

**ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ**

Το κείμενο αυτό αποτελεί μέρος του βιβλίου με τίτλο “**Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας**”, που εκδόθηκε το Νοέμβριο του 1994, από το Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας, ΕΛΚΕΠΑ, στα πλαίσια Ευρωπαϊκού Προγράμματος SAVE της Ευρωπαϊκής Επιτροπής / ΓΔ XVII Ενέργειας.

Οι συγγραφείς του βιβλίου είναι ο κ. Χρίστος Αθ. Φραγκόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ, που ήταν και ο επιστημονικός Συντονιστής του Προγράμματος, ο κ. Ηλίας Π. Καρυδογιάννης, Μηχανολόγος-Ηλεκτρολόγος και ο κ. Γιάννης Κ. Καραλής, Διπλ. Ηλεκτρολόγος-Μηχανικός, όλοι μέλη του Ελληνικού Συνδέσμου Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, ΕΣΣΗΘ.

A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων ενός καταναλωτή (ή μιας ομάδας καταναλωτών) είναι η αγορά ηλεκτρισμού από το εθνικό δίκτυο και η καύση κάποιου καυσίμου (σε λέβητα, κλίβανο, κ.λπ.) για την παραγωγή θερμότητας. Όμως, η ολική κατανάλωση καυσίμων μειώνεται σημαντικά εάν εφαρμοσθεί η Συμπαράγωγή (στα Αγγλικά: Cogeneration ή Combined Heat and Power, CHP).

Συμπαράγωγή είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας.

Διευκρινίζεται ότι η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Η ψύξη ή ο κλιματισμός επιτυγχάνονται με μηχανές απορρόφησης, που λειτουργούν με ατμό ή θερμό νερό.

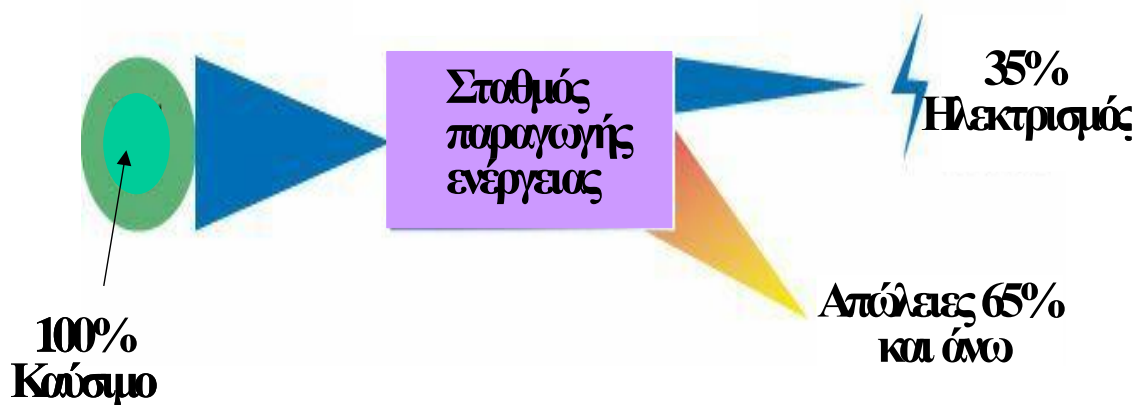
Κατά τη λειτουργία ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωμάτων ατμού, πύργων ψύξης, ψυγείων νερού κινητήρων Diesel, κ.λπ.) είτε μέσω των καυσαερίων (αεριοστροβίλων, κινητήρων Diesel, κινητήρων Otto, κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Έτσι, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπαράγωγής φθάνει το 80-85%. Μια τυπική σύγκριση, ως προς τον βαθμό απόδοσης, της συμπαράγωγής με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας παρουσιάζει το Σχήμα 1.

Η Συμπαράγωγή πρωτοεμφανίστηκε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. γύρω στα 1890. Κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, οι περισσότερες βιομηχανίες είχαν δικές τους μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με αμολέβητα-στρόβιλο, που λειτουργούσαν με άνθρακα. Πολλές από τις μονάδες αυτές ήταν συμπαράγωγικές. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι περίπου το 58% του ηλεκτρισμού, που παραγόταν σε βιομηχανίες των Η.Π.Α. στις αρχές του αιώνα, προερχόταν από μονάδες συμπαράγωγής.

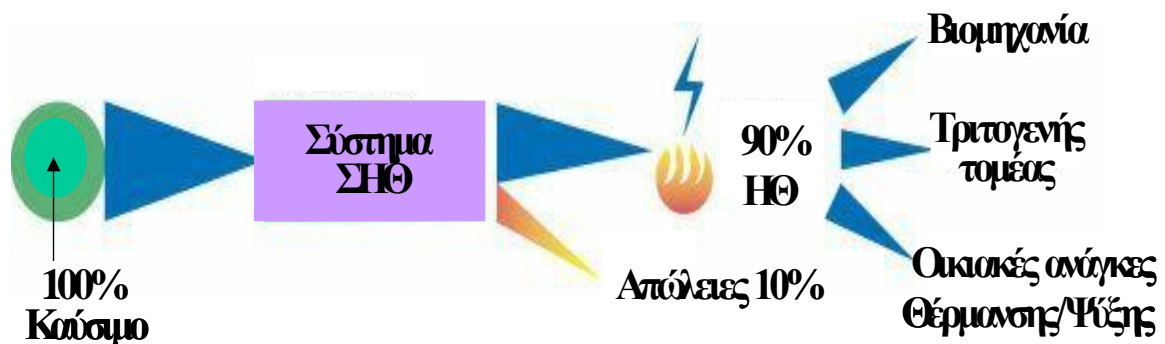
Κατόπιν ακολούθησε κάμψη κυρίως για δύο λόγους:

- α) ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού, που προσέφεραν σχετικά φθηνή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια, και
- β) διαθεσιμότητα υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου σε χαμηλές τιμές, που έκανε τη λειτουργία λεβήτων οικονομικά συμφέρουσα.

Συνεχίζοντας με το παράδειγμα των Η.Π.Α., η βιομηχανική συμπαράγωγή μειώθηκε στο 15% του όλου δυναμικού ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το 1950 και έπεσε στο 5% μέχρι το 1974. Η πορεία αυτή έχει πλέον αντιστραφεί όχι μόνον στις Η.Π.Α. αλλά και σε χώρες της Ευρώπης, στην Ιαπωνία κ.α., γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στην απότομη αύξηση των τιμών των καυσίμων, από το 1973 και μετά.



(α) Συμβατικό σύστημα παραγωγής ενέργειας



(β) Σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας

Σχήμα 1: Σύγκριση βαθμού απόδοσης συμπαραγωγής με χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

Η ανοδική πορεία στη διάδοση της συμπαραγωγής συνοδεύτηκε και από αξιοσημείωτη πρόοδο της σχετικής τεχνολογίας. Οι βελτιώσεις και εξελίξεις συνεχίζονται και νέες τεχνικές αναπτύσσονται και δοκιμάζονται, αλλά ήδη η συμπαραγωγή έχει φθάσει σε επίπεδο ωριμότητας με αποδεδειγμένη αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων, από πλευράς είδους, μεγέθους και λειτουργικών χαρακτηριστικών, είναι διαθέσιμη.

Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, που επιτυγχάνεται με τη συμπαραγωγή, συντελεί, εν γένει, σε μείωση και των εκπεμπόμενων ρύπων. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ενδεχόμενη η αύξηση των ρύπων σε τοπική κλίμακα, γεγονός το οποίο επιβάλλει ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του είδους της μονάδας και του πρόσθετου εξοπλισμού της. Η διαδικασία προσδιορισμού των εκπομπών, τιμές ρύπων και παραδείγματα σύγκρισης μεταξύ συστημάτων συμπαραγωγής και χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας παρουσιάζονται σε παρακάτω ενότητες, όπου επίσης γίνεται σύντομη αναφορά στις ευρύτερες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής διακρίνονται σε τέσσερις κύριους τομείς: σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, βιομηχανικός, εμπορικός -κτιριακός και αγροτικός τομέας. Η συμπαραγωγή στον τομέα των μεταφορών είναι πλέον κάτι αυτονόητο: π.χ., ο κινητήρας ενός αυτοκινήτου ή πλοίου καλύπτει τις ανάγκες σε μηχανικό έργο, ηλεκτρισμό και θερμότητα, η οποία ανακτάται από τα ψυκτικά κυκλώματα ή και τα καυσαέρια.

Η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση (τουλάχιστον σε σφαιρική κλίμακα) των ρύπων ίσως δεν είναι αρκετά κίνητρα για μια επένδυση σε σύστημα συμπαραγωγής, εάν και η ίδια η επένδυση δεν είναι οικονομικά βιώσιμη.

Η μεγάλη σημασία που έχει η συμπαραγωγή στην εξοικονόμηση φυσικών και οικονομικών πόρων αλλά και το γεγονός ότι η λειτουργία των συστημάτων έχει άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρισμού μιας χώρας, είναι αιτίες ώστε η συμπαραγωγή να αποτελεί αντικείμενο νομοθετικών, οικονομικών, και άλλων ρυθμίσεων εκ μέρους της πολιτείας.

Από την άλλη πλευρά, η εξεύρεση πόρων για τις σχετικές επενδύσεις και οι οικονομικές συνθήκες, κάτω από τις οποίες θα λειτουργήσει μια μονάδα συμπαραγωγής, είναι κρίσιμης σημασίας για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης.

B. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τα περισσότερα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να χαρακτηρισθούν είτε

- ως συστήματα “κορυφής” (topping systems) είτε
- ως συστήματα “βάσης” (bottoming systems).

Στα συστήματα “κορυφής”, ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες, θέρμανση χώρων ή ακόμη και για παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα συστήματα “βάσης”, παράγεται πρώτα θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας (όπως π.χ., σε φούρνους χαλυβουργείων, ναυουργείων, εργοστασίων τσιμέντου κλπ) και κατόπιν τα θερμά αέρια διοχετεύονται συνήθως σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας, όπου παράγεται ατμός που κινεί αμοστροβιλογεννήτρια. Είναι επίσης δυνατό τα θερμά αέρια να διοχετευθούν σε αεριοστρόβιλο, που κινεί την ηλεκτρογεννήτρια, χωρίς την παρεμβολή λέβητα.

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή σύγχρονων συστημάτων συμπαραγωγής:

⇒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής, κατάλληλα για ισχείς 500 kW-100 MW ή και μεγαλύτερες. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε καύσιμο. Ακόμη και στερεά απόβλητα καίγονται σε ειδικούς λέβητες εφοδιασμένους με συστήματα κατακράτησης ή και εξουδετέρωσης ρύπων και τοξικών ουσιών, που δημιουργούνται κατά την καύση. Ο βαθμός απόδοσης φθάνει το 60-85%.

Για σύγκριση, υπενθυμίζεται ότι ο βαθμός απόδοσης ενός συμβατικού αμοηλεκτρικού σταθμού βρίσκεται στην περιοχή του 35%.

Τα συστήματα αμοστροβίλου έχουν υψηλή αξιοπιστία[†], που φθάνει το 95%, υψηλή διαθεσιμότητα^{††} (90-95%) και μεγάλη διάρκεια ζωής (25-35 έτη). Όμως, ο χρόνος εγκατάστασης είναι σχετικά μεγάλος: 12-18 μήνες για μικρές μονάδες και μέχρι τρία έτη για μεγαλύτερα συστήματα.

Οι τρεις βασικές διατάξεις συστημάτων της κατηγορίας αυτής περιγράφονται πιο αναλυτικά στη συνέχεια.

• Συστήματα συμπαραγωγής με αμοστροβίλο αντίθλιψης

Ατμός υψηλής πίεσης (20-100 bar) και θερμοκρασίας (480-540°C) παράγεται σε λέβητα με κατανάλωση καυσίμου και χρησιμοποιείται για την κίνηση αμοστροβίλου, στον άξονα του οποίου είναι συνδεδεμένη ηλεκτρογεννήτρια (Σχήμα 2). Ο ατμός βγαίνει από τον στρόβιλο σε πίεση και θερμοκρασία κατάλληλη για τις θερμικές διεργασίες. Ο όρος “αντίθλιψη” οφείλεται στο ότι η πίεση αυτή είναι

[†] Ως αξιοπιστία εδώ θεωρείται η πιθανότητα να λειτουργεί ικανοποιητικά ένα σύστημα για δεδομένο χρονικό διάστημα και με προκαθορισμένες συνθήκες.

^{††} Διαθεσιμότητα είναι η πιθανότητα να λειτουργεί ικανοποιητικά ένα σύστημα σε τυχαία χρονική στιγμή. Η μέση ετήσια διαθεσιμότητα είναι ίση με το ποσοστό του χρόνου (π.χ., των 8760 ωρών του έτους) κατά το οποίο ένα σύστημα μπορεί να λειτουργεί ικανοποιητικά (παίρνονται υπόψη η προληπτική συντήρηση και οι έκτακτες βλάβες).

μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (3-20 bar). Απομάστευση (δηλ. εξαγωγή) μέρους του ατμού από ενδιάμεσες βαθμίδες του στροβίλου στις επιθυμητές πιέσεις είναι επίσης δυνατή.

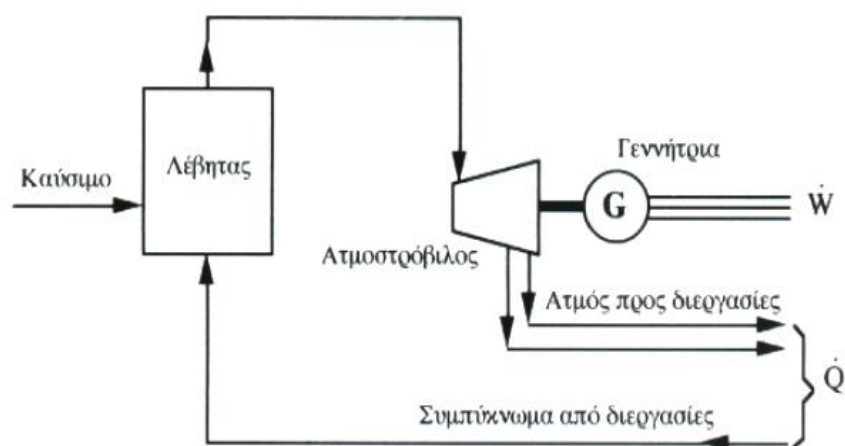
Σε σύγκριση με το απομάστευση, που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο, το σύστημα αντίθλιψης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- απλή μορφή,
- μικρότερο κόστος,
- μειωμένη ή και καθόλου ανάγκη ψυκτικού νερού,
- υψηλότερο βαθμό απόδοσης (περίπου 85%), κυρίως διότι δεν αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον μέσω ψυγείου.

Σημαντικό μειονέκτημα του, όμως, είναι ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι στενά συνδεδεμένη με την απαιτούμενη θερμότητα. Έτσι,

α) είναι αδύνατη η ανεξάρτητη λειτουργία του αμοηλεκτρικού σταθμού από το δίκτυο θέρμανσης, και

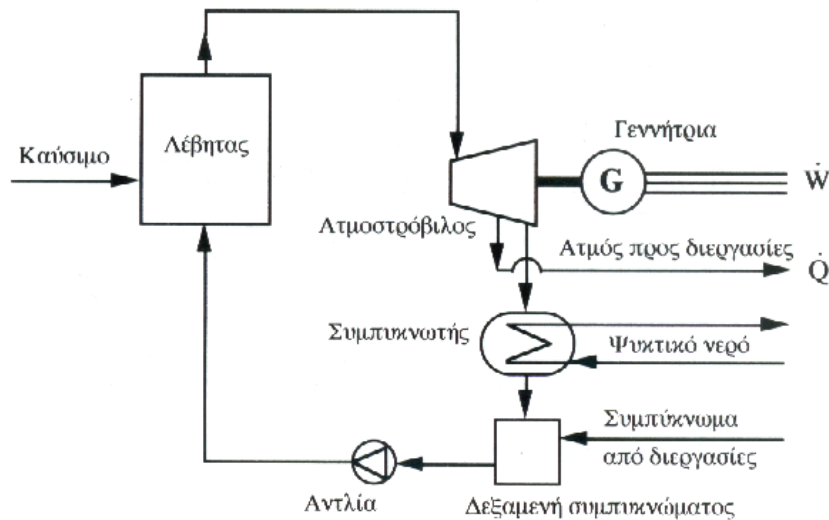
β) είναι αναγκαία η αμφίδρομη σύνδεση με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρισμού για την κάλυψη πρόσθετων αναγκών ή για τη διοχέτευση της πιθανής περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2: Σύστημα ΣΗΘ με αμοστρόβιλο αντίθλιψης

• Συστήματα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο απομάστευσης

Μέρος του ατμού απομαστεύεται από μία ή περισσότερες ενδιάμεσες βαθμίδες του στροβίλου στις επιθυμητές πιέσεις, ενώ ο υπόλοιπος εκτονώνεται μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή (λέγεται και ψυγείο ατμού) που είναι 0,05-0,10 bar. (Σχήμα 3).

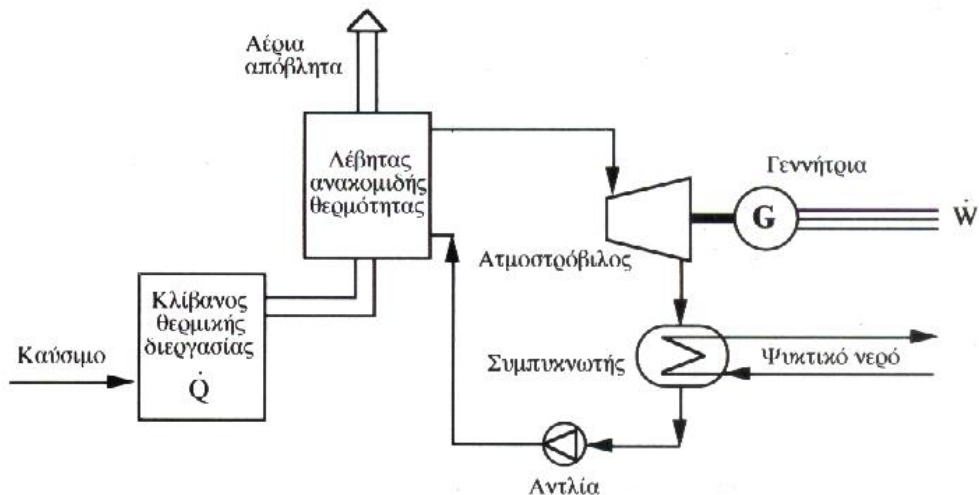


Σχήμα 3. Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης

Τα συστήματα απομάστευσης είναι ακριβότερα και έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης (περίπου 80%) από τα συστήματα αντίθλιψης. Όμως, έχουν τη δυνατότητα ανεξάρτητης (μέσα σε ορισμένα όρια) ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με ρύθμιση της ολικής παροχής ατμού και επομένως της παροχής ατμού προς τον συμπυκνωτή.

• **Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο σε κύκλο βάσης.**

Αρκετές βιομηχανίες (π.χ. χαλυβουργεία, υαλουργεία, κεραμουργεία, εργοστάσια τσιμέντου, εργοστάσια αλουμινίου, διυλιστήρια πετρελαίου, κ.λπ.) έχουν αέρια απόβλητα υψηλής θερμοκρασίας. Μετά τη θερμική διεργασία, τα αέρια αυτά μπορούν να περάσουν μέσα από λέβητα ανακομιδής θερμότητας, όπου παράγεται ατμός που κινεί μια ατμοστροβιλογεννήτρια. Έτσι, η μονάδα παραγωγής θερμότητας μετατρέπεται σε σύστημα συμπαραγωγής με κύκλο βάσης ατμού (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Σύστημα συμπαραγωγής με κύκλο βάσης ατμού

⇒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Υπάρχουν δύο βασικές διατάξεις : ανοικτού κύκλου και κλειστού κύκλου.

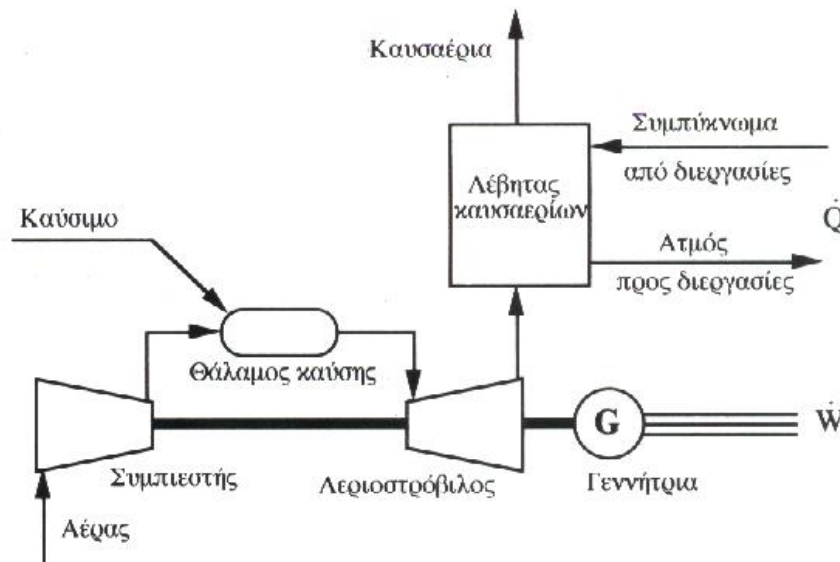
• Συστήματα αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου

Οι περισσότερες αεριοστρόβιλικές μονάδες είναι ανοικτού τύπου: αέρας αναρροφάται από την ατμόσφαιρα, συμπιέζεται και οδηγείται στον θάλαμο καύσης. Τα καυσαέρια αποτονώνονται στον αεριοστρόβιλο (που κινεί τη γεννήτρια), από τον οποίο βγαίνουν με θερμοκρασία 300-600°C. Η σημαντική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή και η υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι οι κύριες αιτίες του μικρού βαθμού απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (25-35% και σε σύγχρονες προηγμένες μονάδες 40%).

Η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων κάνει τις μονάδες αυτές ιδανικές για συμπαραγωγή (Σχήμα 5), που αυξάνει τον βαθμό απόδοσης στο 60-80%. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι εκμετάλλευσης της θερμότητας των καυσαερίων:

- Άμεση χρήση σε θερμικές διεργασίες (θέρμανση, ξήρανση, κ.λπ.).
- Διοχέτευση των καυσαερίων σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας (λέγεται και λέβητας καυσαερίων). Εκεί παράγεται ατμός υψηλών χαρακτηριστικών, που είναι κατάλληλος όχι μόνον για θερμικές διεργασίες αλλά και για την κίνηση ατμοστρόβιλου (συνδεδεμένου με γεννήτρια ή άλλο μηχάνημα). Στη δεύτερη περίπτωση πρόκειται για σύστημα συνδυασμένου κύκλου, που περιγράφεται εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα.

Και στους δύο τρόπους, είναι δυνατή η αύξηση του θερμικού περιεχομένου (δηλ. της θερμοκρασίας) των καυσαερίων, και επομένως της αποδιδόμενης θερμότητας, όταν απαιτείται. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην υψηλή περιεκτικότητα οξυγόνου των καυσαερίων. Καυστήρες τοποθετημένοι μετά τον αεριοστρόβιλο χρησιμοποιούν τα καυσαέρια για την καύση πρόσθετου καυσίμου.



Σχήμα 5: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου

Τα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου έχουν ισχύ 100 kW – 100 MW. Λειτουργούν συνήθως με φυσικό αέριο ή ελαφρά αποστάγματα πετρελαίου (π.χ. καύσιμο Diesel), ενώ ευοίωνες παρουσιάζονται οι προοπτικές για χρήση γαιανθράκων σε εξαεριωμένη μορφή. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν

καύσιμα αέρια, που παράγονται, π.χ., κατά την καταλυτική σχάση υδρογονανθράκων σε διυλιστήρια πετρελαίου.

Γενικά, πάντως, χρειάζεται προσοχή, επειδή τα πτερύγια του αεριοστροβίλου είναι εκτεθειμένα στα προϊόντα της καύσης, τα προϊόντα αυτά πρέπει να μην έχουν συστατικά που προκαλούν διάβρωση (νάτριο, κάλιο, ασβέστιο, βανάδιο, θείο, κ.λπ.) και τα στερεά σωματίδια πρέπει να είναι αρκετά μικρού μεγέθους ώστε να μην προκαλούν φθορά κατά την πρόσκρουσή τους στα πτερύγια.

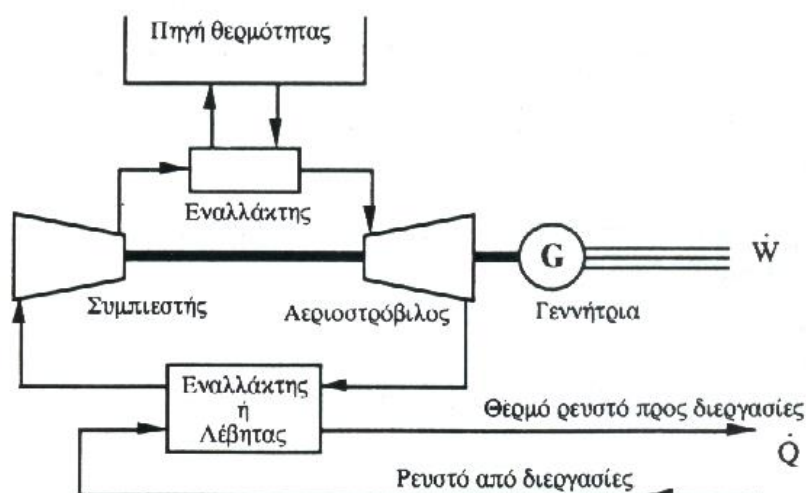
Εάν το καυσαέριο περιέχει τέτοια συστατικά, πρέπει να καθαρισθεί με ειδικές διατάξεις, πριν οδηγηθεί στον αεριοστροβίλο. Είναι επίσης ενδεχόμενο, το καύσιμο να χρειασθεί καθαρισμό, πριν από την εισαγωγή του στο θάλαμο καύσης.

Ο χρόνος εγκατάστασης των συστημάτων συμπαραγωγής αεριοστροβίλων είναι 9-14 μήνες για ισχείς μέχρι 7 MW και φθάνει τα δύο έτη για μεγαλύτερες μονάδες. Η αξιοπιστία και η μέση ετήσια διαθεσιμότητα συστημάτων αεριοστροβίλου, που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, είναι συγκρίσιμες με εκείνες των συστημάτων ατμοστροβίλου. Οι μονάδες που λειτουργούν με υγρό καύσιμο απαιτούν πιο συχνές συντηρήσεις, με συνέπεια τη χαμηλότερη διαθεσιμότητα. Η χρήσιμη διάρκεια ζωής είναι 15-20 έτη και μπορεί να μειωθεί σημαντικά από καύσιμο κακής ποιότητας ή ανεπαρκή συντήρηση.

- **Συστήματα αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου.**

Στα συστήματα κλειστού κύκλου, το εργαζόμενο ρευστό (συνήθως ήλιο ή αέρας) κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα. Θερμαίνεται μέχρι την κατάλληλη θερμοκρασία σε εναλλάκτη θερμότητας, πριν από την είσοδο στον αεριοστροβίλο, και ψύχεται μετά την έξοδό του από αυτόν (Σχήμα 6) καθώς το ρευστό δεν συμμετέχει στην καύση, διατηρείται καθαρό και έτσι αποφεύγεται η μηχανική και η χημική διάβρωση του αεριοστροβίλου από τα προϊόντα της καύσης.

Η εξωτερική καύση επιτρέπει τη χρήση οποιουδήποτε καυσίμου στα συστήματα αυτά: άνθρακα, απόβλητα βιομηχανιών ή πόλεων, βιομάζα, υγρά ή αέρια καύσιμα παραγόμενα από βιομάζα, κ.λπ. Πυρηνική ή ηλιακή ενέργεια μπορούν επίσης να αποτελέσουν την πηγή θερμότητας.



Σχήμα 6: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστροβίλο κλειστού κύκλου

Στην Ευρώπη και στην Ιαπωνία λειτουργούν συστήματα αυτού του τύπου με ισχείς από 2-50 MW, ο αριθμός τους όμως είναι περιορισμένος. Μετά την απόκτηση αρκετής εμπειρίας, η αξιοπιστία των συστημάτων κλειστού κύκλου προβλέπεται ότι θα είναι τουλάχιστον ίση με εκείνη των συστημάτων ανοικτού κύκλου, ενώ η διαθεσιμότητα θα είναι υψηλότερη χάρη στις μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης, που οφείλονται στην καθαρότητα του εργαζόμενου ρευστού.

⇒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- α. Μονάδες μικρής κλίμακας με αεριομηχανή (15-1000 kW) ή κινητήρα Diesel (75-1000 kW),
- β. Συστήματα μέσης ισχύος (1000-6000 kW) με αεριομηχανή ή κινητήρα Diesel,
- γ. Συστήματα μεγάλης ισχύος (άνω των 6000 kW) με κινητήρα Diesel.

Αεριομηχανές (Gas engines) ονομάζονται οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με αέριο καύσιμο, π.χ., φυσικό αέριο, βιοαέριο, κ.λπ.

Εμπορικά είναι διαθέσιμοι οι ακόλουθοι τύποι αεριομηχανών.

- **Βενζινοκινητήρες αυτοκινήτων που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές.** Είναι συνήθως μικρές μηχανές (15-30 kW), ελαφρές, με μεγάλη συγκέντρωση ισχύος. Η μετατροπή πολύ λίγο επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης, ενώ μειώνει την ισχύ κατά 18% περίπου. Χάρη στη μαζική παραγωγή οι τιμές τους είναι χαμηλές αλλά η διάρκεια ζωής τους είναι σχετικά μικρή (1000-3000 ώρες).
- **Κινητήρες Diesel αυτοκινήτων που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές.** Έχουν ισχύ μέχρι 200 kW. Η μετατροπή επιτυγχάνεται με τροποποιήσεις των εμβόλων, των κεφαλών και του μηχανισμού των βαλβίδων, που επιβάλλονται από το ότι η έναυση δεν γίνεται πλέον με απλή συμπίεση αλλά με σπινθηριστή. Η μετατροπή συνήθως δεν προκαλεί μείωση της ισχύος, καθώς υπάρχει περιθώριο μείωσης της πίεσης αέρα.
- **Σταθερές μηχανές[∴] που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές ή που έχουν από την αρχή σχεδιασθεί ως αεριομηχανές.** Οι μηχανές αυτές είναι βαριές και στιβαρές. Κατασκευάζονται για εφαρμογές στη βιομηχανία και στα πλοία. Η ισχύς τους φθάνει 3000 kW. Η ανθεκτική κατασκευή τους μειώνει τις απαιτήσεις συντηρήσεων αλλά αυξάνει το κόστος αγοράς τους. Είναι μηχανές κατάλληλες για συνεχή λειτουργία σε υψηλό φορτίο.
- **Σταθερές μηχανές διπλού καυσίμου.** Είναι κινητήρες Diesel ισχύος μέχρι 6000 kW. Το καύσιμο αποτελείται κατά 90% από φυσικό αέριο, η έναυση του οποίου γίνεται όχι με σπινθηριστή αλλά με έγχυση υγρού καυσίμου Diesel (που αποτελεί το υπόλοιπο 10% της προσφερόμενης ενέργειας). Έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να λειτουργούν είτε με φυσικό αέριο είτε με καύσιμο Diesel, το οποίο βέβαια αυξάνει το κόστος αγοράς και συντήρησης. Οι κινητήρες Diesel διακρίνονται σε ταχύστροφους, μεσόστροφους και βραδύστροφους.

[∴] Λέγονται σταθερές μηχανές (stationary engines) σε αντιδιαστολή από τις μηχανές αυτοκινήτων, τραίνων, πλοίων, κ.λπ., που είναι κινητές, δηλ. μεταφερόμενες.

Ο Πίνακας 1 δίνει τα όρια ταχύτητας περιστροφής και ισχύος για τον κάθε τύπο, χωρίς τα όρια αυτά να είναι απόλυτα αυστηρά.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά κινητήρων Diesel

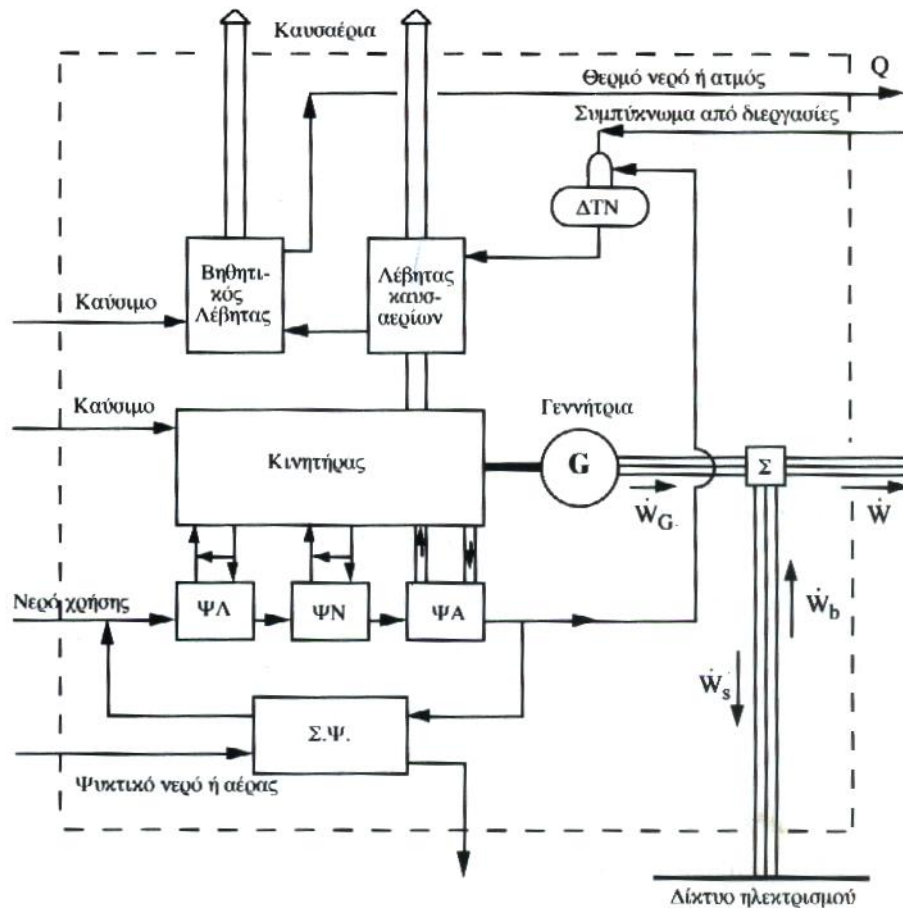
Τύπος	Ταχύτητα (RPM)	Ισχύς (kW)	Εφαρμογές
Ταχύστροφος	1200 – 3600	75 – 1.500	Αυτοκίνητα-Πλοία
Μεσόστροφος	500 – 1200	500 – 15.000	Πλοία-Σιδηρόδρομος
Βραδύστροφος	100 – 180	2000 – 40.000	Πλοία-Βιομηχανία

Κατάλληλα καύσιμα είναι όλα τα αποστάγματα πετρελαίου (τα βαρύτερα για τους μεγαλύτερους κινητήρες). Οι μεγάλοι βραδύστροφοι κινητήρες μπορούν να καύσουν ακόμη και κατάλοιπα από την απόσταξη του πετρελαίου (residuals).

Όπως και στην περίπτωση των αεριοστροβίλων, τα καυσαέρια των κινητήρων βρίσκουν είτε άμεση είτε έμμεση χρήση. Η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι 300-400°C, δηλ. αισθητά χαμηλότερη από εκείνη του αεριοστροβίλου, γι' αυτό και κάνει πιο συχνή την ανάγκη για συμπληρωματική θερμότητα. Αυτή αποκτάται είτε με τοποθέτηση καυστήρα και προσαγωγή αέρα για καύση συμπληρωματικού καυσίμου στον λέβητα καυσαερίων (ή στον κλίβανο της θερμικής διεργασίας), είτε με εγκατάσταση βοηθητικού λέβητα. Οι μεγάλοι κινητήρες προσφέρουν τη δυνατότητα συνδυασμένου κύκλου.

Το Σχήμα 7 απεικονίζει ένα γενικό διάγραμμα ροής τέτοιου συστήματος, χωρίς να αποτελεί τη μόνη δυνατή διάταξη. Ο κινητήρας κινεί τη γεννήτρια. Τέσσερις εναλλάκτες ανακτούν θερμότητα από ρευστά που έχουν σχέση λειτουργία της μηχανής: ψυγείο λαδιού, ψυγείο νερού (του κλειστού κυκλώματος του κινητήρα), ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης και εναλλάκτης ανακομιδής θερμότητας από τα καυσαέρια του κινητήρα (ή λέβητα καυσαερίων). Με τη θερμότητα αυτή θερμαίνεται το νερό που προορίζεται για διάφορες χρήσεις. Σε συστήματα μέσης και μεγάλης ισχύος, η θερμότητα επαρκεί και για την παραγωγή ατμού. Οι μικροί κινητήρες δεν έχουν ψυγείο λαδιού. Εξάλλου, όταν ο κινητήρας δεν είναι εφοδιασμένος με στροβιλοπληρωτή (σε μονάδες προς το κάτω όριο της περιοχής ισχύος), δεν υπάρχει ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης.

Η συγκέντρωση ισχύος του κινητήρα αυξάνει με υπερπλήρωση του θαλάμου καύσης. Ο στροβιλοπληρωτής (λέγεται και ζεύγος υπερπλήρωσης) αποτελείται από αεριοστρόβιλο, που κινείται με τα καυσαέρια του κινητήρα και κινεί φυγοκεντρικό αεροσυμπιεστή. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας εξόδου από τον στροβιλοπληρωτή (120-140°C), ο αέρας έχει χαμηλή πυκνότητα. Για να αυξηθεί ο βαθμός πληρότητας των κυλίνδρων, ο αέρας ψύχεται σε ειδικό ψυγείο (Σχήμα 7), προσφέροντας θερμότητα στο νερό χρήσης.



Σχήμα 7: Σύστημα συμπαραγωγής με παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις από πλευράς θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το ψυγείο: χαμηλή θερμοκρασία (περίπου 45°C), ή υψηλή θερμοκρασία (περίπου 90°C). Η χαμηλή θερμοκρασία συντελεί σε υψηλότερο βαθμό πληρότητας και επομένως υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος. Όμως, η ανακτώμενη θερμότητα βρίσκει περιορισμένη χρήση, διότι το νερό στην έξοδο του ψυγείου έχει χαμηλή θερμοκρασία (30-35°C). Η λύση αυτή μπορεί να επιλεγεί όταν υπάρχει ανάγκη προθέρμανσης νερού, που έρχεται στο σύστημα με θερμοκρασία 20-25°C. εάν το νερό έρχεται στο σύστημα με θερμοκρασία 60-70°C, όπως συμβαίνει, π.χ. στα δίκτυα κεντρικής θέρμανσης, τότε η λύση της υψηλής θερμοκρασίας είναι προτιμότερη από πλευράς εκμεταλλεύσεως της ενέργειας του καυσίμου, καθώς αυξάνει τον ολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά 3-5 %. Η θερμοκρασιακή στάθμη επηρεάζει τη σχετική ως προς τη ροή του νερού τοποθέτηση των τριών ψυγείων (λαδιού, νερού και αέρα).

Με ανάκτηση θερμότητας από τα τρία ψυγεία, το νερό θερμαίνεται μέχρι τους 75-80°C. Κατόπιν έρχεται στον εναλλάκτη ανακομιδής θερμότητας των καυσαερίων, όπου θερμαίνεται μέχρι τους 85-90°C ή και ατμοποιείται. Μονάδες μεσαίου μεγέθους παράγουν κορεσμένο ατμό 180-200°C, ενώ μεγάλες μονάδες μπορούν να δώσουν υπέρθερμο ατμό με πίεση 15-20 bar και θερμοκρασία 250-350°C.

Η ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του εναλλάκτη εξαρτάται από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Για καύσιμο Diesel, το όριο είναι 160-170°C, ενώ για φυσικό αέριο είναι 90-100°C.

Ο βαθμός απόδοσης μικρών και μεσαίων κινητήρων είναι 35-45%, ενώ σε σύγχρονους μεγάλους κινητήρες φθάνει το 50%. Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής με εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης βρίσκεται στην περιοχή του 80%.

Η διάρκεια ζωής είναι 15-20 έτη και εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, την ποιότητα του καυσίμου και την ποιότητα της συντήρησης. Οι παλινδρομικοί κινητήρες απαιτούν τακτικότερη συντήρηση απ' ό,τι τα προηγούμενα συστήματα με αποτέλεσμα μικρότερη μέση ετήσια διαθεσιμότητα: 80-90%.

⇒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Ο όρος **“συνδυασμένος κύκλος”** αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο ρευστό και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κορυφής) αποβάλλει θερμότητα, που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (βάσης) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης.

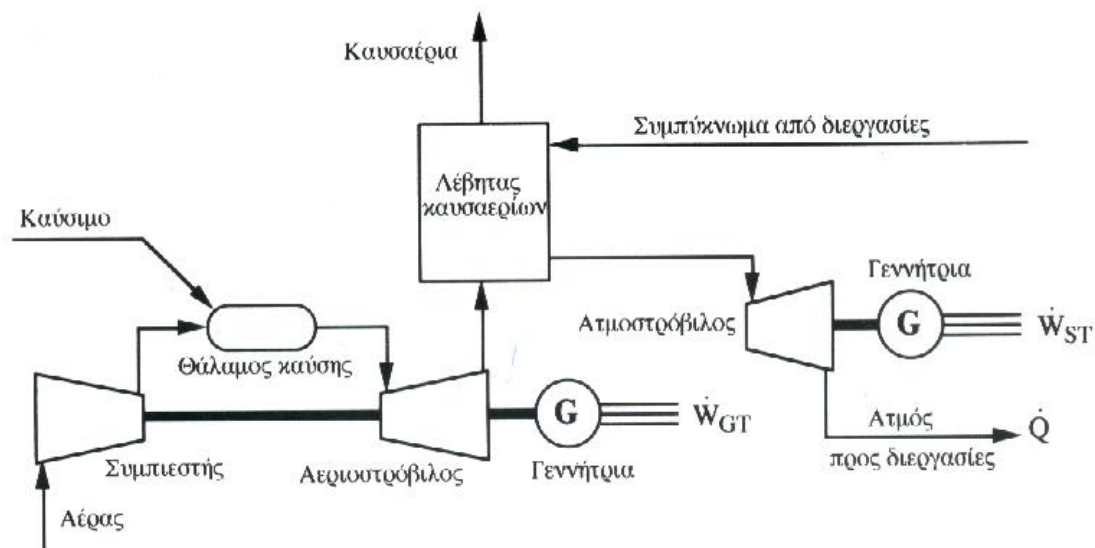
Τα πιο διαδεδομένα συστήματα συνδυασμένου κύκλου είναι εκείνα με συνδυασμό αεριοστροβίλου - ατμοστροβίλου (κύκλοι Joule - Rankine). Το Σχήμα 8 δείχνει τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος, ενώ το Σχήμα 9 απεικονίζει λεπτομερέστερα ένα σύγχρονο σύστημα δύο πιέσεων ατμού και δίνει τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά του. Η παραγωγή ατμού σε δύο ή και τρεις διαφορετικές πιέσεις κάνει την εγκατάσταση πιο περίπλοκη, αλλά αυξάνει τον βαθμό απόδοσης. Χρησιμοποιείται στις μεγάλες μονάδες.

Η υψηλή περιεκτικότητα οξυγόνου στα καυσαέρια του αεριοστροβίλου (περίπου 17%) επιτρέπει την καύση συμπληρωματικού καυσίμου στον λέβητα καυσαερίων, εάν κριθεί αναγκαία για την αύξηση ισχύος του συστήματος. Η συμπληρωματική καύση αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο, αλλά κάνει την εγκατάσταση και ιδιαίτερα τις διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου πιο περίπλοκες.

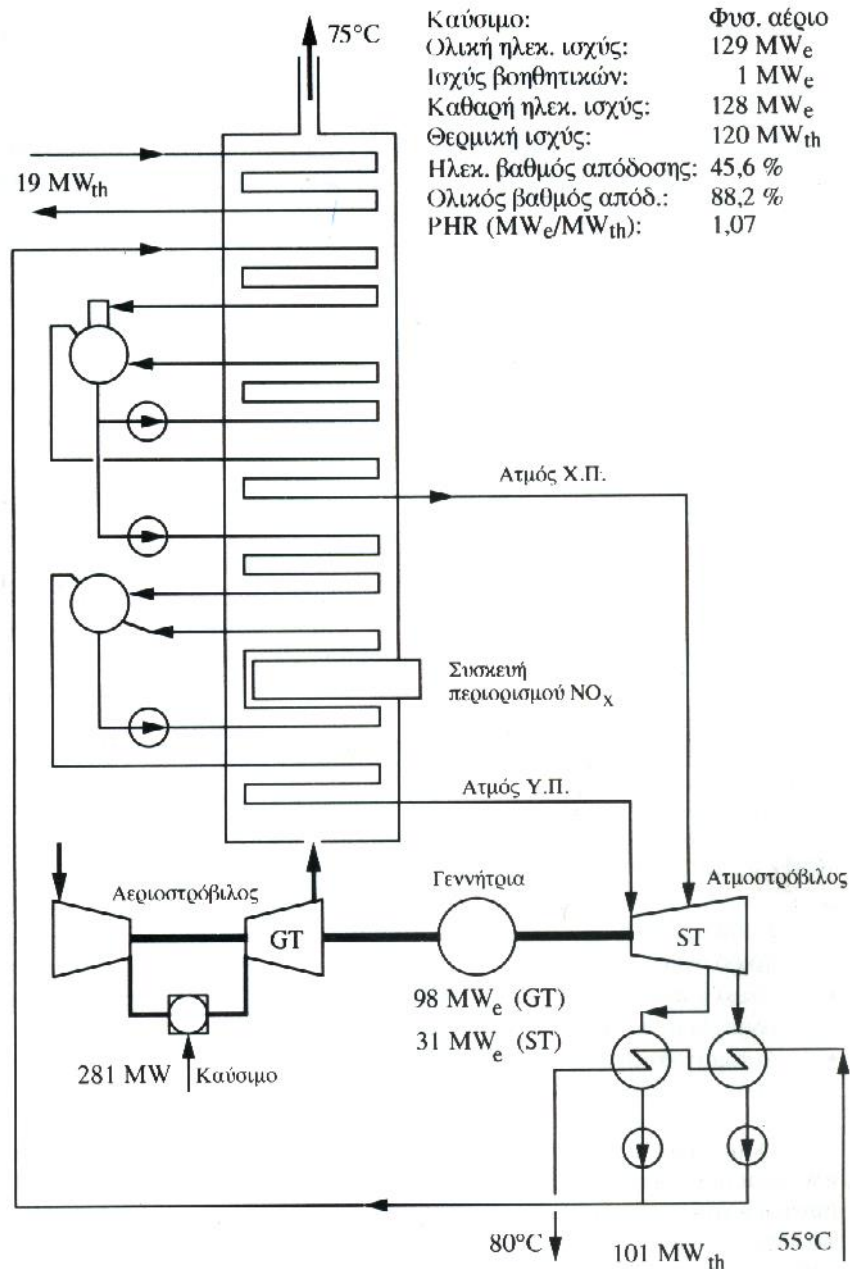
Η ισχύς των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή 20-400 MW, ενώ κατασκευάζονται επίσης και μικρότερες μονάδες με ισχύ 4-11 MW. Η συγκέντρωση ισχύος (ισχύς ανά μονάδα όγκου) των συστημάτων αυτών είναι υψηλότερη από τη συγκέντρωση ισχύος των συστημάτων απλού κύκλου αεριοστροβίλου (Joule) ή ατμοστροβίλου (Rankine). Ως προς τα καύσιμα ισχύει ότι αναφέρθηκε για τα συστήματα αεριοστροβίλου.

Ο χρόνος εγκατάστασης είναι 2-3 έτη. Είναι δυνατή η ολοκλήρωση της εγκατάστασης σε δύο πεδία: Εγκαθίσταται πρώτα η μονάδα αεριοστροβίλου, που μπορεί να είναι έτοιμη για λειτουργία σε 12-18 μήνες. Ενώ αυτή λειτουργεί, συμπληρώνεται το σύστημα με τη μονάδα του ατμοστροβίλου.

Η αξιοπιστία των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου είναι 80-85 %, η μέση ετήσια διαθεσιμότητα 77-85% και ο οικονομικός χρόνος ζωής 15-25 έτη.
 Είναι επίσης δυνατός ο συνδυασμός κύκλου Diesel με κύκλο Rankine. Η διάταξη μοιάζει με εκείνη του Σχήματος 8, όπου η μονάδα συμπίεστη - θαλάμου καύσης - αεριοτροβίλου αντικαθίσταται από τον κινητήρα Diesel και τους εναλλάκτες θερμότητας που τον συνοδεύουν.



Σχήμα 8: Σύστημα συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης



Σχήμα 9: Διάγραμμα ροής σύγχρονου συστήματος συνδυασμένου κύκλου με ατμοστρόβιλο απομάστευσης(ASEA STAL) [IEA,1988]

⇒ ΚΥΚΛΟΙ ΒΑΣΗΣ RANKINE ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Στον κύκλο βάσης του Σχήματος 4, εργαζόμενο μέσο είναι το νερό, που εξατμίζεται με ανάκτηση θερμότητας από αέρια υψηλής θερμοκρασίας (600°C ή και υψηλότερης). Η παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας με ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (80-300°C) είναι δυνατή εάν χρησιμοποιηθούν οργανικά ρευστά, π.χ. τολουόνη, που έχουν θερμοκρασία βρασμού αρκετά χαμηλότερης εκείνης του νερού. Έτσι, πηγές θερμότητας μπορούν να είναι η ηλιακή ενέργεια, βιομηχανικά απόβλητα, γεωθερμική ενέργεια, καυσαέρια ή θερμότητα ψύξης μηχανών, κ.λπ.

Η ισχύς των συστημάτων αυτών κυμαίνεται στην περιοχή 2 kW – 10 MW. Ο βαθμός απόδοσης είναι μικρός, 10-30%, αλλά σημασία έχει το γεγονός ότι ένα τέτοιο σύστημα παράγει πρόσθετη ισχύ χωρίς να ξοδεύει καύσιμο. Από κατασκευαστικής πλευράς, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών, ώστε να μην παθαίνουν διάβρωση από το οργανικό ρευστό (π.χ. χρήση ανοξείδωτου χάλυβα), και στη στεγανότητα των στοιχείων του συστήματος, ώστε να μην διαφεύγει το οργανικό ρευστό στην ατμόσφαιρα.

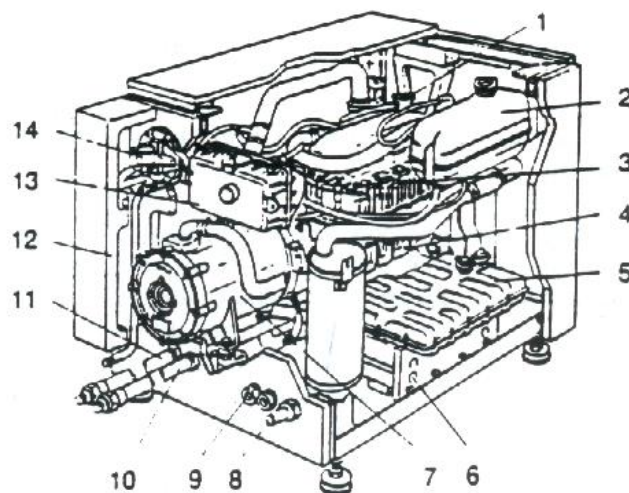
Ο χρόνος εγκατάστασης μικρών συστημάτων (μέχρι 50 kW), και ιδιαίτερα εκείνων που είναι κατάλληλα για χρήση στον εμπορικό – κτιριακό τομέα, είναι 4-8 μήνες, ενώ για μεγαλύτερες μονάδες είναι 1-2 έτη. Καθώς η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά νέα, δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για την αξιοπιστία των συστημάτων. Εκτιμάται ότι η μέση ετήσια διαθεσιμότητά τους είναι 80-90%. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 20 έτη.

⇒ ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (“ΠΑΚΕΤΑ”)

Μεγάλη ώθηση στη διάδοση της συμπαραγωγής αναμένεται ότι θα δώσει η μαζική παραγωγή τυποποιημένων μονάδων σε μορφή πακέτου με ηλεκτρική ισχύ 10-1000kW, που έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος,
- Μικρό όγκο,
- Εύκολη εγκατάσταση (το μόνο που χρειάζεται είναι η σύνδεσή τους με τα υδραυλικά και ηλεκτρικά δίκτυα),
- Αυτοματοποιημένη λειτουργία χωρίς τη συνεχή παρακολούθηση από εξειδικευμένο προσωπικό.

Οι μονάδες αυτές συνήθως έχουν κινητήρα Diesel. Σε ισχύεις μικρότερες των 100 kW είναι δυνατή η χρήση αεριοστροβίλου. Μπορούν να λειτουργούν με υγρό ή αέριο καύσιμο. Το φυσικό αέριο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο καύσιμο για τις μονάδες αυτές χάρη στην καθαρότητα, την έλλειψη ανάγκης αποθήκευσης και τη χαμηλή τιμή του. Το Σχήμα 10 δείχνει μια μονάδα μικρής ισχύος, ενώ μεγαλύτερες μονάδες έχουν τη μορφή που απεικονίζει το Σχήμα 11. Για το διάγραμμα ροής, ισχύει το Σχήμα 7 με τις παρατηρήσεις που το συνοδεύουν.

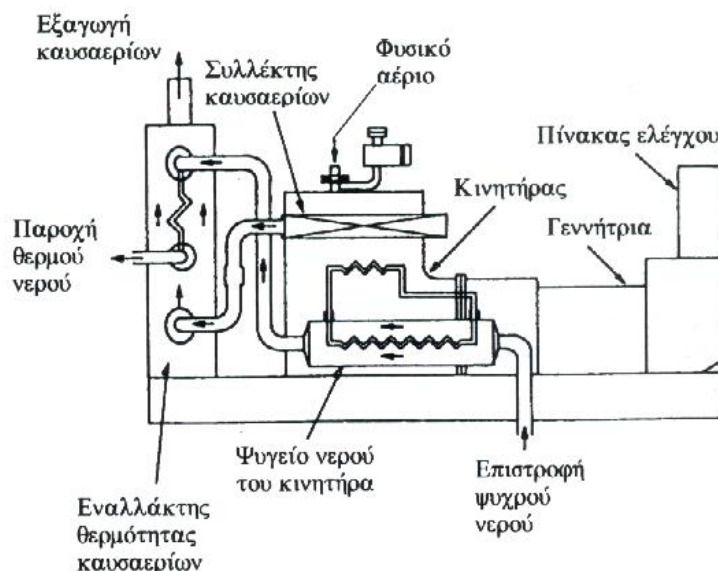


1. Κινητήρας Fiat 127
2. Δοχείο νερού

3. Εναλλάκτης καυσαερίων/νερού
4. Εναλλάκτης λαδιού/νερού

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 5. Ελαιολεκάνη | 10. Εξαγωγή θερμού νερού |
| 6. Εναλλάκτης νερού/νερού | 11. Εισαγωγή κρύου νερού |
| 7. Ηλεκτρογεννήτρια | 12. Θερμική και ηχητική μόνωση |
| 8. Εξαγωγή καυσαερίου | 13. Εισαγωγή αέρα |
| 9. Ηλεκτρική σύνδεση | 14. Εισαγωγή φυσικού αερίου |

Σχήμα 10: Τυποποιημένη μονάδα συμπαραγωγής Fiat TOTEM 15 kW



Σχήμα 11: Σχηματική απεικόνιση τυποποιημένης μονάδας συμπαραγωγής με παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης [Jennekens,1989]

Τα πακέτα συμπαραγωγής με κινητήρα Diesel είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για τις εφαρμογές του εμπορικού-κτιριακού τομέα. Είναι γνωστά επίσης με το όνομα συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας «small-scale cogeneration systems». Το 27-35% της ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και το 50-55% σε θερμότητα.

Καθώς η διάδοση των μονάδων αυτών έχει αρχίσει σχετικά πρόσφατα, δεν υπάρχουν πολλά δημοσιευμένα στοιχεία γύρω από την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα τους.

Σχετική μελέτη με αντικείμενο 46 μονάδες εγκαταστημένες στην Καλιφόρνια έδειξε έναν μέσο όρο διαθεσιμότητας 79% με τυπική απόκλιση 22,9%. Η διαθεσιμότητα των μονάδων με επιμελημένη κατασκευή και συντήρηση φθάνει το 90%. Σημαντική συμβολή στο σημείο αυτό έχει ο αυτόματος έλεγχος της λειτουργίας των μονάδων. Μικροεπεξεργαστές, εγκατεστημένοι στον χώρο όπου βρίσκεται η μονάδα, παρακολουθούν τις τιμές κρίσιμων παραμέτρων και μεταβιβάζουν τα σχετικές πληροφορίες, μέσω αποκλειστικής τηλεφωνικής γραμμής, σε κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Όταν η εξέλιξη των τιμών ορισμένων παραμέτρων δείχνει επερχόμενη βλάβη, ειδοποιείται η ομάδα συντήρησης, που επεμβαίνει πριν ακόμη η βλάβη εκδηλωθεί. Ένα τέτοιο δίκτυο παρακολούθησης συστημάτων συμπαραγωγής μικρής κλίμακας έχει εγκατασταθεί στην Αγγλία με πολύ καλά αποτελέσματα. Έντονη διάδοση των μονάδων αυτών παρατηρείται επίσης στην Ολλανδία και Γερμανία.

⇒ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η κυψέλη καυσίμου (fuel cell)* είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή, που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης.

Στη βασική της μορφή λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο). Καθώς η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα.

Το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα και συνήθως μεθάνιο (CH_4), που αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Ορισμένοι τύποι κυψελών μπορούν να λειτουργήσουν επίσης και διοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες.

Πρόκειται για τεχνολογία που βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας και ανάπτυξης. Δεν είναι πλατιά γνωστή και διαδεδομένη ακόμη αλλά έχει πολύ καλές προοπτικές εφαρμογών στη συμπαραγωγή.

Από τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου μόνον οι κυψέλες φωσφορικού οξέως έχουν αναπτυχθεί βαθμό που είναι ήδη κατάλληλες για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και είναι σήμερα εμπορικά διαθέσιμες. Επιδεικτικές μονάδες ισχύος 25 kW - 11 MW έχουν κατασκευασθεί σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, στις Η.Π.Α. και στην Ιαπωνία. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους (περίπου 200°C) περιορίζει τη θερμοκρασία της ανακτώμενης θερμότητας. Υπάρχουν σήμερα τυποποιημένες μονάδες συμπαραγωγής με θερμότητα που είναι διαθέσιμη σε θερμοκρασία 80-90 °C.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή στον βιομηχανικό και εμπορικό- κτιριακό τομέα (ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το φυσικό αέριο). Κύρια πλεονεκτήματά τους είναι τα ακόλουθα:

- αρθρωτή (modular) δομή, που διευκολύνει την κατασκευή μονάδων με την επιθυμητή ισχύ,
- διατήρηση υψηλού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ακόμη και σε μερικό φορτίο (δηλ. φορτίο μικρότερο του ονομαστικού),
- ευκολία αυτοματισμού,
- χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- χαμηλή στάθμη θορύβου.

Χάρη στον υψηλό βαθμό απόδοσης και τα καθαρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται, οι εκπομπές CO_2 και SO_2 είναι κατά 10-100 φορές χαμηλότερες από εκείνες άλλων συστημάτων. Ειδικότερα, επειδή οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες της καύσης, οι εκπομπές NO_x είναι μικρότερες κατά μία τάξη μεγέθους από τις εκπομπές των συστημάτων που στηρίζονται στην καύση. Οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και η χαμηλή στάθμη θορύβου κάνουν τις κυψέλες καυσίμου πιο κατάλληλες από άλλα συστήματα για εγκατάσταση και λειτουργία σε κατοικημένες περιοχές και σε κτίρια όπως ξενοδοχεία, νοσοκομεία, κ.λπ. Μειονεκτήματα, που εμποδίζουν προς το παρόν την πλατιά διάδοσή τους, είναι

* Ο αγγλικός όρος "fuel cell" έχει αποδοθεί στα ελληνικά με τους όρους "στοιχείο καυσίμου" και (σπανιότερα) "κελλίο καυσίμου", χωρίς κανείς από τους δύο να θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητικός. Προτείνεται εδώ η ονομασία "κυψέλη καυσίμου", που είναι πιο παραστατική για τη συσκευή αυτή.

- το υψηλό κόστος κατασκευής και
- η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής.

Οι προσπάθειες για αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών συνεχίζονται με προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης καθώς και με κατασκευή επιδεικτικών μονάδων.

⇒ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING

Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι επίσης δυνατή με μηχανές Stirling. Η τεχνική αυτή δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί και διαδοθεί αρκετά, αλλά το ενδιαφέρον για την ανάπτυξή της έχει αυξηθεί τελευταία, χάρη στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε σύγκριση με συστήματα κινητήρων Diesel, αεριοστροβίλων ή ατμοστροβίλων: δυνατότητα υψηλότερου βαθμού απόδοσης, μεγαλύτερη ευελιξία καυσίμου, καλή συμπεριφορά σε μερικό φορτίο, χαμηλές εκπομπές ρύπων, χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.

Αρχικά, η έρευνα και ανάπτυξη είχε ως αντικείμενο κινητήρες ισχύος 3-100 kW, κατάλληλους για αυτοκίνητα. Η προσπάθεια στράφηκε κατόπιν και προς κινητήρες ισχύος μέχρι 1-1,5 MW με αναμενόμενη διάρκεια ζωής της τάξεως των 20 ετών. Καθώς τα συστήματα βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης, δεν υπάρχουν συγκεντρωμένα στοιχεία για τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία τους, αναμένεται όμως ότι θα είναι συγκρίσιμη με εκείνη των κινητήρων Diesel. Χάρη στην εξωτερική καύση και στον κλειστό κύκλο λειτουργίας, τα κινούμενα μέρη του κινητήρα δεν εκτίθενται στα προϊόντα της καύσης με αποτέλεσμα οι φθορές να είναι περιορισμένες. Όμως, απαιτούνται στεγανωτικές διατάξεις για την αποφυγή διαρροών τόσο του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, όσο και του λιπαντικού λαδιού προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Η κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων με ικανοποιητική διάρκεια ζωής είναι ένα από τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν.

Η εξωτερική καύση στις μηχανές Stirling επιτρέπει η χρήση διαφόρων καυσίμων: υγρά ή αέρια καύσιμα, αέρια ή υγρά προερχόμενα από άνθρακα, καύσιμα προερχόμενα από βιομάζα, ακόμη και απορρίμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, είναι δυνατή η αλλαγή καυσίμου χωρίς διακοπή της λειτουργίας ή μετατροπή των ρυθμίσεων του κινητήρα. Χάρη στην ευελιξία τους, οι μηχανές Stirling μπορούν επίσης να αποτελέσουν στοιχεία ηλιακών ή πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ή συμπαραγωγής.

Το Σχήμα 12 αποτελεί μια απλοποιημένη απεικόνιση κινητήρα Stirling. Αέριο (π.χ., υδρογόνο, ήλιο, κλπ) συμπιέζεται και εκτονώνεται σε διάταξη κυλίνδρου- δύο εμβόλων με αποτέλεσμα την περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα. Το αέριο θερμαίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας χωρίς να συμμετέχει στην καύση (κινητήρας εξωτερικής καύσης).



Σχήμα 12: Απλοποιημένη απεικόνιση κινητήρα Stirling

Γ. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Δείκτες Ενεργειακής Συμπεριφοράς

Η ενεργειακή συμπεριφορά των συστημάτων συμπαραγωγής περιγράφεται με ορισμένους χαρακτηριστικούς δείκτες.

Στους ορισμούς που ακολουθούν, χρησιμοποιούνται τα εξής σύμβολα:

W: ηλεκτρική (ή μηχανική) ισχύς,

Q : θερμική ισχύς,

H_Σ: ισχύς καυσίμου που καταναλίσκεται από το σύστημα συμπαραγωγής:

$$H_{\Sigma} = m_{\Sigma} H_u \quad (1)$$

m_f : παροχή καυσίμου,

H_u : κατώτερη θερμογόνος ικανότητα καυσίμου,

H_{fW} : ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ισχύος W,

H_{fQ} : ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή θερμότητας Q,

H_{fX} : ολική ισχύς καυσίμου (ή καυσίμων) για τη χωριστή παραγωγή των W και Q

(δηλαδή χωρίς συμπαραγωγή):

$$H_{fX} = H_{fW} + H_{fQ} = (m_f H_u)_W + (m_f H_u)_Q \quad (2)$$

E_Q : ροή θερμικής εξέργειας που αντιστοιχεί στη θερμική ισχύ Q,

E_f : ροή εξέργειας καυσίμου:

$$E_f = m_f E_f \quad (3)$$

e_f : ειδική εξέργεια καυσίμου.

Ορίζονται στη συνέχεια οι σημαντικότεροι δείκτες.

Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

(ή μηχανικός, εάν πρόκειται για παραγωγή μηχανικού έργου):

$$\eta_e = W/H_{\Sigma} \quad (4)$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta_h = Q/H_{\Sigma} \quad (5)$$

Ολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \eta_e + \eta_h = (W + Q) / H_{\Sigma} \quad (6)$$

Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$\zeta = (W + E_Q) / E_{fX} \quad (7)$$

Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα (power to heat ratio):

$$PHR = W/Q \quad (8)$$

Λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμου (fuel energy savings ratio):

$$FESR = (H_{fX} - H_{f\Sigma}) / H_{fX} \quad (9)$$

Όπως προκύπτει από τους ορισμούς τους, τα μεγέθη η_e και PHR συνδέονται με τη σχέση

$$\eta = \eta_e (1 + 1/PHR) \quad (10)$$

που επίσης γράφεται

$$PHR = \eta_e / (\eta - \eta_e) = \eta_e / \eta_h \quad (11)$$

Οι σχέσεις αυτές βοηθούν στον προσδιορισμό αποδεκτών τιμών του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα PHR, όταν η τιμή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης η_e είναι γνωστή, δεδομένου ότι ο ολικός βαθμός απόδοσης δεν ξεπερνά το 85-88%.

Παράδειγμα :

Εάν είναι $\eta_e = 0,40$ και $0,65 \leq \eta \leq 0,90$
τότε $1,6 \geq PHR \geq 0,8$

εάν θεωρηθεί ότι το σύστημα συμπαραγωγής αντικαθιστά χωριστές μονάδες ηλεκτρισμού και θερμότητας με βαθμούς απόδοσης η_w και η_Q αντίστοιχα, όπου

$$\eta_w = W / H_{fW} \text{ και } \eta_Q = Q / H_{fQ} \quad (12)$$

τότε αποδεικνύεται ότι

$$FESR = 1 - [(PHR + 1) / \eta * (PHR/\eta_w + 1/\eta_Q)] \quad (13)$$

Ως παράδειγμα εφαρμογής ας θεωρηθεί το εξής:

Σύστημα συμπαραγωγής με ολικό βαθμό απόδοσης $\eta = 0,80$ και λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα $PHR = 0,6$ αντικαθιστά συμβατικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής βαθμού απόδοσης $\eta_w = 0,35$ και λέβητα βαθμού απόδοσης $\eta_Q = 0,80$. Τότε η εξίσωση (13), δίνει τον λόγο εξοικονόμησης καυσίμου $FESR = 0.325$, δηλαδή με τη συμπαραγωγή η κατανάλωση καυσίμου μειώνεται κατά 32,5%.

Ενεργειακά Χαρακτηριστικά Συστημάτων Συμπαραγωγής

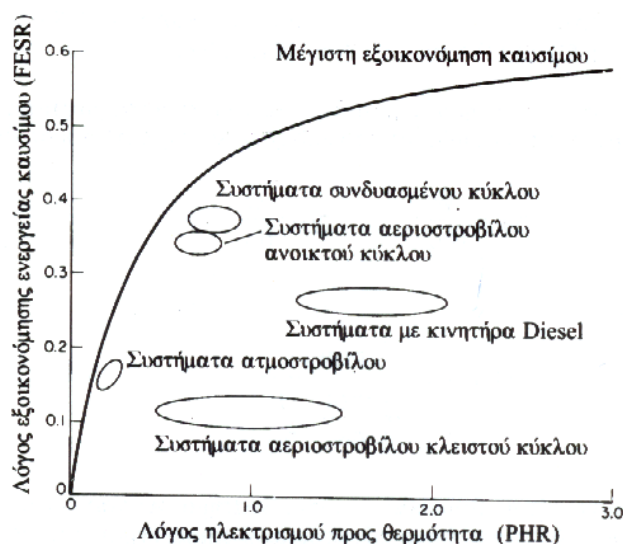
Το Σχήμα 13 δείχνει τις περιοχές τιμών του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα, PHR, και του λόγου εξοικονόμησης καυσίμου, FESR, για τους πέντε βασικούς

τύπους συστημάτων συμπαραγωγής. Τα όρια των περιοχών αυτών δεν είναι απόλυτα αυστηρά αλλά μπορούν μέχρι ένα βαθμό να μεταβληθούν με πρόσθετο εξοπλισμό. Για τον λόγο αυτόν, το Σχήμα 13 μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνον για μια πρώτη ένδειξη του είδους συστήματος, που θα ήταν κατάλληλο για κάποια εφαρμογή. Η τελική επιλογή πρέπει να στηριχθεί στις προδιαγραφές των μηχανημάτων που δίνουν οι κατασκευαστές.

Ακολουθούν αναλυτικότερα στοιχεία για τους διάφορους τύπους συστημάτων συμπαραγωγής.

Συστήματα ατμοστρόβιλου

Ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι σχετικά υψηλός (60-85%) και δεν πέφτει έντονα κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο (δηλ. φορτίο μικρότερο του ονομαστικού). Όμως, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός (τιμές της τάξεως του 15-20% είναι συνηθισμένες), που συντελεί σε μικρό λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα (Σχήμα 13). Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του ατμού που απαιτείται για τις θερμικές διεργασίες, τόσο χαμηλότερος είναι ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. Αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης μέχρι ένα σημείο μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της πίεσης και θερμοκρασίας του ατμού στην είσοδο του ατμοστρόβιλου.



Σχήμα 13: Περιοχές τιμών λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα (PHR) και λόγου εξοικονόμησης καυσίμου (FESR) διαφόρων συστημάτων συμπαραγωγής [Belding,1982]

Συστήματα με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης

Όταν όλη η θερμότητα του ατμού χρησιμοποιείται ωφέλιμα και το ρευστό επιστρέφει από τις θερμικές διεργασίες ως συμπύκνωμα χωρίς συμπληρωματική ψύξη και αποβολή θερμότητας προς το περιβάλλον, ο ολικός βαθμός απόδοσης φθάνει το 85%. Επειδή ο παραγόμενος ηλεκτρισμός είναι ανάλογος της παροχής ατμού προς τις θερμικές διεργασίες, η τιμή του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα, PHR, παραμένει περίπου σταθερή κατά τη μεταβολή φορτίου.

Συστήματα με ατμοστρόβιλο απομάστευσης

Η αποβολή θερμότητας στον συμπυκνωτή ατμού συντελεί σε μειωμένο ολικό βαθμό απόδοσης (φθάνει το 80%). Πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η δυνατότητα ανεξάρτητης (μέσα σε ορισμένα όρια) ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος, και επομένως της τιμής του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα, PHR.

Συστήματα με ατμοστροβίλο σε κύκλο βάσης

Τυπική περιοχή τιμών του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης είναι 5-15%. Ο βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός, αλλά ο ηλεκτρισμός παράγεται από θερμότητα που διαφορετικά θα χανόταν, χωρίς πρόσθετη κατανάλωση καυσίμου.

Συστήματα αεριοστροβίλου

Ανοικτός κύκλος.

Ο ηλεκτρικός βαθμός βρίσκεται συνήθως στην περιοχή 25-35%. Έχει αρχίσει πρόσφατα η κατασκευή μονάδων με υψηλότερη θερμοκρασία εισαγωγής των καυσαερίων στον αεριοστροβίλο (1200-1400°C), που επιτυγχάνουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 40%. Ο ολικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στην περιοχή 60-80%, δηλ. είναι ελαφρά μικρότερος του βαθμού απόδοσης συστημάτων ατμοστροβίλου, αν και υπάρχουν εξαιρέσεις του κανόνα αυτού. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος τόσο στο πλήρες φορτίο όσο και σε μερικό φορτίο, αλλά η μείωση του σε μερικό φορτίο, αλλά η μείωσή του σε μερικό φορτίο είναι πιο έντονη από εκείνη των συστημάτων ατμοστροβίλου. Επίσης, ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι υψηλότερος.

Κύκλος αεριοστροβίλου με αναγεννητική προθέρμανση του αέρα (δηλ. χρήση των καυσαερίων για προθέρμανση του αέρα καύσης) έχει υψηλότερο ηλεκτρικό αλλά χαμηλότερο ολικό βαθμό απόδοσης απ'ό,τι ο απλός κύκλος.

Κλειστός κύκλος

Ο βαθμός απόδοσης και ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα βρίσκονται περίπου στα ίδια επίπεδα με εκείνα των συστημάτων ανοικτού κύκλου. Τα συστήματα κλειστού κύκλου έχουν το πλεονέκτημα ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης δεν μειώνεται σε μερικό φορτίο, είναι μάλιστα ενδεχόμενο να αυξηθεί εάν υπάρχει αναγεννητική προθέρμανση του εργαζομένου ρευστού και κατάλληλο σύστημα ρύθμισης και ελέγχου. Ο ολικός βαθμός απόδοσης σε μερικό φορτίο εξαρτάται κυρίως από τον βαθμό απόδοσης της πηγής θερμότητας (π.χ., της μονάδας εξωτερικής καύσης).

Συστήματα με κινητήρα Diesel

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μικρών και μεσαίων μονάδων είναι 35-45%, ενώ σε μεγάλες μονάδες φθάνει το 50%. Ο ολικός βαθμός απόδοσης βρίσκεται στην περιοχή του 80%.

Δύο από τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι τα εξής :

- α) Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης όχι μόνο είναι υψηλός, αλλά και πολύ λίγο επηρεάζεται από τις μεταβολές φορτίο (περίπου σταθερή κατανάλωση καυσίμου).
- β) Η απόκριση του συστήματος στις μεταβολές φορτίου είναι ταχύτατη, χωρίς να παρουσιάζεται έντονη αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά τις μεταβατικές περιόδους.

Συστήματα συνδυασμένου κύκλου

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης βρίσκεται συνήθως στην περιοχή του 35-45%, ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι 70-88%. Η συγκέντρωση ισχύος (ισχύς ανα μονάδα όγκου) των συστημάτων αυτών είναι υψηλότερη από εκείνη των απλών κύκλων ατμοστροβίλου ή αεριοστροβίλου. Λειτουργία σε μερικό φορτίο έχει αρνητική επίδραση στον βαθμό απόδοσης του συστήματος.

Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία είναι διαθέσιμη η θερμότητα. Είναι δυνατή η λειτουργία τέτοιων συστημάτων με διαθέσιμο ρευστό θερμοκρασίας ακόμη και 75°C. Για θερμοκρασίες 75-425°C, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στην περιοχή 5-30%. Οι πιο συνηθισμένες τιμές είναι 10-20%.

Τυποποιημένες μονάδες συμπαραγωγής με παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης

Στις μονάδες-πακέτα, το 27-35% της ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και το 50-55% σε θερμότητα (20-25% θερμότητα θερμοκρασίας 350-400 °C που ανακτάται από τα καυσαέρια, και 25-30% θερμότητα θερμοκρασίας 60-110 °C που ανακτάται από τα ψυκτικά κυκλώματα του κινητήρα).

Επομένως, ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι 0,5-0,7, ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης φθάνει το 80%.

Κυψέλες καυσίμου

Επειδή η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική χωρίς την παρεμβολή θερμοδυναμικού κύκλου, ο βαθμός απόδοσης δεν περιορίζεται από εκείνον του κύκλου Carnot. Αν και θεωρητικά το άνω όριο είναι η μονάδα, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέως, που είναι σήμερα εμπορικά διαθέσιμες, κυμαίνεται στην περιοχή 37-45%, και εξαρτάται από την ποιότητα του καυσίμου και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Σε φορτίο 50%, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι ίσος ή και μερικές φορές μεγαλύτερος από τον βαθμό απόδοσης στο πλήρες φορτίο. Ο ολικός βαθμός απόδοσης φθάνει το 85-90%, ενώ ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα βρίσκεται στην περιοχή 0,8-1,0.

Κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας (δηλαδή τηγμένων αλάτων ή στερεού οξειδίου), της τάξεως του 1 MW, αναμένεται ότι θα έχουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 50%. Μεγαλύτερες μονάδες σε συνεργασία με συνδυασμένο κύκλο αεριοστροβίλου-ατμοστροβίλου αναμένεται ότι θα έχουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 50-55%, εάν πρόκειται για κυψέλες καυσίμου τηγμένων αλάτων, και 60-65% για κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου.

Μηχανές Stirling

Ο κύκλος Stirling έχει τη δυνατότητα υψηλότερου βαθμού απόδοσης από τους κύκλους Rankine (ατμοστροβίλου) ή Joule (αεριοστροβίλου), διότι πλησιάζει προς τον κύκλο Carnot πολύ περισσότερο απ' ό,τι εκείνοι. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης βρίσκεται σήμερα στην περιοχή του 40%, ενώ αναμένεται βελτίωση του στη στάθμη του 50%. Η απόδοση διατηρείται σταθερή και σε μερικό φορτίο. Ο ολικός βαθμός απόδοσης βρίσκεται στην περιοχή 60-80%, ενώ ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι 1,2-1,7.

Τα κυριότερα από τα χαρακτηριστικά, που προαναφέρθηκαν για τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα, για λόγους εποπτείας, στον Πίνακα 2. Επιπλέον των ενεργειακών στοιχείων, ο πίνακας αναφέρει και τη μέση ετήσια διαθεσιμότητα, δηλ το ποσοστό του χρόνου (π.χ. των 8760 ωρών του έτους) κατά το οποίο ένα σύστημα μπορεί να λειτουργεί ικανοποιητική (παίρνονται υπόψη η προληπτική συντήρηση και οι έκτακτες βλάβες).

Πίνακας 2: Κόρια τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαραγωγής

Σύστημα	Ηλεκ. Ισχύς	Μέση ετήσια διαθεσιμότητα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης %		Ολικός βαθμός απόδοσης %	Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα
	MW		%	Πλήρες φορτίο		
Ατμοστροβίλου	0,5 - 100*	90 - 95	14 - 30	12 - 25	60 - 85	0,1 - 0,3
Αεριοστροβίλου ανοικτού κύκλου	0,1 - 100	90 - 95	20 - 35	15 - 29	60 - 80	0,5 - 0,8
Αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου	0,5 - 100	90 - 95	30 - 35	30 - 35	60 - 80	0,5 - 0,8
Συνδυασμένου κύκλου αεριο/ατμοστροβίλου	4 - 100*	77 - 85	35 - 45	25 - 35	70 - 88	0,6 - 1,1
Κινητήρα Diesel	0,07 - 40	80 - 90	35 - 45	32 - 40	60 - 80	1,2 - 2,4
Πακέτο με παλινδρομικό κινητήρα	0,015 - 2	80 - 85	27 - 35	25 - 32	60 - 80	0,5 - 0,7
Κυψέλες καυσίμου	0,04 - 50	90 - 92	37 - 45	37 - 45	85 - 90	0,8 - 1,0
Μηχανές Stirling	0,003-1,5	85 - 90 (αναμενόμενη)	35 - 50	34 - 49	60 - 80	1,2 - 1,7

(*) Η τιμή των 100 MW είναι το πλιό συνηθισμένο άνω όριο σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συστήματα του είδους αυτού κατασκευάζονται και με μεγαλύτερες ισχύεις.

Τρόποι Λειτουργίας των Συστημάτων Συμπαραγωγής

Οι κυριότεροι τρόποι λειτουργίας ενός συστήματος συμπαραγωγής, δηλ. οι τρόποι ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή, είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ Παραγωγή θερμότητας ίσης με το θερμικό φορτίο (“**heat match**”). Εάν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια περισσότερη από το φορτίο, η περίσσεια πωλείται στο εθνικό δίκτυο. Εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μικρότερη από το φορτίο, το έλλειμμα συμπληρώνεται από το δίκτυο.
- ✓ Παραγωγή ηλεκτρισμού ίσου με το ηλεκτρικό φορτίο (“**electricity match**”). Βοηθητικός λέβητας συμπληρώνει τις πρόσθετες ανάγκες σε θερμότητα ,εάν χρειασθεί. Επίσης, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ψυγείων ικανών να αποβάλουν την περίσσεια θερμότητα, εάν προκύψει ανάγκη.
- ✓ **Μικτός τρόπος**, δηλαδή παρακολούθηση άλλοτε του θερμικού φορτίου (τρόπος α’) και άλλοτε του ηλεκτρικού φορτίου (τρόπος β’).
- ✓ **Πλήρης κάλυψη του θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου** σε κάθε χρονική στιγμή χωρίς σύνδεση με το εθνικό δίκτυο. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί επαρκή εφεδρεία ισχύος και επομένως περίπλοκο σύστημα συμπαραγωγής. Είναι η πιο ακριβή λύση, τουλάχιστον από πλευράς αρχικού κόστους.

Γενικά, χωρίς όμως να λείπουν οι εξαιρέσεις, ο πρώτος από τους τρόπους αυτούς προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή και οικονομική απόδοση για συστήματα στο βιομηχανικό και εμπορικό-κτιριακό τομέα. Για σταθμούς συμπαραγωγής του συστήματος ηλεκτρισμού της χώρας, η επιλογή του τρόπου λειτουργίας, εξαρτάται από τις ευρύτερες ανάγκες του δικτύου, τις διαθέσιμες μονάδες και τις υποχρεώσεις απέναντι στους καταναλωτές ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Είναι φανερό ότι ο τρόπος λειτουργίας εξαρτάται από και επηρεάζει τον σχεδιασμό του συστήματος. Κρίσιμη για την οικονομικότητά του είναι η διαστασιολόγηση των κύριων μηχανημάτων, πχ θα είναι το σύστημα ικανό να καλύπτει το φορτίο αιχμής, το φορτίο βάσης ή κάποιο άλλο φορτίο.

Η επιλογή του είδους του συστήματος, η διαστασιολόγησή του και ο τρόπος λειτουργίας του σε κάθε χρονική στιγμή είναι θέματα που πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσεκτική μελέτη και βελτιστοποίηση για την κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.

Δ. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η συμπαραγωγή μπορεί να έχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές επιπτώσεις στην εξάντληση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, στο περιβάλλον, στην κοινωνία. Οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις μπορούν να μετριασθούν ή και να εξαλειφθούν με σωστή επιλογή του είδους και της θέσης του συστήματος συμπαραγωγής, την προσεκτική ένταξή του στο ευρύτερο ενεργειακό σύστημα της περιοχής ή της χώρας και με την επιμελημένη συντήρηση κατά τη διάρκεια της ζωής του. Ακολουθεί αναλυτικότερη παρουσίαση των επιπτώσεων αυτών.

Επιπτώσεις στην Κατανάλωση Καυσίμων

Όλα τα συστήματα συμπαραγωγής εξοικονομούν καύσιμο διότι έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Όπως δείχνει το Σχήμα 13, ένα σύστημα συμπαραγωγής ατμοστροβίλου μειώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά 15% περίπου (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με μονάδα ατμοστροβίλου και θερμότητας με λέβητα), ένα σύστημα συμπαραγωγής με κινητήρα Diesel τη μειώνει κατά 25% (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με ντιζελοκίνητη ηλεκτρογεννήτρια και θερμότητας με λέβητα), κ.λπ. Όμως, το εάν ένα σύστημα συμπαραγωγής εξοικονομεί ακριβό, εισαγόμενο και μη ανανεώσιμο καύσιμο, π.χ. πετρέλαιο, εξαρτάται από το καύσιμο που το ίδιο το σύστημα συμπαραγωγής χρησιμοποιεί, και τα καύσιμα που χρησιμοποιούν τα συστήματα χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, τα οποία θα αντικατασταθούν από το σύστημα συμπαραγωγής.

Μια πρόσθετη βελτίωση του βαθμού εκμετάλλευσης των καυσίμων οφείλεται στο ότι τα συστήματα συμπαραγωγής βρίσκονται συνήθως πιο κοντά στους καταναλωτές απ' ό,τι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι, περιορίζονται οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι της τάξεως του 8-10%.

Η επιλογή των συστημάτων συμπαραγωγής και των καυσίμων, που αυτά χρησιμοποιούν, είναι σκόπιμο να εναρμονίζεται με μια γενικότερη εθνική ενεργειακή πολιτική (π.χ., μείωση του εισαγόμενου πετρελαίου, αύξηση της συμβολής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ορθολογική χρήση του φυσικού αερίου, κ.λπ.).

Επιπτώσεις στο Σύστημα Ηλεκτρισμού της Χώρας

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί η μελλοντική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, απαιτείται η κατασκευή νέων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η διάδοση της συμπαραγωγής αυξάνει το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής και περιορίζει τις ανάγκες κατασκευής νέων κεντρικών σταθμών, προσφέροντας έτσι σημαντική εξοικονόμηση κεφαλαίων της εταιρείας ηλεκτρισμού (ΔΕΗ).

Καθώς τα συστήματα συμπαραγωγής έχουν μικρότερο μέγεθος και βραχύτερο χρόνο εγκατάστασης από τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς, προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε απρόβλεπτες μελλοντικές μεταβολές της ζήτησης ηλεκτρισμού. Ο μικρός χρόνος εγκατάστασης των συστημάτων συμπαραγωγής συντελεί επίσης σε περιορισμό του χρηματοοικονομικού κόστους που συμβάλλει με τη σειρά του στη μείωση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Πολλές μικρές μονάδες συμπαραγωγής, που λειτουργούν παράλληλα με τους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, αυξάνουν την αξιοπιστία παροχής

ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά είναι ενδεχόμενο να δημιουργήσουν προβλήματα ευστάθειας του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά περιορίζονται ή και αποφεύγονται, όταν το σύστημα συμπαραγωγής και η σύνδεσή του με το δίκτυο πληρούν ορισμένες προδιαγραφές. Η συνεννόηση με τις αρμόδιες υπηρεσίες της ΔΕΗ είναι απαραίτητη για το σκοπό αυτόν.

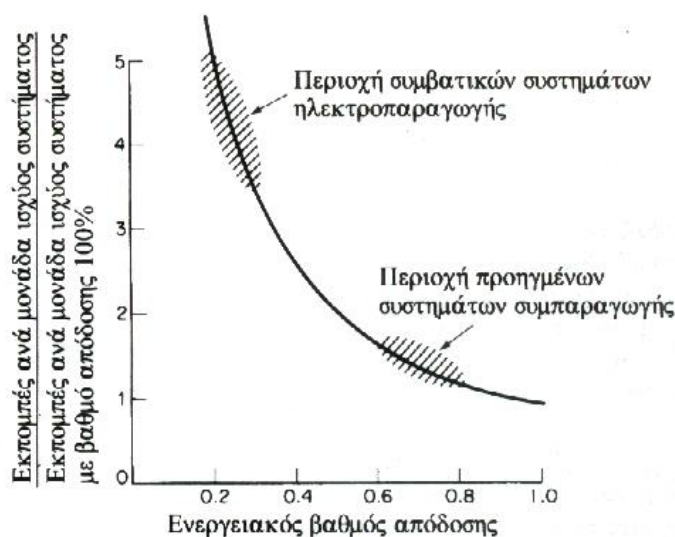
Η εξάπλωση της συμπαραγωγής θα μπορούσε να έχει αρνητικές οικονομικές επιπτώσεις στο εθνικό σύστημα ηλεκτρισμού, εάν αυτό έχει ικανότητα παραγωγής μεγαλύτερη από τη ζήτηση, ή εάν ο ρυθμός αύξησης της ικανότητας με κατασκευή νέων σταθμών είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό αύξησης της ζήτησης και για διάφορους λόγους δεν μπορεί να επιβραδυνθεί. Τότε, το κόστος κεφαλαίου μοιράζεται σε μικρότερη ποσότητα παραγόμενου ηλεκτρισμού, με αποτέλεσμα την αύξηση του μοναδιαίου κόστους. Ένα τέτοιο ενδεχόμενο δεν φαίνεται να υπάρχει για την Ελλάδα διότι αφ' ενός μεν μέρος των αναγκών καλύπτεται με εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αφ' ετέρου δε το αναπτυξιακό πρόγραμμα της ΔΕΗ είναι κυλιόμενο, δηλαδή αναθεωρείται σε τακτά χρονικά διαστήματα και επομένως μπορεί να προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες.

Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Χάρη στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση του καυσίμου, η συμπαραγωγή συντελεί σε άμεση μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, όπως πολύ παραστατικά δείχνει το Σχήμα 14, με την προϋπόθεση ότι το καύσιμο που χρησιμοποιεί δεν είναι κατώτερης ποιότητας από εκείνο της χωριστή συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου συνοδεύεται επίσης και από μια έμμεση μείωση ρύπων από τον υπόλοιπο κύκλο καυσίμου: εξόρυξη, επεξεργασία, μεταφορά, αποθήκευση. Η ποσοτικοποίηση του κόστους αυτού είναι δύσκολη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες: τεχνολογία, καύσιμο, τοπικές συνθήκες, κ.λπ.

Όταν πολλές μικρές και διεσπαρμένες μονάδες συμπαραγωγής αντικαθιστούν μεγάλους κεντρικούς σταθμούς με υψηλές καπνοδόχους, τότε δεν είναι εξασφαλισμένη η βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Οι κεντρικοί σταθμοί βρίσκονται κατά κανόνα έξω από τα αστικά κέντρα και οι υψηλές καπνοδόχοι συντελούν σε ικανοποιητικό διασκορπισμό των ρύπων. Αντίθετα, οι μικρές μονάδες συμπαραγωγής, που έχουν και σχετικά χαμηλότερες καπνοδόχους, είναι εγκατεστημένες κοντά ή και μέσα στις κατοικημένες περιοχές επιβαρύνοντας το περιβάλλον τους.

Από τις διαθέσιμες τεχνολογίες συμπαραγωγής, οι κινητήρες Diesel και Otto έχουν τις υψηλότερες εκπομπές ρύπων. Καθώς οι κινητήρες αυτοί είναι οι πιο κατάλληλοι, λόγω μεγέθους, για εφαρμογές συμπαραγωγής στον εμπορικό – κτιριακό τομέα, ο κίνδυνος από τις εκπομπές τους είναι αυξημένος διότι στις κατοικημένες περιοχές οι κάτοικοι είναι άμεσα εκτεθειμένοι στους ρύπους του αέρα, και η διασπορά των ρύπων εμποδίζεται από τα μεγάλα κτίρια. Οι κυψέλες καυσίμου είναι καταλληλότερες από τους κινητήρες Diesel ή Otto για τέτοιου είδους εφαρμογές, διότι έχουν σημαντικά μικρότερες εκπομπές ρύπων.



Σχήμα 14: Εκπομπή χημικών ρύπων ως συνάρτηση του βαθμού απόδοσης συστημάτων

Η διακίνηση των καυσίμων και η απομάκρυνση των στερεών καταλοίπων της καύσης μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του εδάφους και των υδάτων της περιοχής. Τέλος, ο θόρυβος τόσο από τη λειτουργία του ίδιου του συστήματος συμπαραγωγής όσο και από την κίνηση, που αναπτύσσεται για την εξυπηρέτησή του, αυξάνει την ηχητική ρύπανση. Ωστε, η εγκατάσταση συστήματος συμπαραγωγής σε κατοικημένες περιοχές προϋποθέτει την

- ✓ Επιλογή τεχνολογίας με χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- ✓ Προσεκτική επιλογή του τόπου εγκατάστασης,
- ✓ Τοποθέτηση εξοπλισμού ελέγχου και περιορισμού των εκπεμπομένων ρύπων,
- ✓ Ελαστική έδραση και ηχητική μόνωση του συστήματος,
- ✓ Κατασκευή καπνοδόχου υψηλότερης των γειτονικών κτιρίων,
- ✓ Εγκατάσταση μέσω συλλογής και αποκομιδής των στερεών και υγρών καταλοίπων.

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση ενός συστήματος συμπαραγωγής στην ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος, πρέπει να υπολογισθούν οι εκπομπές ρύπων του συστήματος συμπαραγωγής και οι εκπομπές των συμβατικών συστημάτων χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας παίρνοντας υπόψη το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιεί το καθένα από τα συστήματα αυτά.

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εξαρτώνται από το είδος και την ποσότητα του καυσίμου. Υπολογίζονται για οποιοδήποτε σύστημα (όχι μόνον σύστημα συμπαραγωγής) με τη σχέση

$$m_{CO_2} = \mu_{CO_2} m_f \quad (14)$$

όπου

$$\mu_{CO_2} = (44/12) c \quad (15)$$

$$m_f = E / \eta H_u \quad (16)$$

m_{CO_2} μάζα του εκπεμπομένου διοξειδίου του άνθρακα,

- μ_{CO_2} μάζα εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα μάζας καυσίμου (π.χ. kg CO₂/kg καυσίμου),
 c περιεκτικότητα κατά μάζα του καυσίμου σε άνθρακα,
 m_f κατανάλωση καυσίμου,
 E ενέργεια- προϊόν του συστήματος,
 η βαθμός απόδοσης του συστήματος,
 H_u κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου.

Η Εξίσωση (15) στηρίζεται στην παραδοχή ότι όλος ο άνθρακας, που περιέχεται στο καύσιμο, μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα, κάτι που βρίσκεται πολύ κοντά στην πραγματικότητα, όταν η καύση γίνεται με περίσσεια αέρα και τα συστήματα καύσης είναι σε καλή κατάσταση και σωστά ρυθμισμένα.

Τιμές των c, μ_{CO_2} , και H_u για ορισμένα καύσιμα δίνονται στον Πίνακα 3 οι τιμές αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των εκπομπών CO₂ των συστημάτων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 4-6.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά ορισμένων καυσίμων για υπολογισμό των εκπομπών CO₂

Καύσιμο	Περιεκτικότητα σε άνθρακα (c·100)	Εκπομπές CO ₂ μ_{CO_2}	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (H _u)
	%	kg CO ₂ /kg καυσίμου	kJ/kg
Φυσικό αέριο	75	2,75	49000
Diesel	83	3,05	42500
Μαζούτ 0,7% S	86,5	3,17	41500
Μαζούτ 2%S	85	3,12	41000
Τύρφη*	58	2,13	7800
Λιγνίτης*	64	2,35	24000
	80	2,93	30000

* Οι τιμές αφορούν καύσιμο ελεύθερο υγρασίας και τέφρας.

Πίνακας 4: Εκπομπές ρύπων συστημάτων συμπαραγωγής

Σύστημα	Καύσιμο	Βαθμός απόδοσης (%)			Εκπομπές (gr/100 kWh)					
		Ηλεκτ.	Θερμ.	Ολικός	CO ₂	NO _x	CO	HC	SO _x	Σωματίδια
Diesel	Diesel 0,2% S Διπλό ⁽¹⁾	35	35	70	73815	1556 ⁽²⁾	408	46	91	32
					59335	1130 ⁽³⁾	381	395	9	4
Αεριοστροβίλου	Αέριο Diesel 0,2% S	25	45	70	80816	214	13	10	≈ 0	7
					103341	435	5	10	91	18
Αεριοστροβίλου χαμηλού NO _x	Αέριο	35	45	80	57726	50	30	5	≈ 0	5
Ατμοστροβίλου νέο	Άνθρακας	25	55	80	140640	453	26	7	775	65
	Μαζούτ				110000	194	≈ 0	7	518	65
	Αέριο				80816	129	≈ 0	26	46	7

(1) 90% της ενεργείας από φυσικό αέριο και 10% από καύσιμο Diesel.
 (2) Νεώτεροι κινητήρες εκπέμπουν 1100-1200 gr NO_x / 100 kWh.
 (3) Νεώτεροι κινητήρες εκπέμπουν 700-800 gr NO_x / 100 kWh.

Πίνακας 5: Εκπομπές ρύπων κεντρικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

Σύστημα	Καύσιμο	Βαθμός Απόδοσης (%)	Εκπομπές (gr/100 kWh)					
			CO ₂	NO _x	CO	HC	SO _x	Σωματίδια
Ατμοστροβίλου παλαιό	Άνθρακας 3% S	34	103412	313	18	5	1987	141
Ατμοστροβίλου νέο	Άνθρακας	31*	113420	250	18	5	600	14
Ατμοστροβίλου παλαιό	Μαζούτ 1% S	31	88706	318	18	5	476	23
Ατμοστροβίλου νέο	Μαζούτ χαμηλού θείου	31	88706	136	18	5	363	14
Ατμοστροβίλου παλαιό	Φυσικό αέριο	31	65174	304	9	18	= 0	5
Αεριοστροβίλου	Diesel	34	75986	240	55	18	14	18
Αεριοστροβίλου	Αέριο	34	59424	195	55	= 0	= 0	5
Αεριοστροβίλου χαμηλού NO _x	Αέριο	38	53168	50	30	= 0	= 0	4

* Ο μικρότερος βαθμός απόδοσης των νέων συστημάτων ατμοστροβίλου οφείλεται στις συσκευές εξουδετέρωσης εκπομπών NO_x και SO₂.

Πίνακας 6: Εκπομπές ρύπων λεβήτων νερού και ατμού

Σύστημα	Καύσιμο	Εκπομπές (gr/100 kWh ωφέλιμης θερμότητας)					
		CO ₂	NO _x	CO	HC	SO _x	Σωματίδια
Λέβητας νερού	Αέριο	25255	19	3	2	= 0	2
	Diesel 0,2% S	32294	25	6	2	37	3
Ατμολέβητας	Άνθρακας	43950	136	8	2	232	20
	Μαζούτ	34373	57	6	2	155	20
	Αέριο	25255	39	3	= 0	= 0	2
Βιομηχανικός ατμολέβητας	Άνθρακας 2% S	43950	112	16	8	565	98
	Μαζούτ 1% S	34373	78	6	2	203	30
	Αέριο	25255	33	3	= 0	= 0	3

Ο βαθμός απόδοσης θεωρείται 80%

Εάν δεν υπάρχουν πληροφορίες από τους κατασκευαστές των συγκεκριμένων συστημάτων ή από σχετικές μετρήσεις, πρώτες εκτιμήσεις των εκπεμπομένων ρύπων μπορούν να γίνουν με τα στοιχεία που δίνουν οι Πίνακες 4-6. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές. Διαφορές στα μηχανήματα, το καύσιμο, την αντιρρυπαντική τεχνολογία κ.α. μπορούν να διαφοροποιούν σημαντικά τις εκπομπές ρύπων από τη μια εγκατάσταση στην άλλη.

Η επίδραση της συμπαραγωγής από πλευράς ρύπων εκφράζεται με τη διαφορά εκπομπών, που ορίζεται με τη σχέση

$$\Delta M_X = M_{XSS} - M_{XH} - M_{X\theta} \quad (17)$$

Όπου

ΔM_X η διαφορά εκπομπών του ρύπου X,

- $M_{X\Sigma\Sigma}$ η εκπομπή ρύπου X του συστήματος συμπαραγωγής,
 M_{XH} η εκπομπή ρύπου X του συστήματος παραγωγής ηλεκτρισμού, το οποίο αντικαθίσταται από το σύστημα συμπαραγωγής,
 $M_{X\Theta}$ η εκπομπή ρύπου X του συστήματος παραγωγής θερμότητας, το οποίο αντικαθίσταται από το σύστημα συμπαραγωγής (π.χ. ατμολέβητας).

Εάν ο προσδιορισμός των εκπομπών πρόκειται να στηριχθεί στα δεδομένα των Πινάκων 4-6, τότε ισχύουν οι σχέσεις:

$$M_{X\Sigma\Sigma} = m_{X\Sigma\Sigma} (E_H / 100 \text{ kWh}) \quad (18)$$

$$M_{XH} = m_{XH} (E_H / 100 \text{ kWh}) \quad (19)$$

$$M_{X\Theta} = m_{X\Theta} (E_\Theta / 100 \text{ kWh}) = (m_{X\Theta} / \text{PHR}) * (E_H / 100 \text{ kWh}) \quad (20)$$

όπου

$m_{X\Sigma\Sigma}$, m_{XH} , και $m_{X\Theta}$ (σε gr) οι εκπομπές του ρύπου X για παραγωγή ενέργειας 100 kWh, όπως δίνονται από τους Πίνακες 4, 5 και 6.

E_H η ηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από το σύστημα συμπαραγωγής,

E_Θ η θερμότητα που παράγεται από το σύστημα συμπαραγωγής

PHR μέση τιμή του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα: $\text{PHR} = E_H / E_\Theta$.

Μερικά παραδείγματα σύγκρισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Εντυπωσιακή είναι η μείωση εκπομπών CO₂: 50–100kg ανά 100 kWh ηλεκτρικής διαστήματος αυτού, δηλαδή 50 kg ανά 100 kWh, τότε σε κάθε TWh* ηλεκτρικής ενέργειας, που παράγεται με συμπαραγωγή, αντιστοιχεί μείωση 500000 τόνων CO₂. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση καυσίμου δικαιολογεί τη θέσπιση κινήτρων για τη διάδοση της συμπαραγωγής .

* 1 TWh= 10⁹ kWh

Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συστήματα συμπαραγωγής στην Ελλάδα είναι 0,9-1 TWh, ενώ στις 12 χώρες της Ευρωπαϊκής ένωσης ξεπερνά τις 100 TWh. Εκτιμάται ότι υπάρχει δυνατότητα διπλασιασμού των τιμών αυτών, η οποία θα συντελούσε σε επιπλέον μείωση των εκπομπών CO₂ στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά 50 εκατ. Τόνους ανά έτος.

Πίνακας 7: Παραδείγματα σύγκρισης εκπομπών μεταξύ συστημάτων συμπαραγωγής και συμβατικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας
(Οι τιμές αναφέρονται σε παραγωγή 100 kWh ηλεκτρικής ενέργειας)

Ρύπος	Συνδυασμοί συστήματος συμπαραγωγής - συστημάτων χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας											
	1 - A		1 - B		2 - A		2 - B		3 - A		3 - B	
	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%
CO ₂	- 51024	- 46,2	- 88458	- 59,9	- 62454	- 52,0	- 99888	- 63,4	- 70791	- 46,7	- 108225	- 57,2
NO _x	+ 812	+255,3	+ 802	+244,5	- 290	- 85,3	- 300	- 85,7	- 283	- 68,7	- 293	- 69,4
CO	+ 320	+524,6	+ 357	+1487	- 33	- 52,4	+ 4	+ 15,4	- 68	- 100,0	- 31	- 100,0
HC	+ 375	+ 1875	+ 388	+5543	- 15	- 75,0	- 2	- 28,6	+ 4	+ 18,2	+ 17	+188,9
SO _x	- 208	- 95,9	- 794	- 98,9	- 273	- 99,3	- 859	- 99,8	- 415	- 90,0	- 1001	- 95,6
Σωματίδια	- 44	- 91,7	- 40	- 90,9	- 51	- 91,1	- 47	- 90,4	- 77	- 91,7	- 73	- 91,3

Συστήματα συμπαραγωγής
 1. Κινητήρας Diesel διπλού καυσίμου (90% της ενέργειας από φυσικό αέριο, 10% από καύσιμο Diesel) με $\eta_e = \eta_h = 0,35$ (PHR = 1).
 2. Νέος αεριοστρόβιλος φυσικού αερίου με $\eta_e = 0,35$, $\eta_h = 0,45$, (PHR = 0,778).
 3. Νέος ατμοστρόβιλος φυσικού αερίου με $\eta_e = 0,25$, $\eta_h = 0,55$, (PHR = 0,455).

Συστήματα χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας
 Α. Αεριοστρόβιλος με καύσιμο Diesel και βιομηχανικός ατμολέβητας με καύσιμο μαζούτ.
 Β. Νέος ατμοστρόβιλος με καύσιμο άνθρακα και βιομηχανικός ατμολέβητας με καύσιμο μαζούτ.

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει μείωση εκπομπών με τη συμπαραγωγή.
 Τα ποσοστά προσδιορίστηκαν με βάση αναγωγή τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Όταν καύσιμο σε συστήματα συμπαραγωγής είναι το φυσικό αέριο, οι εκπομπές οξειδίων του θείου και στερεών σωματιδίων, που παρουσιάζονται από την καύση άνθρακα ή υγρών καυσίμων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, σχεδόν εξαφανίζονται. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η μεγάλη η μείωση εκπομπών NO_x που επιτυγχάνεται με στοιχεία καυσίμου, όπως δείχνει ο Πίνακας 8.

Πίνακας 8: Σύγκριση συστημάτων συμπαραγωγής κυψελών καυσίμου και παλινδρομικής μηχανής εσωτερικής καύσης [Donitz,1987]

Σύστημα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	Κατανάλωση φυσικού αερίου	Εκπομπές NO _x
	%	m ³	ton
Παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης	35	1 720 000	44
Κυψέλη καυσίμου	62	972 000	2,7

Ηλεκτρική ισχύς του κάθε συστήματος: 1 MW.
 Διάρκεια λειτουργίας: 6000 ώρες.

Οικονομικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις

Οι οικονομικές επιπτώσεις της συμπαραγωγής στο σύστημα ηλεκτρισμού και θερμότητας της χώρας έχουν αναφερθεί προηγουμένα. Μια πρόσθετη ευνοϊκή επίδραση στην εθνική οικονομία προκύπτει όταν η συμπαραγωγή μειώνει το σύνολο των δαπανών για εισαγόμενα καύσιμα. Στις σχετικές οικονομικές αναλύσεις, πρέπει στο κόστος εισαγωγής να προστίθεται το κόστος επεξεργασίας και διακίνησης του καυσίμου καθώς και το κόστος προστασίας του περιβάλλοντος και αποκατάστασης

των ζημιών, που μπορεί να προκληθούν όχι μόνο από τη συστηματική εκπομπή ρύπων αλλά και από πιθανά ατυχήματα (διαρροές κ.λπ.).

Είναι γνωστό ότι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάζονται σε μεγάλα μεγέθη και εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες περιοχές. Η κατασκευή και λειτουργία των σταθμών προκαλεί τη μετακίνηση προς τις περιοχές αυτές μεγάλου αριθμού εργαζομένων. Αντίθετα, οι μονάδες συμπαραγωγής συνήθως είναι μικρότερου μεγέθους και εγκαθίστανται πιο κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Η διασπορά τους σε διάφορες πόλεις της χώρας δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας στην κάθε περιοχή, συγκρατεί εκεί το εργατικό δυναμικό και συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη του τόπου με την ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων, που σχετίζονται με την κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία των μονάδων.

Η συμπαραγωγή αυξάνει την αξιοπιστία ηλεκτροδότησης των καταναλωτών. Επίσης, προκαλεί συγκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με επακόλουθο την αποκέντρωση της λήψεως σχετικών αποφάσεων και την ενδυνάμωση του ρόλου της τοπικής αυτοδιοίκησης.

Ε. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Υπάρχουν τέσσερεις κύριοι τομείς της συμπαραγωγής :

- Σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας (ΔΕΗ),
- Βιομηχανικός τομέας,
- Εμπορικός –κτιριακός τομέας,
- Αγροτικός τομέας.

Παρουσιάζονται στη συνέχεια αναλυτικότερα στοιχεία για τον καθένα από αυτούς τους τομείς.

Σύστημα Ηλεκτρισμού της Χώρας

Σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να μετατραπούν σε συμπαραγωγικούς σταθμούς και να καλύψουν τις θερμικές ανάγκες πόλεων ή οικισμών, βιομηχανιών, μονάδων ασφάλτωσης νερού, θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιεργειών, κ.λπ. που βρίσκονται στην περιοχή τους. Η απόσταση των καταναλωτών θερμότητας από τον σταθμό και η διασπορά τους είναι κρίσιμης σημασίας για την σκοπιμότητα της όλης εγκατάστασης. Ειδικότερα για τη θέρμανση πόλεων ή οικισμών, γνωστή με τον όρο τηλεθέρμανση (στα αγγλικά district heating), επιπλέον της απόστασης και διασποράς έχουν σημασία ο ετήσιος αριθμός βαθμομερών και η απαιτούμενη θερμική ισχύς. Στις περισσότερες περιπτώσεις η οικονομική απόσταση μεταφοράς δεν ξεπερνά τα 10km, ενώ πολύ σπάνια μπορεί να φθάσει μέχρι τα 30 km. Στην Ελλάδα, έχουν κατασκευαστεί συστήματα τηλεθέρμανσης στην Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Μεγαλόπολη και Αμύνταιο. Η ονομαστική ισχύς των συστημάτων τηλεθέρμανσης των πόλεων αυτών δίνεται στον Πίνακα 9. Εκτιμάται ότι και σε άλλες περιοχές οι συνθήκες για τηλεθέρμανση είναι ευνοϊκές, αλλά οι σχετικές μελέτες δεν έχουν ολοκληρωθεί ακόμη.

Εκτός των σταθμών που τροφοδοτούν τα δίκτυα της Πτολεμαΐδας και της Κοζάνης, κανείς άλλος σταθμός της ΔΕΗ δεν είναι συμπαραγωγικός.

Πίνακας 9: Θερμική ισχύς συστημάτων τηλεθέρμανσης ελληνικών πόλεων

Πόλη	Ισχύς	
	Gcal/h	MW _{th}
Κοζάνη	70,0	81,4
Πτολεμαΐδα	60,0	69,8
Αμύνταιο	20,0	23,3
Αμύνταιο	30,0	34,9
Μεγαλόπολη	17,2	20,0

Βιομηχανικός Τομέας

Στον βιομηχανικό τομέα, πολλές διεργασίες απαιτούν θερμότητα παράλληλα με τις ανάγκες για ηλεκτρισμό. Η θερμοκρασία, που απαιτείται, οδηγεί στην ακόλουθη κατάταξη.

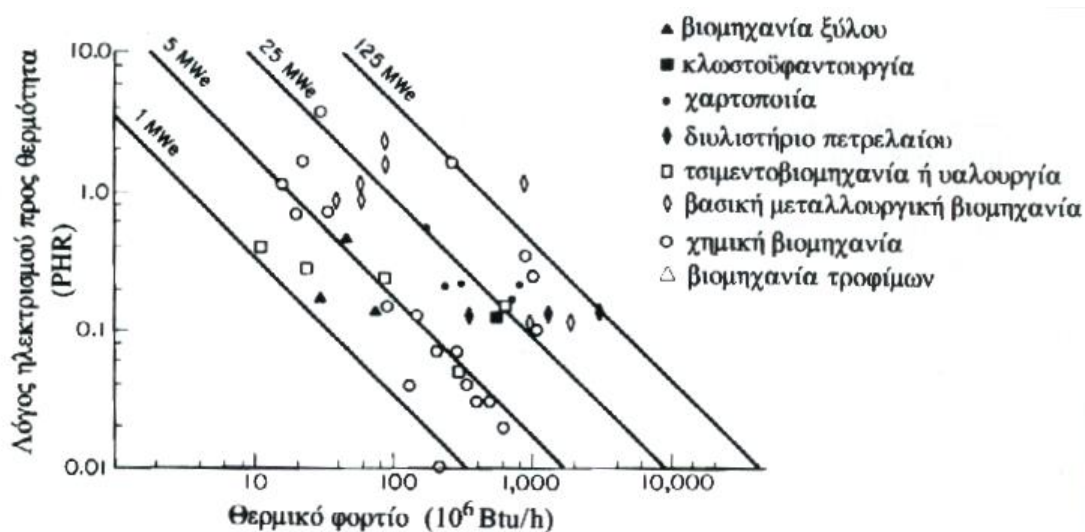
1. Διεργασίες **χαμηλών** θερμοκρασιών (μικρότερων των 100°C), π.χ. ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση ή ψύξη χώρων, θερμό νερό χρήσης.
2. Διεργασίες **μέτριων** θερμοκρασιών (100-300°C), π.χ. διεργασίες στη χαρτοποιία, στην κλωστοϋφαντουργία, στα εργοστάσια ζάχαρης, σε μερικές χημικές βιομηχανίες, κ.λπ. Συνήθως οι διεργασίες αυτές απαιτούν θερμότητα με μορφή ατμού.

3. Διεργασίες **υψηλών** θερμοκρασιών (300-700°C), π.χ. σε μερικές χημικές βιομηχανίες.
4. Διεργασίες **πολύ υψηλών** θερμοκρασιών (πάνω από 700°C), π.χ. σε εργοστάσια τσιμέντου, μεταλλουργικές βιομηχανίες, υαλουργεία, κ.λπ.

Σημαντικό δυναμικό συμπαραγωγής παρουσιάζουν οι ακόλουθοι βιομηχανικοί κλάδοι:

- βιομηχανίες τροφίμων και ποτών,
- κλωστοϋφαντουργίες,
- βιομηχανίες χάρτου,
- χημικές βιομηχανίες,
- εργοστάσια τσιμέντου,
- βασικές μεταλλουργικές βιομηχανίες (χαλυβουργεία, εργοστάσια παραγωγής αλουμινίου, κ.λπ.).

Μικρότερο δυναμικό, αλλά ίσως όχι αμελητέο, έχουν οι υαλουργίες, βιομηχανίες κεραμικών υλικών, ξυλοβιομηχανίες, κ.λπ. Το Σχήμα 15 δίνει παραδείγματα τιμών του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα, του θερμικού και του ηλεκτρικού φορτίου για διάφορες βιομηχανίες στις Η.Π.Α. (αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία για την Ελλάδα λείπουν ακόμη).



Σχήμα 15: Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα, ηλεκτρικό και θερμικό φορτίο για διάφορες βιομηχανίες στις Η.Π.Α.

Οι περισσότερες βιομηχανίες με σημαντικό δυναμικό συμπαραγωγής έχουν ορισμένες παραγωγικές διεργασίες, που παράγουν ή αποβάλλουν θερμότητα σε ικανοποιητική ποσότητα και ποιότητα (θερμοκρασιακή στάθμη). Είναι σκόπιμη η ανάκτηση της θερμότητας αυτής, η οποία έτσι προστίθεται σ' εκείνη που παράγεται άμεσα από το σύστημα συμπαραγωγής. Ορισμένες χημικές διεργασίες παράγουν καύσιμα αέρια, που μπορούν να αποτελέσουν καύσιμο είτε για τους λέβητες είτε για το ίδιο το σύστημα συμπαραγωγής.

Ο Πίνακας 10 αναφέρει τις μονάδες συμπαραγωγής που είναι εγκατεστημένες σε ελληνικές βιομηχανίες. Το σύνολο της ετήσιας ηλεκτροπαραγωγής των μονάδων,

που λειτουργούν είναι της τάξης των 900000 MWh και αποτελεί περίπου το 2,5% της όλης ηλεκτροπαραγωγής της χώρας.

Επιπλέον του θεσμικού πλαισίου, η εγκατάσταση συστήματος συμπαραγωγής σε βιομηχανία είναι συμφέρουσα όταν:

- ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα βρίσκεται σε ορισμένα όρια,
- οι καμπύλες θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου δεν παρουσιάζουν μεγάλη χρονική απόκλιση (διαφορά φάσης) μεταξύ τους .
- το σύστημα συμπαραγωγής πρόκειται να λειτουργεί επί αρκετές ώρες το έτος αν και γενικοί κανόνες δεν είναι εύκολο να διατυπωθούν, διάρκεια λειτουργίας μικρότερη των 400 h/έτος έχει ως συνέπεια σχετικά μεγάλο (για τις απαιτήσεις του ιδιωτικού τομέα) χρόνο αποπληρωμής.

Οι παράγοντες αυτοί είναι πιο εύκολο να ικανοποιηθούν σε οργανωμένες ζώνες βιομηχανικής ανάπτυξης, όπως πχ στις Βιομηχανικές Περιοχές (ΒΠΕ). Τέτοιες περιοχές υπάρχουν στη Θεσσαλονίκη, στο Βόλο, στην Πάτρα και αλλού.

Εμπορικός – Κτιριακός Τομέας

Στον τομέα αυτό ανήκουν τα ξενοδοχεία, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα, σχολεία, κτίρια γραφείων, κατοικίες, κλπ. Η συμπαραγωγή καλύπτει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό και θερμότητα των κτιρίων (θέρμανση ή ψύξη χώρων, θερμό νερό χρήσης, κλίβανοι, κλπ).

Ο εμπορικός – κτιριακός τομέας μπορεί να διακριθεί σε τρεις κύριους υποτομείς:

- (α) νοσοκομεία και ξενοδοχεία,
- (β) πολυκατοικίες,
- (γ) κτίρια γραφείων.

Ο καθένας από αυτούς χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη μορφή της καμπύλης φορτίου. Άλλου είδους κτίρια (πχ πανεπιστήμια, καταστήματα, κλπ), έχουν καμπύλες φορτίου, που προκύπτουν με συνδυασμό των τριών κύριων υποτομέων. Η συμπαραγωγή εξυπηρετεί εδώ τις ανάγκες όχι μόνο για θέρμανση και ηλεκτρισμό, αλλά και ψύξη. Οι καμπύλες φορτίου πρέπει να ληφθούν υπόψη, τόσο κατά τη μελέτη σκοπιμότητας, όσο και κατά τον τελικό σχεδιασμό του συστήματος συμπαραγωγής.

Σε τοπικό επίπεδο, κατάλληλες για εξυπηρέτηση των κτιρίων (κατοικιών, σχολείων, νοσοκομείων, ξενοδοχείων, εμπορικών κέντρων, κλπ), είναι οι μονάδες συμπαραγωγής σε μορφή πακέτου.

Γενικότερα, για μικρές εγκαταστάσεις, μια φθηνή λύση με εύκολη συντήρηση προσφέρουν οι μηχανές αυτοκινήτων, αφού υποστούν μικρές μετατροπές, που έχουν σχέση κυρίως με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο (πχ φυσικό αέριο αντί βενζίνης) και το σύστημα ρύθμισης και ελέγχου. Μειονέκτημα αυτών είναι η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής τους (20000 – 30000 ώρες). Μεγαλύτερες μηχανές βιομηχανικού τύπου, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αλλά και μεγαλύτερο αρχικό κόστος.

Από πλευράς γεννήτριας, ο πιο συνηθισμένος τύπος στα μικρά μεγέθη είναι η ασύγχρονη γεννήτρια, που διεγείρεται από το δίκτυο, το οποίο καθορίζει την τάση και τη συχνότητά της. Όμως, αυτός ο τύπος μπορεί να λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο, αλλά παύει να παράγει ισχύ μόλις η τάση του δικτύου μηδενισθεί. Σύγχρονες γεννήτριες και αυτοδιεγειρόμενες ασύγχρονες, μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από την κατάσταση του δικτύου.

Ο ετεροχρονισμός μεταξύ ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου στις κατοικίες, καθώς και η μεταβολή της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια του 24-ώρου, κάνουν συχνά αναγκαία την ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης θερμότητας, προκειμένου να επιτευχθεί οικονομική εκμετάλλευση του συστήματος συμπαραγωγής.

Στην Ελλάδα, είναι γνωστές δυο μονάδες συμπαραγωγής του τομέα αυτού. Η μία είναι εγκατεστημένη στο Ηλιακό Χωριό (Λυκόβρυση Αττικής) και η άλλη στο Αμερικανικό Κολλέγιο (Αγ. Παρασκευή Αττικής). Οι μονάδες αυτές εγκαταστάθηκαν και λειτουργούν με ειδική άδεια ως πειραματικές – επιδεικτικές.

Αγροτικός Τομέας

Η συμπαραγωγή δεν είναι πολύ διαδεδομένη στον αγροτικό τομέα, η εφαρμογή της όμως μπορεί να εξοικονομήσει καύσιμα και να έχει θετικές οικονομικές επιπτώσεις σε αγροτικές κοινότητες. Υπολείμματα αγροτικών διεργασιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο. Αιθανόλη παράγεται από ανανεώσιμη βιομάζα (πχ κόκκους, σακχαροκάλαμο, κλπ) και είναι καύσιμο κατάλληλο για κινητήρες Otto. Η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση σπιτιών, θερμοκηπίων, κλπ.

Στην Ελλάδα, μόνο ένα σύστημα συμπαραγωγής μπορεί να θεωρηθεί ότι σχετίζεται με τον αγροτικό τομέα. Πρόκειται για μονάδα αμμοστροβίλου, που είναι εγκατεστημένη στα Εκκοκιστήρια Βάμβακος Δαύλειας, Α.Ε.Β.Ε. Απορρίματα (4000-5000 τόνοι ανά έτος) από τον εκκοκισμό του βαμβακιού, με κατώτερη θερμογόνο ικανότητα περίπου 3600 Kcal/kg, καίγονται σε ειδικό λέβητα ισχύος 4×10^6 kcal/h. Ο παραγόμενος ατμός καλύπτει τις θερμικές ανάγκες του συγκροτήματος (εκκοκιστηρίου και σπορελαιουργείου) και κινεί αμμοστροβιλογεννήτρια ηλεκτρικής ισχύος 500 kW. Χάρη στη μονάδα συμπαραγωγής, εξοικονομούνται 300.000 lt πετρελαίου Diesel, 450.000 lt μαζούτ και $1,35 \times 10^6$ kWh ηλεκτρισμού (αποφυγή αγοράς από τη ΔΕΗ) σε κάθε εκκοκιστική περίοδο. Η περίοδος αποπληρωμής του συστήματος εκτιμάται σε πέντε εκκοκιστικές περιόδους.

Πριν από την εγκατάσταση του συστήματος συμπαραγωγής, τα απορρίματα του εκκοκισμού οδηγούνταν σε πύργο αποτέφρωσης. Η ατελής καύση στον πύργο, όχι μόνο προκαλούσε υπερβολική ρύπανση του περιβάλλοντος, αλλά και δημιουργούσε κινδύνους πυρκαϊάς. Έτσι, το σύστημα συμπαραγωγής έχει διπλά ευνοϊκή επίδραση στο περιβάλλον. Αποφυγή της ρύπανσης από την καύση υγρού καυσίμου στους λέβητες και αντικατάσταση του πύργου αποτέφρωσης με ειδικό λέβητα, όπου οι συνθήκες καύσης των απορριμμάτων είναι πολύ καλύτερες.

Τα απορρίματα εκκοκισμού αποτελούν το 8-10 % του βάρους του εκκοκιζόμενου βαμβακιού. Είναι λοιπόν διαθέσιμη σε ολόκληρη τη χώρα μια ποσότητα 60000-70000 τόνων ετησίως, που ισοδυναμεί, από πλευράς ενεργειακής, με 20000-30000 τόνους πετρελαίου. Η ποσότητα αυτή είναι αρκετή, για να καλύψει πλήρως τις θερμικές ανάγκες των εκκοκιστηρίων και μέρος των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

Μελέτες που έχουν γίνει από το ΚΑΠΕ, έχουν δείξει ότι πολλές εφαρμογές στον ελληνικό αγροτικό τομέα είναι τεχνικά δυνατές και οικονομικά βιώσιμες και το καύσιμο που θα χρησιμοποιείται, θα είναι συνήθως βιομάζα.