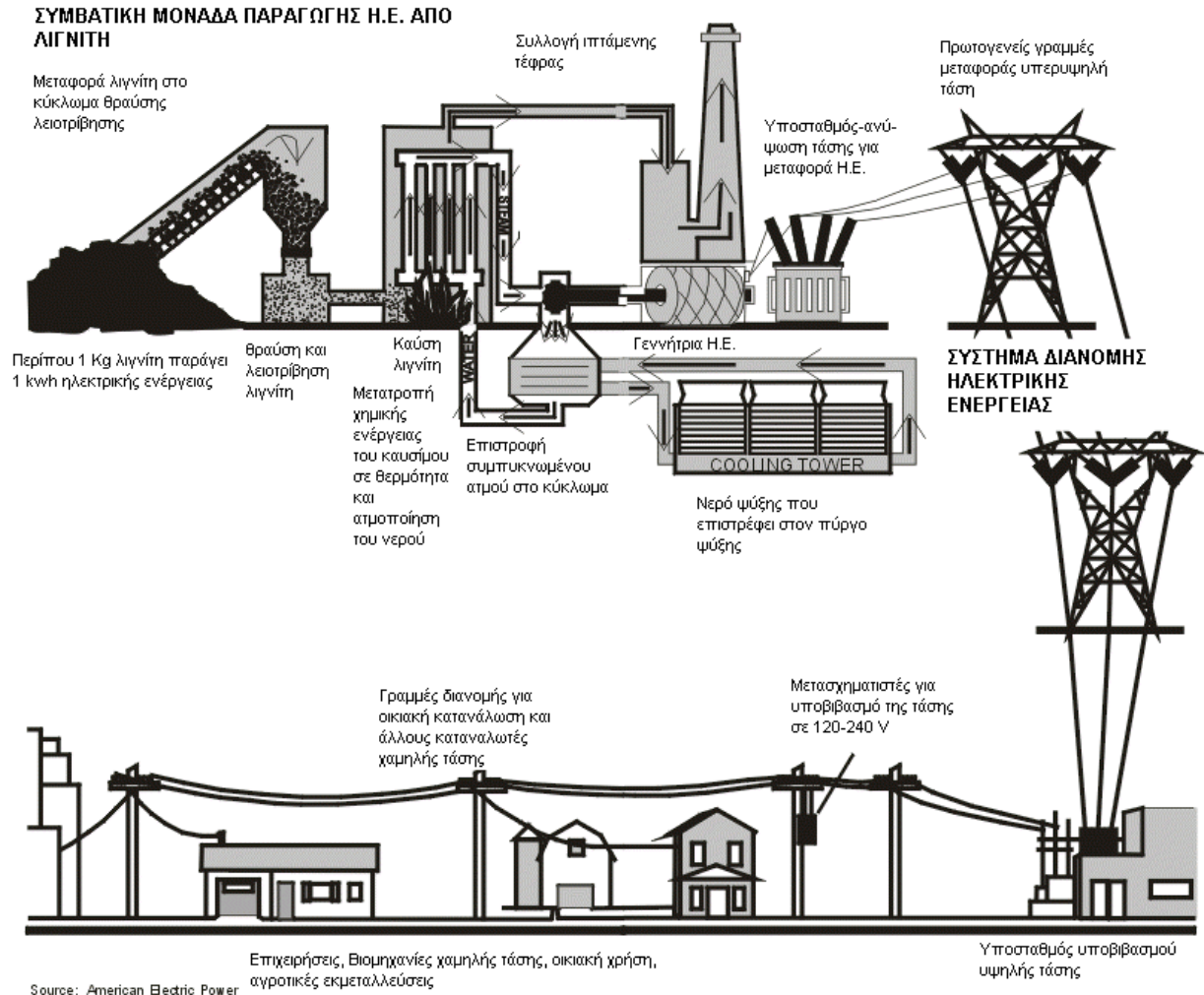
Είναι γνωστό ότι, από όλα τα ορυκτά καύσιμα, το φυσικό αέριο (κυρίως είναι CH<sub>4</sub>) κατά την καύση του έχει τη μεγαλύτερη διαθέσιμη ενέργεια ανά μονάδα βάρους περιεχόμενου C ή όγκου εκπεμπόμενων αερίων ( Πίνακας 3).

#### **4. Διεργασίες παραγωγής Η.Ε. σε τυπική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο λιγνίτη**

Οι βασικές διεργασίες παραγωγής Η.Ε. περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- Ο εξορυσσόμενος λιγνίτης μεταφέρεται με μεταφορικές ταινίες στη μονάδα θραύσης
- Θραύεται πρωτογενώς και μεταφέρεται στη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής
- Λειοτριβείται σε λεπτομερές μέγεθος τεμαχίων
- Ο λειοτριβημένος λιγνίτης αναμειγνύεται με αέρα και εισάγεται στο θάλαμο καύσης όπου καίγεται προς παραγωγή θερμότητας (μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμότητα)
- Μεγάλες ποσότητες καθαρού νερού αντλούνται και κυκλοφορούν σε σωληνώσεις μέσα στο θάλαμο καύσης
- Το νερό προσλαμβάνει την εκλυόμενη θερμότητα από την καύση και μετατρέπεται σε υπέρθερμο και υψηλής πίεσης ατμό
- Ο ατμός οδηγείται με σωληνώσεις σε ατμοστροβίλους που μετατρέπουν την ενέργεια του ατμού σε κινητική ενέργεια
- Η κινητική ενέργεια του ατμοστροβίλου παράγει με τη βοήθεια μιας γεννήτριας ηλεκτρική ενέργεια
- Η ηλεκτρική ενέργεια μετασχηματίζεται σε υψηλής τάσης Η.Ε. και οδηγείται στο σύστημα μεταφοράς
- Η τάση της Η.Ε. υποβιβάζεται όταν φθάσει κοντά στους καταναλωτές και διανέμεται στους χρήστες
- Ο θερμός ατμός των ατμοστροβίλων οδηγείται στο κύκλωμα συμπύκνωσης και επιστρέφει με τη μορφή νερού στο κύκλωμα ατμοποίησης του θαλάμου καύσης

- Το νερό ψύξης του θερμού ατμού επιστροφής των αεριοστροβίλων θερμαίνεται και αυτό και αφού περάσει από εναλλάκτες θερμότητας επιστρέφει στη λίμνη από την οποία αντλήθηκε έχοντας αυξημένη θερμοκρασία.



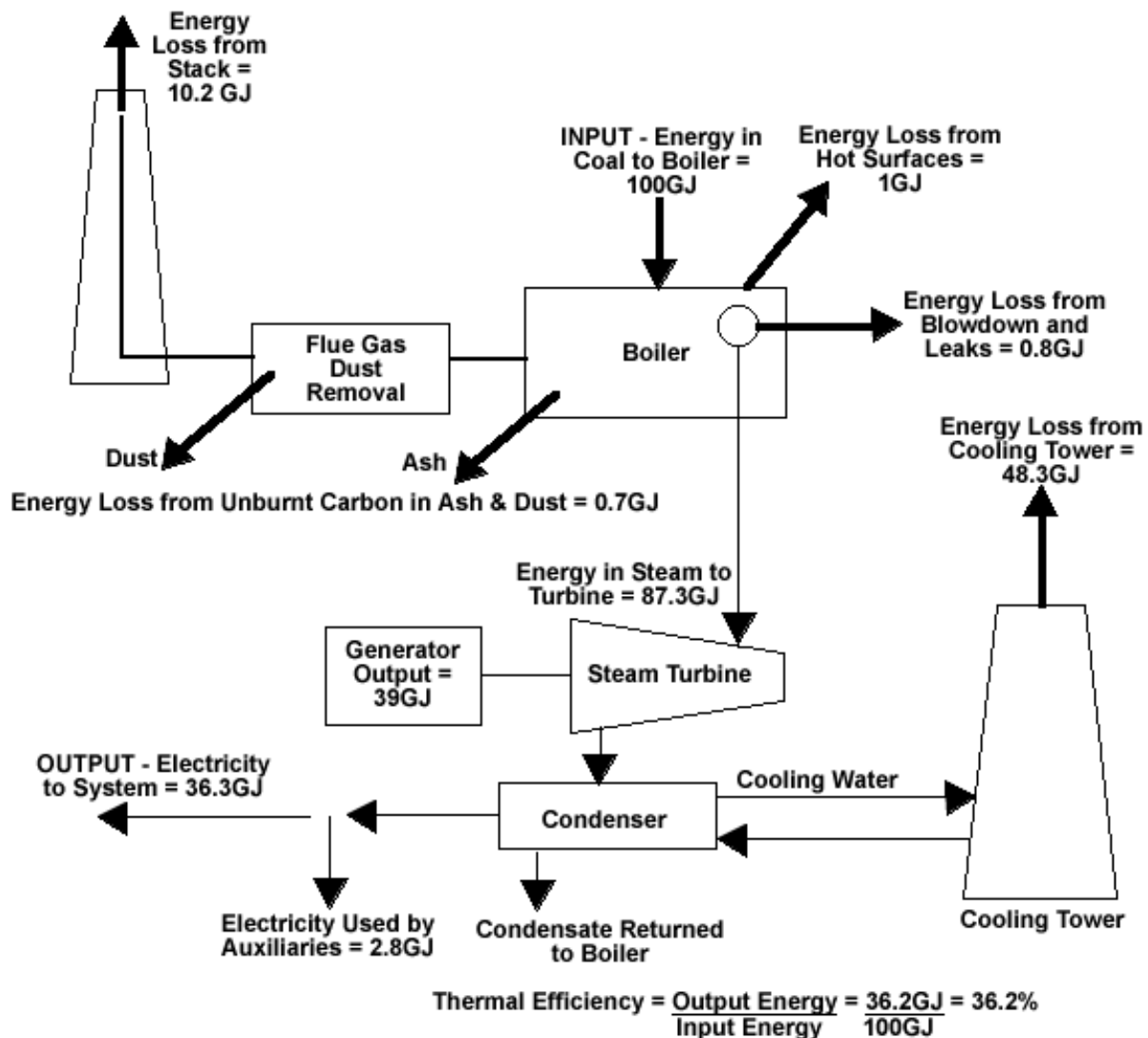
Σχήμα 7. Διάταξη ατμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύσιμο λιγνίτη (Πηγή: American Electric Power).

- **Απώλειες θερμότητας σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**

Οι απώλειες της παραγόμενης θερμότητας οφείλονται σε:

- άνθρακα του καυσίμου που δεν κάηκε για την παραγωγή ενέργειας και καταλήγει στην τέφρα του πυθμένα του θαλάμου καύσης
- απώλειες θερμότητας στα απαέρια

- απώλειες θερμότητας που έχουν σχέση με τη θερμότητα που χάνεται για την εξάτμιση της υγρασίας του καυσίμου
- απώλειες θερμότητας που οφείλονται στην εξάτμιση της υγρασίας του αέρα καύσης
- απώλειες θερμότητας που οφείλονται στην αντίδραση του υδρογόνου του καυσίμου με τον αέρα
- απώλειες ενέργειας που οφείλονται στην ατελή καύση του άνθρακα και έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό CO αντί CO<sub>2</sub>
- απώλειες θερμότητας που οφείλονται στην ακτινοβολία από τις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας



Σχήμα 8. Ενεργειακό ισοζύγιο τυπικής μονάδας παραγωγής Η.Ε. με καύσιμο άνθρακα

(Πηγή: Australia, Queensland Government, Department of Energy)

(Source: Australia, Queensland Government, Department of Energy)

- **Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας σε τυπική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύσιμο ελληνικό λιγνίτη**

Οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα (ατμοηλεκτρικοί σταθμοί) με καύσιμο λιγνίτη έχουν τροφοδοσία καυσίμου με θερμικό δυναμικό 6.12 MJ/kg (λιγνίτης Πτολεμαΐδας) και περιεχόμενο μόνιμο άνθρακα (Μετικάνης, 1997) 19% στον εξορυσσόμενο λιγνίτη (ως έχει). Γίνεται η υπόθεση ότι η απόδοση της μονάδας είναι 37% (energy efficiency) δηλαδή από 2.7 μονάδες περιεχόμενης (εισαγόμενης) ενέργειας στο καύσιμο, η ενέργεια που παράγεται υπό μορφή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 1 μονάδα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για την παραγωγή **1 kWh Η.Ε. (860 kcal)** και για απόδοση ατμοηλεκτρικού σταθμού 37% απαιτούνται **θεωρητικά:**  $860/0.37 = 2324.32$  kcal θερμικής ενέργειας από το λιγνίτη, δηλαδή περίπου:

$$2324.32 \text{ kcal} / 1461.1 \text{ kcal/kg λιγνίτη} = \mathbf{1.6 \text{ kg λιγνίτη Πτολεμαΐδας} / \text{kWh}}$$

Για τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ, τα όρια για τις αέριες εκπομπές είναι 260 g διοξειδίου του θείου ανά  $10^6$  kJ «εισαγόμενης» ενέργειας στη μονάδα (130 g στοιχειακού θείου/ $10^6$  kJ). Γίνεται η υπόθεση ότι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε S είναι 2% και σε τέφρα 17.5% και ότι το 70% περίπου της περιεχόμενης τέφρας (12.25% της συνολικά περιεχόμενης στο καύσιμο) απελευθερώνεται ως ιπτάμενη τέφρα (fly ash) και το υπόλοιπο 5.25% συλλέγεται στον πυθμένα του θαλάμου καύσης.

1. Να υπολογιστούν οι εκπομπές SO<sub>2</sub>, λεπτομερών τεμαχιδίων και C (υπό μορφή CO<sub>2</sub>), με την υπόθεση ότι όλη η ποσότητα του περιεχόμενου άνθρακα καταλήγει στην ατμόσφαιρα;
2. Ποιά πρέπει να είναι η απόδοση του συστήματος ελέγχου εκπομπών SO<sub>2</sub>; ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί που αφορούν στις εκπομπές του στην ατμόσφαιρα;
3. Ποιά είναι η απόδοση των ηλεκτροστατικών φίλτρων, αν οι εκπομπές λεπτομερών τεμαχιδίων στα απαέρια είναι  $82 \text{ g}/10^6 \text{ kJ} = 82 \text{ g}/\text{GJ}$  εισαγόμενης ενέργειας,
4. Ποιά θα πρέπει να είναι η απόδοση των ηλεκτροστατικών φίλτρων για να ικανοποιούνται τα διεθνώς αποδεκτά όρια λεπτομερών εκπομπών ( $13 \text{ g}/\text{GJ}$  εισαγόμενης ενέργειας) ;

Από τον παραπάνω πίνακα υπολογίζεται ότι  $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$ . Για την παραγωγή  $1 \text{ kWh}$  ηλεκτρικής ενέργειας με θερμική απόδοση  $37\%$ , απαιτείται η καύση ορυκτού καυσίμου με θερμικό δυναμικό  $9720 \text{ kJ} = 2.7 \times 3600 \text{ kJ} = 2.7 \text{ kWh}$ .

Από τα δεδομένα του προβλήματος προκύπτει ότι οι εκπομπές στοιχειακού θείου (S) στην ατμόσφαιρα, κατά την παραγωγή  $1 \text{ kWh}$ , είναι:

$$[130 \text{ g S} / 10^6 \text{ kJ}] \times 9720 \text{ kJ} / \text{kWh} = 1.264 \text{ g S} / \text{kWh}$$

Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε εκπομπές  $(64/32) \times 1.264 \text{ g S} / \text{kWh} = 2.528 \text{ g SO}_2 / \text{kWh}$ .

1. Για την παραγωγή  $1 \text{ kWh}$  καίονται  $(9720 \text{ kJ} / \text{kWh}) / (6.12 \text{ kJ} / \text{g καυσίμου}) = 1588.2 \text{ g}$  καυσίμου, που περιέχουν :  
 $0.19 \times 1588.2 \text{ g} = 301.8 \text{ g C}$   
 $0.02 \times 1588.2 \text{ g} = 31.8 \text{ g S}$  και  
 $0.175 \times 1588.2 \text{ g} = 277.94 \text{ g τέφρας}$

2. Από τα παραπάνω όμως προκύπτει ότι για την ικανοποίηση των περιβαλλοντικών απαιτήσεων πρέπει να δεσμευονται:

α.  $(31.8 - 1.264) \text{ g} = 30.536 \text{ g}$  εκπεμπόμενου S δηλαδή η απόδοση της διάταξης δέσμευσης (αποθείωσης) πρέπει να είναι:

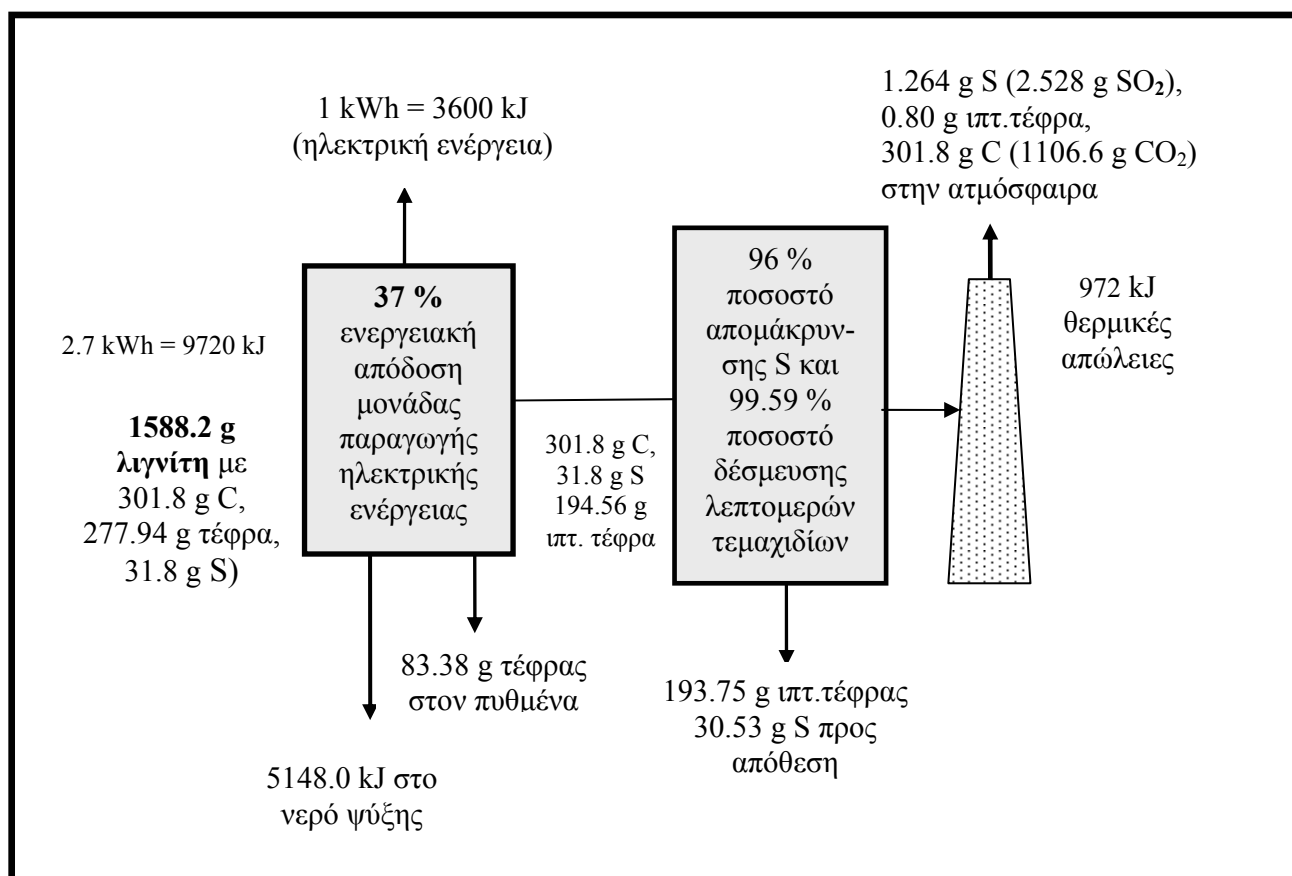
$$30.536 / 31.8 = 0.96 \text{ ή } 96\% \text{ και επίσης}$$

β.  $0.7 \times 17.5 \times 1588.2 \text{ g} - (82 \text{ g} / 10^6 \text{ kJ}) \times 9720 \text{ kJ} = (194.55 - 0.8) \text{ g} = 193.75 \text{ g}$  ιπτάμενης τέφρας, δηλαδή η απόδοση των ηλεκτροστατικών φίλτρων πρέπει να είναι

$$193.75 / 194.55 = 0.9959 \text{ ή } 99.59\%$$

Για να επιτευχθούν τα διεθνώς αποδεκτά όρια εκπομπών αιωρούμενων τεμαχιδίων ( $13 \text{ g} / 10^6 \text{ kJ}$ ) το ποσοστό δέσμευσής τους πρέπει να φθάσει το  $99.93\%$  σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς.

Από τα παραπάνω για κάθε 1 kWh παράγονται 193.75 g ιπτάμενης τέφρας οπότε, επειδή από  $67.5 \times 10^9$  kg λιγνίτη παράγονται  $67.5 \times 10^9$  kg /1.5882 (kg/kWh) =  $42.50 \times 10^9$  kWh ετησίως, προκύπτει ότι η παραγόμενη ετησίως ιπτάμενη τέφρα στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής της Δ.Ε.Η που καίνε λιγνίτη ανέρχεται περίπου σε:  $42.50 \times 10^9$  kWh x 0.19375 kg / kWh = **8.234.375 tonnes/έτος**, η οποία όμως είναι περίπου 10-15% μεγαλύτερη ( $\approx$  9 εκατομ. τόννοι) λόγω της πολύ χαμηλότερης θερμογόνου δύναμης του λιγνίτη Μεγαλόπολης και της μεγαλύτερης περιεκτικότητάς του σε τέφρα. Το εξαιρετικά λεπτομερές αυτό υλικό χρειάζεται διαχείριση (απόθεση, διάθεση στην τσιμεντοβιομηχανία ή για άλλες κατάλληλες χρήσεις).



Σχήμα 8. Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας σε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο ελληνικό λιγνίτη.

## 5. Ενεργειακή ένταση συμβατικών ενεργειακών καυσίμων

Η ενεργειακή ένταση καυσίμων εκφράζεται σε g C/MJ κατώτερης θερμογόνου δύναμης καυσίμου (LHV, lower heating value) και εξαρτάται όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα από το είδος και τα χαρακτηριστικά του καυσίμου (χημική σύσταση, ποσοστό μόνιμου άνθρακα, υγρασία, άλλα ανόργανα συστατικά κλπ.). Υπολογίζεται δε από την αντίδραση πλήρους καύσης

του καυσίμου, και επίσης λαμβάνεται υπόψη η λανθάνουσα θερμότητα που χάνεται στο περιβάλλον (νερό υπό μορφή υδρατμών). Οι ετήσιες εκπομπές άνθρακα στην ατμόσφαιρα από την κατανάλωση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων μπορούν να υπολογιστούν (Τσακαλάκης, 2003) με τη βοήθεια της ενεργειακής έντασης κάθε συμβατικού καυσίμου (Πίνακας 3) και της παγκόσμιας κατανάλωσής τους.

Η ποσότητα του άνθρακα που εκλύεται υπό μορφή CO<sub>2</sub> ανά μονάδα ενέργειας που παραλαμβάνεται από το καύσιμο καλείται *ένταση σε άνθρακα* του καυσίμου. Πολλά καύσιμα όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο έχουν σημαντική ένταση σε άνθρακα, ενώ άλλα όπως τα πυρηνικά και το νερό (υδροηλεκτρική ενέργεια) είναι «απαλλαγμένα» από άνθρακα. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι το ισοζύγιο άνθρακα από την παραγωγή ενέργειας από την καύση βιομάζας θεωρείται μηδενικό, επειδή με τον τρόπο αυτό επιστρέφεται στην ατμόσφαιρα υπο μορφή CO<sub>2</sub> η ποσότητα του άνθρακα που είχε δεσμευτεί από τα φυτά στο στάδιο της ανάπτυξής τους.

Πίνακας 3. Ενεργειακή ένταση καυσίμων και συντελεστές υπολογισμού αερίων εκπομπών CO<sub>2</sub> από την καύση τους

Καύσιμο	Ενεργειακή ένταση καυσίμου (ΑΘΔ) g C/MJ	Ενεργειακή ένταση καυσίμου (ΚΘΔ) g C/MJ (Α)	Εκπομπές CO <sub>2</sub> kg / MJ καυσίμου πολλαπλασιασμός του (Α) με (44/12 = 3.67)
Φυσικό αέριο	13.5	15.3	56.2
Πετρέλαιο Diesel	19.7	20.0	73.4
Άνθρακας	24.2	25.8	94.7
Ελληνικός λιγνίτης	37.1	39.5	145.0
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας + Πυρηνική Ενέργεια	0	0	0

## 5. Εκπομπές αερίων κατά είδος καυσίμου

### Γενικά

Οι τιμές των αερίων εκπομπών κατά τη λειτουργία σταθμών παραγωγής ενέργειας (π.χ. ηλεκτροπαραγωγή) εξαρτώνται, τόσο από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο (λιγνίτης,

Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και από εναλλακτικές πηγές ενέργειας 22  
**Τσακαλάκης Κώστας**, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.– Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών

λιθάνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο κλπ.) που καθορίζει τις φυσικοχημικές ιδιότητές του (χημική σύσταση, υγρασία, ποσοστό μόνιμου άνθρακα κλπ.) δηλαδή το θερμικό δυναμικό του, όσο και από την απόδοση καύσης (combustion efficiency) της μονάδας παραγωγής ενέργειας (τεχνολογική εξέλιξη π.χ. τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου με συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας ή ατμού κλπ.).

Τα αέρια της καύσης είναι CO<sub>2</sub>, CO, υδρατμοί (H<sub>2</sub>O) και NO<sub>x</sub> (μείγμα NO και N<sub>2</sub>O), O<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub> (όταν καίονται άνθρακες και πετρέλαιο).

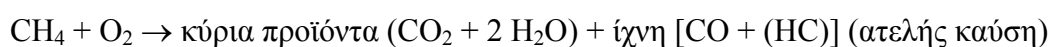
Η *ποιότητα* της καύσης εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ της ποσότητας του καυσίμου και του αέρα καύσης. Εάν η ποσότητα του καυσίμου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από αυτήν που αναλογεί στην παρεχόμενη ποσότητα αέρα, αυτό πιθανόν να οδηγήσει σε μη πλήρη καύση και κατά συνέπεια στην παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Είναι γνωστό ότι για την πλήρη καύση μιας συγκεκριμένης ποσότητας ή παρεχόμενης ποσότητας καυσίμου απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα αέρα καύσης και επίσης απαιτείται πάντοτε (περίσσεια) αέρα για την επίτευξη συνθηκών καλής καύσης. Υπερβολική όμως περίσσεια αέρα οδηγεί επίσης στην ατελή καύση προς παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και οδηγεί σε *χαμηλότερες ενεργειακά αποδόσεις καύσης*.

Σε μονάδες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικό αέριο, η παρουσία CO στα καπναέρια είναι δείκτης ατελούς καύσης. Σε μονάδες ή διατάξεις που χρησιμοποιούν πετρέλαιο ως καύσιμο η παρουσία CO και καπνού στα προϊόντα αποτελεί επίσης ένδειξη ατελούς καύσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνει χώραν ταυτόχρονη επικάλυψη αιθάλης στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας που ελαττώνει την ενεργειακή απόδοση.

Στην απλούστερη μορφή οι εκπομπές προέρχονται από την πλήρη καύση των ορυκτών καυσίμων (π.χ. καθαρού φυσικού αερίου, CH<sub>4</sub>) και περιγράφεται από την αντίδραση

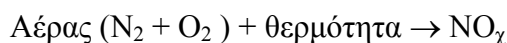


Σε περίπτωση που η θερμοκρασία της καύσης δεν είναι αρκετά υψηλή ή δεν υπάρχει περίσσεια αέρα, ή ακόμη ο χρόνος καύσης του καυσίμου δεν είναι αρκετός, τότε η καύση του είναι *ατελής* και η γενική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι:



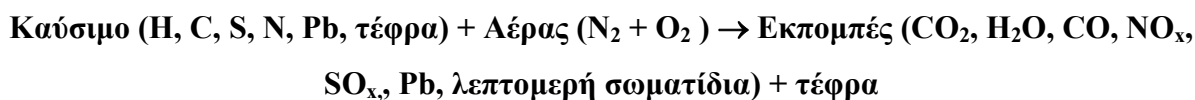
Τα προϊόντα της παραπάνω αντίδρασης είναι μίγμα CO<sub>2</sub>, CO και άκαυστων υδρογονανθράκων (HC).

Είναι γεγονός ότι η καύση γίνεται παρουσία αέρα (μίγμα 78% N<sub>2</sub> και 21% O<sub>2</sub>). Στην περίπτωση δε που η θερμοκρασία καύσης είναι πολύ υψηλή, μέρος του αζώτου του αέρα αντιδρά με το οξυγόνο και σχηματίζει οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) σύμφωνα με την αντίδραση:

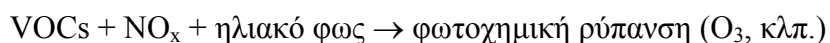


Μέχρι τώρα είχε γίνει η υπόθεση ότι ως καύσιμο χρησιμοποιείται καθαρός υδρογονάνθρακας π.χ. μεθάνιο. Στην πραγματικότητα όμως τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται δεν είναι καθαρές ενώσεις και περιέχουν επίσης άζωτο, θείο ή μόλυβδο (βενζίνη) και άλλα συστατικά που δεν καίονται (π.χ. τέφρα).

Παίρνοντας ως δεδομένα την ατελή καύση, την καύση παρουσία αέρα και την καύση μη καθαρών καυσίμων, η πραγματική εξίσωση της αντίδρασης διαμορφώνεται όπως:



Αν επίσης ληφθεί υπόψη η παρουσία υδρογονοανθράκων και άλλων πτητικών ενώσεων (VOCs, Volatile Organic Compounds) στην ατμόσφαιρα, αυτές παρουσία ηλιακού φωτός αντιδρούν με τις ενώσεις οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και παράγουν όζον και φωτοχημική ρύπανση (αιθαλομίχλη) σύμφωνα με την αντίδραση:



Οι πηγές από τις οποίες προκύπτουν οι εκπομπές αυτές χωρίζονται σε κινούμενες (μέσα μεταφοράς και παντός είδους κινούμενα μηχανήματα) και σε σταθερές (μονάδες παραγωγής ενέργειας, βιομηχανίες, διυλιστήρια κλπ.).

Τα αέρια του θερμοκηπίου CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O οφείλονται κυρίως στην παραγωγή ενέργειας. Το CO<sub>2</sub> προκύπτει κατά 81% από την παραγωγή ενέργειας, κατά 17% από την καταστροφή των δασών και το 5% από την τσιμεντοβιομηχανία, ενώ τα CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O κατά 26% και 10% από την παραγωγή ενέργειας, αντίστοιχα.

- **Θεωρητικά παραγόμενες ποσότητες αερίων κατά την καύση**

- Στην περίπτωση του φυσικού αερίου, που κατά κύριο λόγο αποτελείται από μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και η θερμογόνος δύναμή του είναι περίπου 53000 Btu/kg (212392 cal/mole ή 13300 cal/g CH<sub>4</sub>), από την αντίδραση καύσης του έχουμε:

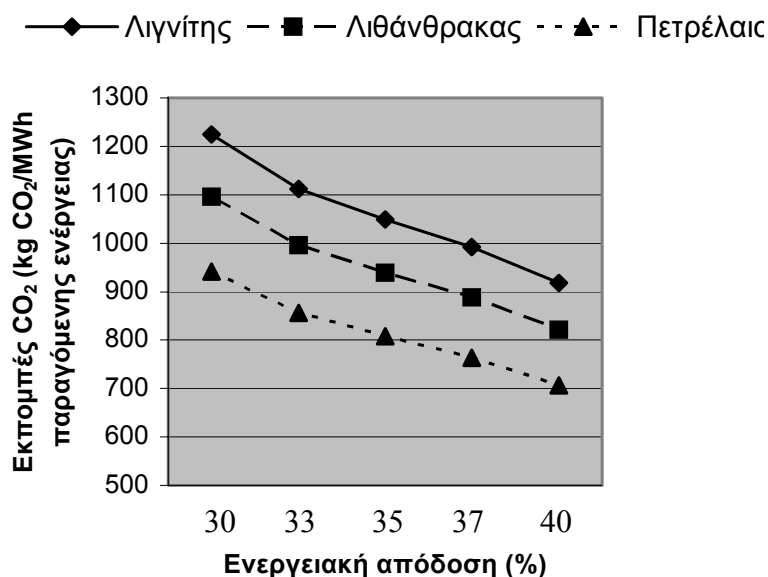


Για κάθε 16 tonnes μεθανίου, που καίεται για παραγωγή ενέργειας, απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα 44 tonnes CO<sub>2</sub> στην περίπτωση τέλει καύσης.

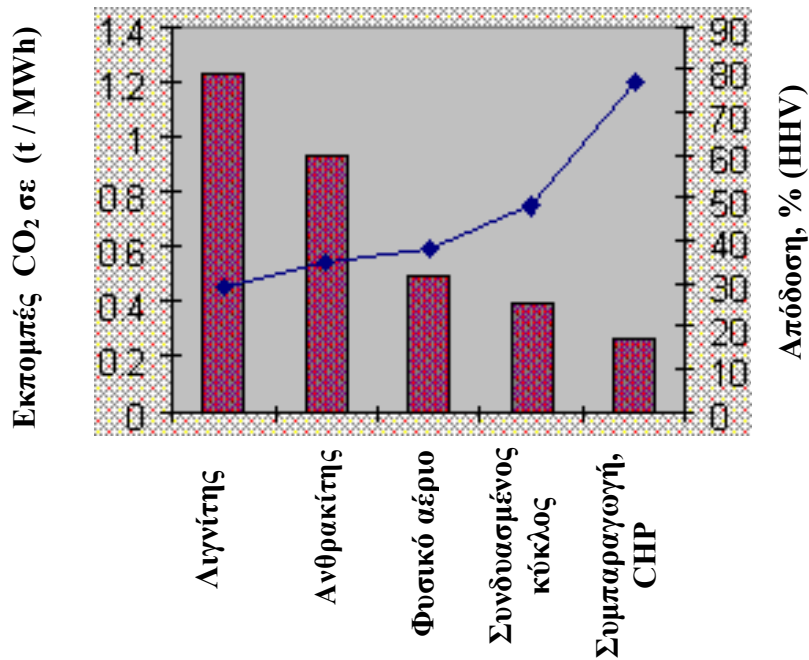
- **Υπολογισμός των εκπομπών CO<sub>2</sub> με χρήση διαγραμμάτων**

Στα Σχήματα 9, 10, 11, 12, και 13 δίνονται κατα προσέγγιση οι μέσες τιμές εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενης ή εισαγόμενης ενέργειας για τα διάφορα ορυκτά καύσιμα και μεθόδους παραγωγής ενέργειας.

Από τα διαγράμματα αυτά διαπιστώνεται, ότι τις μεγαλύτερες τιμές εκπομπών, όσο αφορά στο CO<sub>2</sub>, δίνει η καύση των διαφόρων τύπων ανθράκων, ενώ τις μικρότερες δίνει το φυσικό αέριο. Οι τιμές εκπομπών κατά την καύση πετρελαίου είναι ενδιάμεσες. Το πετρέλαιο όμως έχει το μειονέκτημα να παράγει SO<sub>2</sub> κατά την καύση του, λόγω του περιεχομένου S.



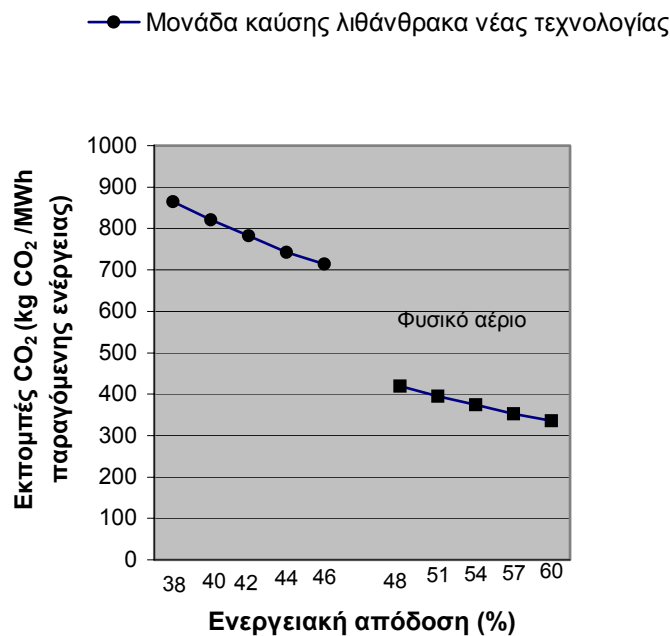
Σχήμα 9. Εκπομπές CO<sub>2</sub> σε μονάδες παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν ως καύσιμα λιγνίτη, λιθάνθρακα και πετρέλαιο.



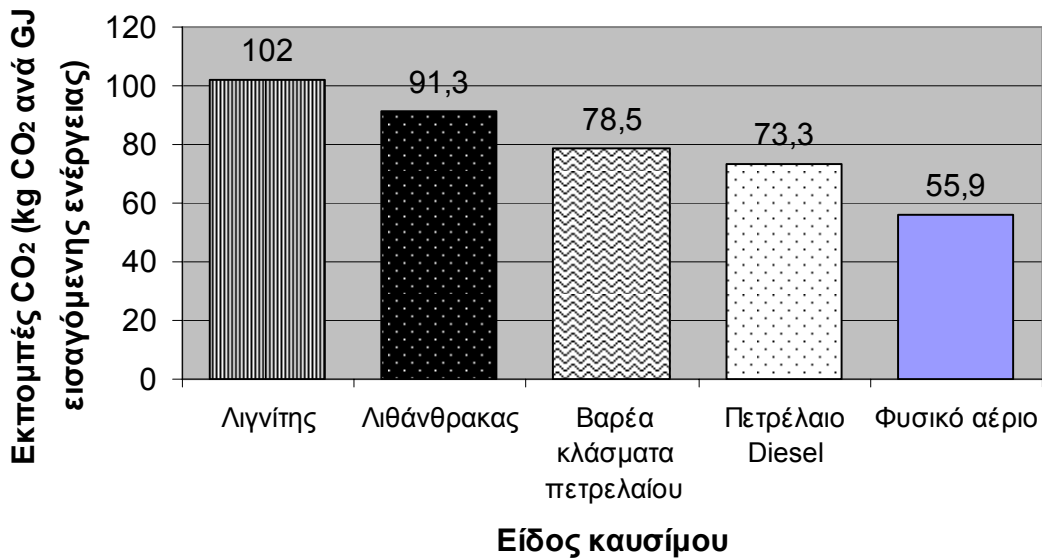
Σχήμα 10. Εκπομπές CO<sub>2</sub> σε (t/MWh) σε μονάδες παραγωγής Η.Ε. ως συνάρτηση του είδους του καυσίμου και της μεθόδου παραγωγής – Ενεργειακή απόδοση (%) ως συνάρτηση του είδους του καυσίμου και της μεθόδου παραγωγής ενέργειας.

(Πηγή: Cogeneration-CHP (Electricity) generation-Research Note 21 1998-99),

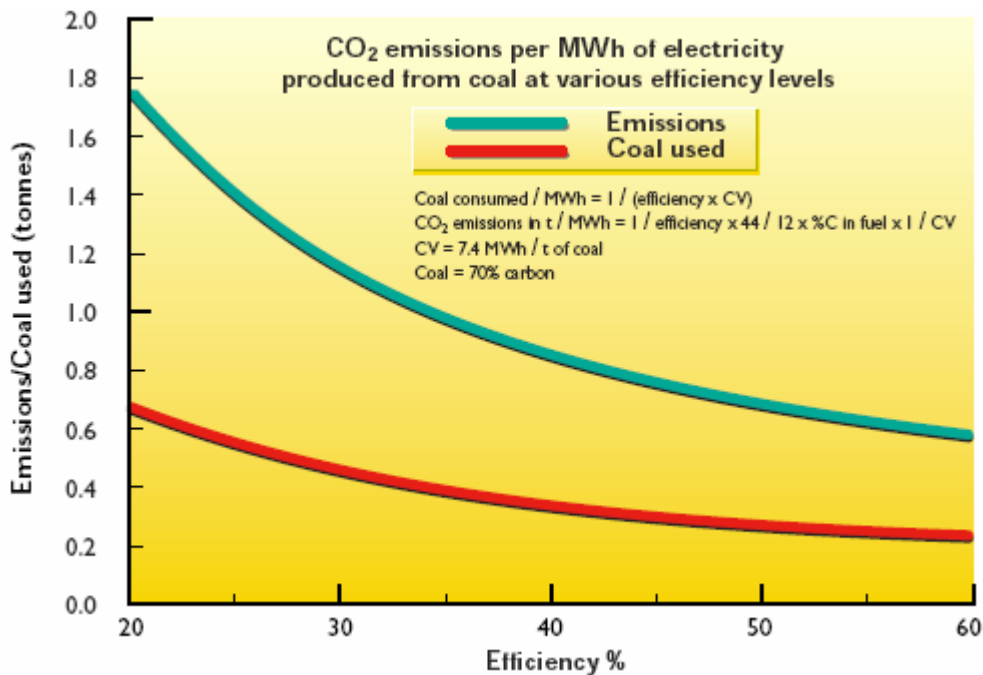
<http://www.aph.gov.au/library/pubs/rn/1998-99/99rn21.htm>)



Σχήμα 11. Εκπομπές CO<sub>2</sub> ως συνάρτηση της ενεργειακής απόδοσης σε μονάδες παραγωγής Η.Ε. που χρησιμοποιούν ως καύσιμα λιθάνθρακα και φυσικό αέριο.



Σχήμα 12. Εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την πλήρη καύση των ενεργειακών καυσίμων Υπολογισμοί για Κ.Θ.Δ. (Πηγή: International Gas Union, IGU & Eurogas).



Σχήμα 13. Εκπομπές CO<sub>2</sub> και κατανάλωση άνθρακα ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας (Πηγή, Source): IEACR, <http://wci.rmid.co.uk/uploads/ccts.pdf>

Στο παραπάνω διάγραμμα προτείνεται η εξίσωση:

$$\text{Κατανάλωση άνθρακα (t / MWh)} = \left( \frac{1}{\text{Απόδοση} \times \text{θερμογόνου} \cdot \text{δύναμη}} = \frac{1}{E \times CV} \right) \quad (1)$$

Όπου  $E$  η απόδοση της ατμοηλεκτρικής μονάδας σε μορφή κλάσματος (π.χ. 0.37) και  $CV$  (Calorific Value) το ισοδύναμο της θερμογόνου δύναμης σε kWh.

Για το λιγνίτη Πτολεμαΐδας  $CV = (1380 \text{ kcal/kg}) = 1.605 \text{ kWh}$  και  $E = 37\%$  ή 0.37, από την εξίσωση 1 προκύπτει:

$$\text{Κατανάλωση λιγνίτη (t / MWh)} = \mathbf{1.68 \text{ t / MWh} \text{ ή } 1.68 \text{ kg / kWh}}$$

Ομοίως οι εκπομπές σε  $\text{CO}_2$  σύμφωνα με το διάγραμμα δίνονται από την εξίσωση:

$$\text{Εκπομπές } \text{CO}_2 \text{ (t / MWh)} = \frac{1}{E} \times \frac{44}{12} \times c_f \times \frac{1}{CV} \quad (2)$$

όπου:

$E$  και  $CV$  όπως προηγουμένως και  $c_f$  η περιεκτικότητα του ορυκτού άνθρακα (καυσίμου) σε C υπό μορφή κλάσματος (π.χ. για 64% C χρησιμοποιείται ως 0.64).

Από τα παραπάνω για λιγνίτη με  $c_f = 19\%$  C,  $E = 37\%$  και  $CV = 1.605$  από την εξίσωση 2 προκύπτει:

$$\text{Εκπομπές } \text{CO}_2 \text{ (t / MWh)} = \mathbf{1.174 \text{ t CO}_2 / \text{MWh} \text{ ή } 1.174 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh}}$$

- **Εκπομπές  $\text{CO}_2$  από την καύση ελληνικού λιγνίτη για παραγωγή Η.Ε σύμφωνα με τα δεδομένα παραγωγής**

Η παραγωγή Η.Ε. στην Ελλάδα (BP Amoco, Eurogas και E.I.A. Annual reports 2003) που προέρχεται από την καύση λιγνίτη ανήλθε το 2002 σε 34.6 TWh ( $34.6 \times 10^9$  kWh) και παρήχθησαν από την καύση 70 εκατ. τόννων λιγνίτη με 19% C (υπόθεση όλη η ποσότητα λιγνίτη Πτολεμαΐδας). Η τέλεια καύση (μετατροπή όλου του άνθρακα σε  $\text{CO}_2$ ) του λιγνίτη παρήγε συνολικά:

$70 \times 10^9 \times 0.19 \times (44/12) \text{ kg CO}_2 = 48.77 \times 10^9 \text{ kg CO}_2$  στην ατμόσφαιρα περίπου. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι εκπομπές  $\text{kg CO}_2 / \text{kWh}$  παραγόμενης Η.Ε. είναι:

$$(48.77 \times 10^9 \text{ kg CO}_2 / 34.6 \times 10^9 \text{ kWh}) = \mathbf{1.409 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh}}$$

ή **1409 kg  $\text{CO}_2 / \text{MWh}$**  παραγόμενης ενέργειας

Το παραπάνω αποτέλεσμα βρίσκεται σε συμφωνία με το διάγραμμα (Σχήμα 9) που δίνει γενικώς χαμηλότερες εκπομπές (910-1230 kg CO<sub>2</sub> / MWh παραγόμενης ενέργειας) για τους λιγνίτες και δικαιολογείται από το γεγονός ότι ο ελληνικός λιγνίτης είναι πολύ χαμηλής θερμογόνου δύναμης .

Εφαρμόζοντας την εξίσωση 2, για μέση Κ.Θ.Δ. τροφοδοτούμενου ελληνικού λιγνίτη 1200 kcal / kg ≈ 1.395 kWh, προκύπτει:

$$\text{Εκπομπές CO}_2 \text{ (t / MWh)} = 1.35 \text{ t CO}_2 \text{ / MWh} \text{ ή } 1.35 \text{ kg CO}_2 \text{ / kWh}$$

Η παραπάνω τιμή προσεγγίζει ικανοποιητικά αυτή (1.409 t CO<sub>2</sub> / MWh) που υπολογίστηκε από τα δεδομένα παραγωγής 2002.

Κάνοντας παρόμοιους υπολογισμούς και υποθέτοντας μέση απόδοση ατμοηλεκτρικών εργοστασίων 37%, η εισαγόμενη ενέργεια καυσίμου (ελληνικού λιγνίτη) για την παραγωγή των 34.6 TWh το έτος 2002 είναι περίπου: 3,363 x 10<sup>8</sup> GJ.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα **εισαγόμενης ενέργειας** θα είναι :

$$(48.77 \times 10^9 \text{ kg CO}_2 / 3,363 \times 10^8 \text{ GJ}) = 145 \text{ kg CO}_2 \text{ / GJ εισαγόμενης ενέργειας,}$$

αποτέλεσμα που για τον ελληνικό λιγνίτη και για τους παραπάνω λόγους συγκρινόμενο με το διάγραμμα (Σχήμα 12) κρίνεται ως αποδεκτό.

**\*Παρατήρηση:** η χρήση λιγνίτη χαμηλής μέσης Κ.Θ.Δ. (1200 kcal / kg) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανεβάζει την υπολογισμένη παραπάνω *ειδική κατανάλωση* από **1.6 kg λιγνίτη / kWh** σε:

$$(70 \text{ εκατ. τόνοι λιγνίτη} / 34.6 \text{ TWh}) = (70 \times 10^9 \text{ kg λιγνίτη} / 34.6 \times 10^9 \text{ kWh}) = \\ 2.02 \text{ kg λιγνίτη} / \text{kWh}.$$

Από την εξίσωση 2 όμως, που αναφέρεται στο Σχήμα 14 και για μέση Κ.Θ.Δ. 1200 kcal / kg (όλων των ελληνικών λιγνιτών), προκύπτει ειδική κατανάλωση λιγνίτη **1.937 kg λιγνίτη / kWh**, τιμή που βρίσκεται πολύ κοντά στην προηγούμενη τιμή που προκύπτει από τα δημοσιευμένα δεδομένα παραγωγής.

## 6. Παραγωγή και κατανάλωση λιγνίτη - Προσδιορισμός χρονικού ορίζοντα εξάντλησης των σημερινών βέβαιων αποθεμάτων - Αναμενόμενη παραγωγή Η.Ε. σε kWh

Αν υποτεθεί ότι η παραγωγή (εξόρυξη) λιγνίτη ακολουθεί εκθετική κατανομή με ετήσια αύξηση  $r=1.5\%$  (αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας), ποιά προβλέπεται να είναι η παραγωγή (t/έτος) λιγνίτη μετά από  $t$  χρόνια και πόση θα είναι η ηλεκτρική ενέργεια (kWh) που θα μπορεί να παραχθεί τότε από το λιγνίτη με ενεργειακή απόδοση ατμοηλεκτρικών σταθμών 37%;

### Δεδομένα:

Έστω ότι η σημερινή ετήσια παραγωγή (2002) είναι  $P_0=70$  εκατομ. τόνοι λιγνίτη και η σημερινή απόδοση του ατμοηλεκτρικών σταθμών είναι περίπου 37%.

### Υπολογισμοί

Η συνολική ποσότητα σε τόννους που θα παραχθεί από σήμερα ( $t=0$ ) μέχρι μετά από  $t$  χρόνια δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$Q = \int_0^t P_0 e^{rt} dt = \frac{P_0}{r} e^{rt} \Big|_0^t \quad (3)$$

το οποίο έχει ως λύση

$$Q = \frac{P_0}{r} (e^{rt} - 1) \quad (4)$$

όπου

$Q$  είναι η συνολική ποσότητα λιγνίτη (σε τόννους) που θα εξορυχθεί σε  $t$  χρόνια (από 0 –  $t$ )

$P_0$  είναι ο σημερινός ετήσιος ρυθμός παραγωγής σε τόννους

$r$  είναι ο ετήσιος (εκθετικός) ρυθμός αύξησης της παραγωγής λιγνίτη υπό μορφή κλάσματος

Η επίλυση της εξίσωσης (2) ως προς  $t$  δίνει το χρονικό ορίζοντα εξάντλησης των σημερινών βέβαιων αποθεμάτων λιγνίτη.

Τα αποθέματα αυτά θα εξαντληθούν μετά από  $T$  χρόνια που δίνονται από την εξίσωση

$$T = \frac{1}{r} \ln \left( \frac{rQ}{P_0} + 1 \right) \quad (5)$$

Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και από εναλλακτικές πηγές ενέργειας 30  
**Τσακαλάκης Κώστας**, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.– Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (3) για σημερινή (έτος 2002) ετήσια παραγωγή  $P_0 = 70$  εκατ. τόννους λιγνίτη και για βέβαια αποθέματα  $Q = 4000$  εκατ. τόννους και ρυθμούς ετήσιας αύξησης παραγωγής σταθερούς 0.5, 1, 1.5, 2 και 3 % (υπό μορφή κλάσματος 0.005, 0.01, 0.015, 0.02 και 0.03, αντίστοιχα), ο χρονικός ορίζοντας εξάντλησης των αποθεμάτων λιγνίτη υπολογίζεται σε 50.3, 45.2, 41.3, 38.1 και 33.3 χρόνια αντίστοιχα από σήμερα.

Αν ο ετήσιος ρυθμός παραγωγής λιγνίτη παρέμενε σταθερός και ίσος με το σημερινό (μηδενική ετήσια αύξηση παραγωγής), ο χρονικός ορίζοντας εξάντλησης των αποθεμάτων λιγνίτη θα ανερχόταν σε  $4000/70 = 57.1$  χρόνια δηλαδή τό έτος 2060 περίπου αντί του έτους 2043 που αναμένεται να συμβεί για 1.5% ετήσιο ρυθμό αύξησης παραγωγής.

Στην περίπτωση όμως που τα αποθέματα (μετά από έρευνες) αυξάνονταν κατά 2000 εκατ. τόννους, ο χρονικός ορίζοντας θα ήταν 55.1 χρόνια για 1.5% ετήσιο ρυθμό αύξησης παραγωγής, δηλαδή 14 χρόνια περίπου (55.1-41.3) περισσότερα (το έτος 2057 αντί του 2043).

Η ηλεκτρική ενέργεια, που θα μπορεί να παραχθεί μετά από  $t$  χρόνια, χωρίς τεχνολογική βελτίωση των σταθμών παραγωγής (σταθερή ενεργειακή απόδοση 37% των ατμοηλεκτρικών σταθμών), θα προκύψει από την εξορυσσόμενη ποσότητα λιγνίτη το χρόνο  $t$ , που υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (2) και είναι

$$Q_t - Q_{t-1} = \frac{P_0}{r} \cdot e^{rt} \left( 1 - \frac{1}{e^r} \right) \quad (6)$$

και από την ειδική κατανάλωση σε kg λιγνίτη/kWh. Η ειδική (πραγματική) κατανάλωση λιγνίτη γίνεται η υπόθεση ότι θα παραμείνει σταθερή και ίση με **1.9 kg λιγνίτη / kWh**.

Η ηλεκτρική ενέργεια (kWh) που αναμένεται να παραχθεί θα δίνεται τότε από την εξίσωση

$$\frac{(Q_t - Q_{t-1})}{1.9} = 0.53 \cdot \frac{P_0}{r} \cdot e^{rt} \left( 1 - \frac{1}{e^r} \right) \times 10^9 \text{ kWh} \quad (7)$$

αν  $P_0$  δίνεται σε τόννους και  $r$  υπό μορφή κλάσματος

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (5) για  $P_0$  (70 εκατομ. τόννοι) σημερινή παραγωγή λιγνίτη,  $r = 0.015$  ή 1.5% και  $t = 35$  χρόνια προκύπτει ότι η αναμενόμενη, μετά από 35 χρόνια, ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι περίπου  $62 \times 10^9$  (δισεκατομμύρια) kWh.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Συντελεστές μετατροπής:

#### Όγκος/Βάρος/Μάζα

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litres} = 35.31 \text{ ft}^3$$

$$1,000 \text{ ft}^3 = 28.3 \text{ m}^3$$

$$\text{Αριθμός ft}^3 \times 0.02831685 = \text{m}^3$$

$$1 \text{ gallon} = 3.785 \text{ litres}$$

$$1 \text{ barrel} = 42 \text{ gallons} = 159.0 \text{ litres}$$

$$\text{Αριθμός Barrels} \times 0.1589873 = \text{m}^3 \text{ (όγκος)}$$

$$1 \text{ lb} = 0.4536 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kilogram} = 2.205 \text{ lb}$$

$$1 \text{ tonne} = 2205 \text{ lb}$$

$$1 \text{ short ton} = 0.9072 \text{ metric ton} = 2000 \text{ lb}$$

$$1 \text{ tonne} = 1 \text{ metric ton} = 1000 \text{ kg}$$

GCV (gross calorific value) = HHV (Higher caloric value)

NCV (net calorific value) = LHV (Lower caloric value)

**1 m.t.o.e = million tonnes oil equivalent**

**1 m.b.o.e = million barrels oil equivalent**

### Άλλα δεδομένα:

#### Ορυκτοί άνθρακες

1 tonne **άνθρακα**: 27 - 30 GJ ή  $\approx 11,500$ - $13,000$  Btu/lb (ανθρακίτης);

1 tonne **λιγνίτης**: 15 -19 GJ ή  $\approx 6,500$ - $8,200$  Btu/lb

1 tonne (ελληνικός) **λιγνίτης** (μέση τροφοδοσία 1200 kcal/kg)  $\approx 5.03$  GJ

$\approx 2160$  Btu/lb

1 short ton coal = 0.9072 metric ton  $\cong 23.760 \times 10^6$  joules = 6600 kWh

1 tonne coal (λιθάνθρακα)  $\cong 4$  bbl (barrels) oil

**Σημείωση:** Το θερμικό δυναμικό των ορυκτών ανθράκων ποικίλλει σημαντικά μεταξύ των διαφόρων τύπων τους. Ως *τυπικός* άνθρακας για υπολογισμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ο «βιτουμενιούχος» με θερμικό δυναμικό **27 GJ/t**.

**Φυσικό αέριο:** Α.Θ.Δ. (HHV) = 1027 Btu/ft<sup>3</sup> = 38.26 MJ/m<sup>3</sup>;

Κ.Θ.Δ. (LHV) = 930 Btu/ft<sup>3</sup> = 34.6 MJ/m<sup>3</sup> (**HHV / LHV = 1.107**)

1 ft<sup>3</sup> gas (HHV) = 1027 Btu = 259 kcal (LHV  $\approx$  234 kcal)

1 m<sup>3</sup> gas (HHV) = 36267 Btu = 9139 kcal (LHV  $\approx$  8256 kcal)

$1000 \text{ ft}^3 \text{ gas} = 259 \times 10^3 \text{ kcal} = 1084 \times 10^6 \text{ joules} = 301.1 \text{ kWh}$

$25.6 \text{ million m}^3 \text{ gas} = 1 \text{ PJ} = (\text{GCV})$

$1000 \text{ m}^3 \text{ of natural gas} \approx 0.9 \text{ ton oil equivalent (toe - crude oil)}$

$1 \text{ tonne LNG (Liquified natural gas)} = 48700 \text{ ft}^3 \text{ natural gas} = 1379 \text{ m}^3 \text{ natural gas} = (1379/593) \text{ m}^3 \text{ LNG} = 2.326 \text{ m}^3 \text{ LNG}$

**Πυκνότητα LNG (Liquified natural gas) = 0.43 t / m<sup>3</sup>**

$1 \text{ Therm (χρησιμοποιείται για φυσικό αέριο, methane)} = 10^5 \text{ Btu} (= 105.5 \text{ MJ})$

## **Πετρέλαιο**

$7.64 \text{ barrels oil} \approx 1 \text{ tonne of oil (metric)} = 42\text{-}44 \text{ GJ.}$

$1 \text{ bbl (barrel) oil} = 5.8 \text{ MBtu} = 1.462 \times 10^6 \text{ kcal} \approx 5.5\text{-}5.8 \text{ GJ} \approx 1700 \text{ kWh}$

$1 \text{ barrel oil (159 λίτρα)} = 5.5\text{-}5.9 \text{ GJ}$

**Πετρέλαιο - diesel = 130,500 Btu/gallon (36.4 MJ/L ή 42.8 GJ/t)**

**Πυκνότητα Πετρελαίου - diesel (μέση) = 0.84 kg/L (= metric tonnes/m<sup>3</sup>)**

1 τόννος ισοδύναμου πετρελαίου = 1 tonne oil equivalent (t.o.e.) ισοδυναμεί με :

$1 \text{ tonne πετρελαίου} = 7.64 \text{ barrels πετρελαίου πυκνότητας κατά API στους } 40^\circ \text{ C (} 0.823 \text{ g/cm}^3\text{)}$

- $1 \text{ t.o.e.} \approx 41.88 \text{ GJ} = 41.88 \times 238.8 \times 10^3 \text{ kcal} = 10000 \times 10^3 \text{ kcal} \approx 10 \text{ million kilocalories} = 10 \times 10^6 \text{ kcal}$
- $1 \text{ t.o.e.} = 41.88 \text{ GJ} = 41.88 \times 277.8 \text{ kWh} = 11.634 \times 10^3 \text{ kWh} \approx 12 \text{ MWh}$
- $1 \text{ t.o.e.} = 41.88 \text{ GJ} = 41.88 \times 0.948 \text{ millions BTU} = 39.7 \text{ millions BTU} \approx 40 \text{ millions BTU}$
- $1 \text{ quad Btu} = 10^{15} \text{ Btu} = 24.75 \times 10^6 \text{ t.o.e.} = 24.75 \text{ M.t.o.e.}$
- $1 \text{ t.o.e.} \approx 1.5 \text{ tonne hard coal, οπότε}$ 
  - $1 \text{ tonne hard coal} = (1/1.5) \times 41.88 \text{ GJ} \approx 27.92 \text{ GJ}$
- $1 \text{ t.o.e.} : (41.88/17) \approx 2.5 \text{ tonnes λιγνίτης (15 -19 GJ ) ή περίπου}$ 
  - $(41.88/6.12) \approx 6.84 \text{ tonnes ελληνικού λιγνίτη (6.12 GJ)}$
- $1 \text{ βαρέλι πετρέλαιο (barrel oil} = 159 \text{ λίτρα)} \approx 0.25 \text{ tonne coal (λιθάνθρακα)}$

## **Παράδειγμα**

$1 \text{ million tonnes πετρελαίου} = 1 \times 10^6 \text{ t.o.e. έχει θερμικό δυναμικό } 1 \times 10^6 \times 12 \text{ MWh και παράγει } 4500 \text{ GWh} = 4.5 \times 10^6 \text{ MWh H.E., όταν η απόδοση του θερμοηλεκτρικού εργοστασίου είναι:}$

$$(4.5 \times 10^6 \text{ MWh} / 12 \times 10^6 \text{ MWh}) = 0.375 \text{ ή } 37.5 \% \text{ περίπου}$$

<b>Πίνακας 4. Συντελεστές μετατροπής μονάδων θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας</b>						
<b>Ισοδυναμεί με:</b>	<b>GJ</b>	<b>kWh</b>	<b>MBtu</b>	<b>th</b>	<b>therm</b>	<b>kcal</b>
1 gigajoule ( <b>GJ</b> )	1	277.8	0.948	238.9	9.479	$238.8 \times 10^3$
1 kilowatt-hour ( <b>kWh</b> )	$3.6 \times 10^{-3}$	1	$3.411 \times 10^{-3}$	0.86	$3.411 \times 10^{-2}$	860
1 million Btu ( <b>MBtu</b> )	1.055	293.2	1	252	10	$252 \times 10^3$
1 Quad Btu ( <b>10<sup>15</sup> Btu</b> )	$1.055 \times 10^9$	$293.2 \times 10^9$	$10^9$	$252 \times 10^9$	$10 \times 10^9$	$252 \times 10^{12}$
1 thermie ( <b>th</b> )	$4.187 \times 10^{-3}$	1.162	$3.968 \times 10^{-3}$	1	$3.968 \times 10^{-2}$	1000
1 therm	0.1055	29.32	$1 \times 10^{-1}$	25.2	1	$252 \times 10^2$
1 kilocalorie ( <b>kcal</b> )	$4.187 \times 10^{-6}$	$1.163 \times 10^{-3}$	$3.968 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-3}$	$3.968 \times 10^{-5}$	1

**1 Btu/lb = 2.326 kJ / kg = 0.556 kcal / kg**

**1 kJ / kg = 0.43 Btu/lb = 0.2388 kcal / kg**

**1 kcal / kg = 1.8 Btu/lb = 4.187 kJ / kg**

## Βιβλιογραφία

- Zevehofen, R., #2. Fuels, Helsinki University of Technology, ENE-47.132/2.
- The United States Geological Survey (U.S.G.S), Classification of coals.
- Channiwala, S.A., 1992, MS Thesis, Indian Institute of Technology, Bombay, India.
- BC HYDRO, Vancouver Island generation project, Natural gas combined cycle power plant.
- EPA, United States Environmental Protection Agency, The U.S.Greenhouse Gas Inventory, Reference Tables and Conversion.
- Masters, M. G., 1999, *Introduction to Environmental Engineering and Science*, 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice Hall, pp. 453-553.
- WCI (World Coal Institute), 2000, *Coal Conversion Factors*, London, December.
- WCI (World Coal Institute), <http://wci.rmid.co.uk/uploads/ccts.pdf>
- EUROGAS, Annual Report 2003-2004, [www.eurogas.org](http://www.eurogas.org)
- Queensland Government, Energy efficiency in power stations, [http://www.energy.qld.gov.au/infosite/energy\\_losses.html](http://www.energy.qld.gov.au/infosite/energy_losses.html)
- Combined Heat and Power (CHP) Statistics, Statistical Office of the European Communities, Joint IEA/Eurostat Annual Questionnaire Training Workshop, IEA, Paris, October 2001.
- Cogeneration-Combined Heat and Power (Electricity) Generation, Parliament of Australia, Parliamentary Library, <http://www.aph.gov.au/library/pubs/rn/1998-99/99rn21.htm>.
- Energy Information Administration (E.I.A.), U.S. Department of Energy, 2002 Country Energy Data report (Greece), [http://www.eia.doe.gov/emeu/world/country/entry\\_GR.html](http://www.eia.doe.gov/emeu/world/country/entry_GR.html).
- Καβουρίδης Κ. & Νικολαΐδης Ι., Παραγωγή εξευγενισμένων προϊόντων λιγνίτη για ηλεκτρικές και εξωηλεκτρικές χρήσεις, Λιγνίτης και λοιπά Στερεά Καύσιμα της Χώρας μας: Παρούσα Κατάσταση και Προοπτικές, Διήμερο (β' Μέρος), ΤΕΕ, Αθήνα 5/97, σελ. 8-20.
- Μετικάνης Δ., Λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και περιβαλλοντική νομοθεσία (ελληνική και κοινοτική) – η εμπειρία από την ελληνική πραγματικότητα έγκρισης και εφαρμογής περιβαλλοντικών όρων λειτουργίας σε λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, Λιγνίτης και λοιπά Στερεά Καύσιμα της Χώρας μας: Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και από εναλλακτικές πηγές 35 ενέργειας
- Τσακαλάκης Κώστας**, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.– Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών

Παρούσα Κατάσταση και Προοπτικές, Διήμερο (β' Μέρος), ΤΕΕ, Αθήνα 5/97, σελ. 111-121.

BP Statistical Review of World Energy, Energy in focus, June 2004.

Τσακαλάκης Κ., Το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η επίδραση της καύσης των ορυκτών καυσίμων και των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην εξέλιξή του, Μεταλλειολογικά-Μεταλλουργικά Χρονικά, Τόμος 13, Τεύχος 1/2, Ιαν.-Δεκ. 2003, σελ. 23-49.

Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και από εναλλακτικές πηγές 36  
ενέργειας

**Τσακαλάκης Κώστας**, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.– Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-  
Μεταλλουργών