



Γ.Δ. Ενέργειας  
και Μεταφορών

Ευρωπαϊκή Επιτροπή



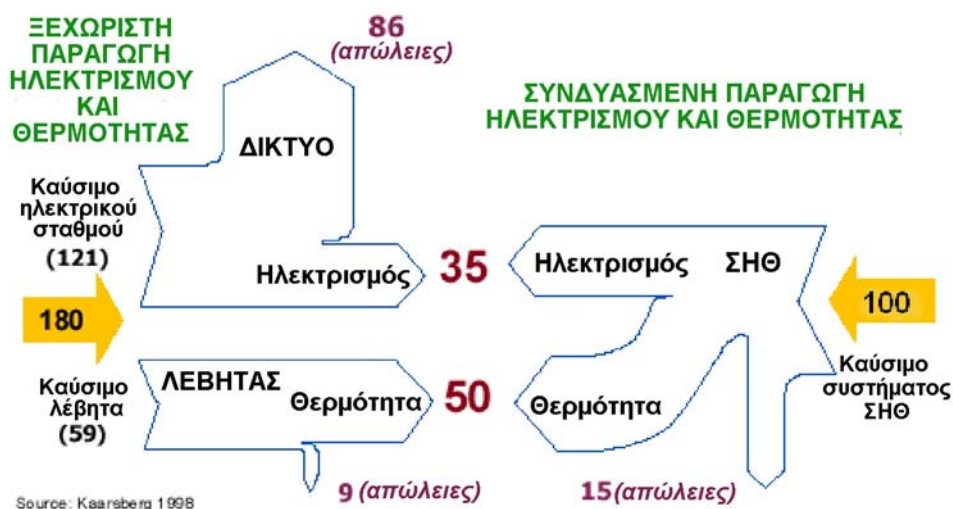
# ΟΔΗΓΟΣ

## Συστημάτων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας

## 1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

### 1.1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τα συστήματα Συνδυασμένης παραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ - γνωστή και ως Συμπαργωγή) παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική (ή/και μηχανική) και θερμική ενέργεια σε ένα ενιαίο, ολοκληρωμένο σύστημα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την κοινή πρακτική, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε ένα κεντρικό σταθμό, ενώ χρησιμοποιείται επιτόπιος εξοπλισμός θέρμανσης και ψύξης για την κάλυψη των αναγκών σε μη ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια που ανακτάται σε ένα σύστημα ΣΗΘ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση ή ψύξη στη βιομηχανία ή τα κτίρια. Επειδή η ΣΗΘ εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που σε άλλη περίπτωση θα χανόταν κατά τη συμβατική διακριτή παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας, η συνολική απόδοση αυτών των ολοκληρωμένων συστημάτων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των μεμονωμένων συστημάτων (βλ. σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1. Συμβατικό ενεργειακό σύστημα σε σύγκριση με σύστημα συμπαργωγής

Η ΣΗΘ δεν αποτελεί μια συγκεκριμένη τεχνολογία αλλά περισσότερο μια εφαρμογή τεχνολογιών για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης ή/και ψύξης, καθώς και για μηχανική ή/και ηλεκτρική ενέργεια των τελικών καταναλωτών. Λόγω των πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων, έχουν αναπτυχθεί νέες διατάξεις των συστημάτων ΣΗΘ που τα καθιστούν οικονομικά συμφέροντα σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. Οι νέες γενιές των στροβίλων, κυψελών καυσίμου και παλινδρομικών μηχανών συνιστούν το αποτέλεσμα εντατικής και συνδυασμένης έρευνας, ανάπτυξης και επίδειξης, τόσο από ινστιτούτα όσο και από τη βιομηχανία. Τα προηγμένα υλικά και οι τεχνικές σχεδίασης μέσω Η/Υ έχουν αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του εξοπλισμού, μειώνοντας ταυτόχρονα τα κόστη και τις εκπομπές ρύπων.

Η συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τη φύση της μη αποδοτική, αφού μετατρέπεται μόνο το ένα τρίτο της ενέργειας των καυσίμων σε ωφέλιμη ενέργεια. Η σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας με τη ΣΗΘ οδηγεί σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμων και σε μειωμένες εκπομπές ρύπων σε σχέση με τη χωριστή

παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η ΣΗΘ αποτελεί μια οικονομικά παραγωγική προσέγγιση για τη μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων μέσω της πρόληψης της ρύπανσης, ενώ ο παραδοσιακός έλεγχος της ρύπανσης που επιτυγχάνεται απλά μέσω της επεξεργασίας των καυσαερίων δεν παρέχει κανένα οικονομικό όφελος και, στην πραγματικότητα, μειώνει την απόδοση και την ωφέλιμη παραγωγή ενέργειας.

Η συνολική απόδοση του συστήματος προκύπτει από μια αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητας. Δεδομένου ότι από ένα σύστημα ΣΗΘ προκύπτουν δύο ή περισσότερα χρησιμοποιήσιμα ενεργειακά προϊόντα, ο καθορισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης των συστημάτων αυτών είναι πιο σύνθετος απ' ό,τι στα απλά συστήματα. Το όλο σύστημα μπορεί να αντιμετωπισθεί ως δύο υποσυστήματα, το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος (συνήθως μια μηχανή ή ένας στρόβιλος) και το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (συνήθως κάποιος τύπος λέβητα). Η απόδοση του συνολικού συστήματος προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητας.

Τα αποδοτικότερα συστήματα ΣΗΘ (με πάνω από 80% συνολικό βαθμό απόδοσης) είναι εκείνα που ικανοποιούν μεγάλη θερμική ζήτηση με την ταυτόχρονη παραγωγή σχετικά μικρότερης ηλεκτρικής ισχύος. Όσο αυξάνεται η απαιτούμενη θερμοκρασία της ανακτώμενης ενέργειας, τόσο μειώνεται ο λόγος της παραγόμενης ισχύος προς τη θερμότητα. Η μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική για τα οικονομικά της ΣΗΘ, καθώς η διάθεση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά είναι τεχνικά ευκολότερη απ' ό,τι είναι στην περίπτωση της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας. Εντούτοις, την περίοδο αυτή υπάρχουν ακόμη εμπόδια στη διανομή της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά.

**Πίνακας 1.1. Γενική εικόνα των συστημάτων ΣΗΘ [Πηγή: Onsite Sycom (1999)]**

	<b>Μονάδες ηλεκτρισμού και θερμότητας</b>		<b>Ολοκληρωμένες μονάδες ηλεκτρισμού και θερμότητας</b>		
	Μονάδα ηλεκτρισμού και θερμότητας με ατμοστρόβιλο	Μονάδα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο	Ολοκληρωμένη θερμική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με αεριοστρόβιλο	Ολοκληρωμένη θερμική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με βιομηχανικό κινητήρα	Μικρής κλίμακας ΣΗΘ με κινητήρα αυτοκινήτου
Σύστημα κίνησης	Ατμοστρόβιλος	Συνδυασμός ατμοστρόβιλων και αεριοστρόβιλων	Αεριοστρόβιλος	Βιομηχανικός κινητήρας Otto με τριοδικό καταλυτικό μετατροπέα, κινητήρας φτωχού μίγματος ή κινητήρας diesel με καταλυτικό μετατροπέα SCR <sup>2)</sup>	
Καύσιμο	Κάρβουνο, μαζούτ (καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη), φυσικό αέριο, πετρέλαιο θέρμανσης (συμβατική ατμοπαραγωγή)	Φυσικό αέριο / υγραέριο, κηροζίνη, αεριοποιημένος άνθρακας (στο μέλλον)		Φυσικό αέριο / υγραέριο, βιοαέριο (επεξεργασίας λυμάτων, αγροτικής παραγωγής, αερίου ΧΥΤΑ), κηροζίνη / βιοκαύσιμα	

Επίπεδο θερμοκρασίας	Μέχρι 500 °C	Μέχρι 300 °C	Μέχρι 550 °C	Μέχρι 100 °C	Μέχρι 100 °C
Κύριο πεδίο εφαρμογής (παραδείγματα)	Τηλεθέρμανση	Τηλεθέρμανση	Θερμότητα διεργασιών για τη βιομηχανία και τα νοσοκομεία (ατμός και ζεστό νερό)	Τοπικά δίκτυα θέρμανσης, μεμονωμένα κτίρια (νοσοκομεία μεγάλα δημόσια κτίρια)	Ανεξάρτητα συγκροτήματα κατοικιών, μεμονωμένα κτίρια (σχολεία ξενοδοχεία, εμπορικές επιχειρήσεις)
Εύρος δυναμικότητας	5 – 1000 MW <sub>e</sub>	20 – 100 MW <sub>e</sub>	1 – 10 MW <sub>e</sub>	20 – 1000 kW <sub>e</sub>	5 – 15 kW <sub>e</sub>
Δείκτης συμπαραγωγής <sup>1)</sup>	0.30 – 0.60	0.80 – 1.20	0.40 – 0.60	0.55 – 0.65	0.35 – 0.45
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	0.25 – 0.35 <sup>3)</sup> 0.30 – 0.40 <sup>4)</sup>	0.40 - 0.50	0.20 – 0.35	0.30 – 0.40	0.25 – 0.30
Συνολική απόδοση	0.45 <sup>5)</sup> – 0.85	0.55 <sup>5)</sup> – 0.85	0.75 – 0.85	0.85 – 0.90	0.85 – 0.90
Πλεονεκτήματα	Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας σε μεγάλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής	Μικρό κόστος επένδυσης, μεγάλος συντελεστής συμπαραγωγής	Θερμότητα διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας	Μικρές διαστάσεις, ολοκληρωμένη κατασκευή, υψηλός συνολικός βαθμός απόδοσης	

<sup>1)</sup> Δείκτης συμπαραγωγής = ηλεκτρική/θερμική ενέργεια  
<sup>2)</sup> SCR: εξουδετέρωση των NO<sub>x</sub> με ουρία  
<sup>3)</sup> Στρόβιλος αντίθλιψης, μέγιστη αποσύζευξη θερμότητας  
<sup>4)</sup> Στρόβιλος συμπυκνώματος, μέγιστη αποσύζευξη θερμότητας  
<sup>5)</sup> Υπόθεση: Μόνο μία πολύ μικρή ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας ανακτάται (οι μεγάλοι θερμικοί σταθμοί συχνά κατασκευάζονται μακριά από τους καταναλωτές θερμότητας, και αυτός είναι ο λόγος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα μικρό ποσοστό της παραγόμενης θερμότητας).

## 1.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### 1.2.1. Θερμικές μηχανές

Μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθες βασικές επιλογές για τη συμπαραγωγή (δεν γίνεται εδώ αναφορά σε μερικές νεώτερες τεχνολογίες):

- *Συμπαραγωγή με ατμοστρόβιλο:* Χρησιμοποιείται άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, ξύλα, απόβλητα, τύρφη και πυρηνικά καύσιμα. Ο ατμός είναι το μέσο με το οποίο η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.
- *Συμπαραγωγή με αεριοστρόβιλο:* Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι τα μόνα κατάλληλα καύσιμα. Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι τα καυσαέρια του θαλάμου καύσης.
- *Συμπαραγωγή με συνδυασμένο κύκλο:* Η υψηλή θερμότητα και περιεκτικότητα σε οξυγόνο των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται σε μια δεύτερη διεργασία με έναν ατμοστρόβιλο.
- *Συμπαραγωγή με παλινδρομική μηχανή:* Η χημικά δεσμευμένη ενέργεια του φυσικού αερίου ή του πετρελαίου diesel, για παράδειγμα, μετασχηματίζεται άμεσα με την καύση σε μηχανική ενέργεια.

Όλες οι ανωτέρω τεχνολογίες είναι σε θέση να παραγάγουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια, και χαρακτηρίζονται ως "θερμικές μηχανές". Πιο συγκεκριμένα, η θερμική μηχανή ορίζεται ως: "μία συσκευή που μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια" ή, πιο σωστά, ως "ένα σύστημα που λειτουργεί συνεχώς και μόνο θερμότητα και έργο μπορούν να περάσουν τα όριά του". Επιπλέον, η λειτουργία μιας θερμικής μηχανής μπορεί να παρασταθεί καλύτερα από ένα θερμοδυναμικό κύκλο. Μερικά παραδείγματα είναι οι κύκλοι Otto, Diesel, Brayton, Stirling και Rankine.

### 1.2.2. Μηχανές εσωτερικής καύσης

Μεταξύ των πιο ευρέως διαδεδομένων και περισσότερων αποδοτικών κύριων πηγών ενέργειας για ΣΗΘ είναι οι παλινδρομικές μηχανές ή μηχανές εσωτερικής καύσης - ΜΕΚ. Διάφοροι τύποι αυτών των μηχανών είναι εμπορικά διαθέσιμοι, αλλά δύο από αυτούς έχουν περισσότερη σημασία σε στατικές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, πιο συγκεκριμένα οι τετράχρονες μηχανές με σπινθηριστή (κύκλος Otto) και οι μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση (κύκλος Diesel). Τα κύρια μηχανικά μέρη των μηχανών κύκλου Otto και Diesel είναι τα ίδια. Και οι δύο χρησιμοποιούν ένα κυλινδρικό θάλαμο καύσης κατά μήκος του οποίου κινείται ένα κατάλληλα εφαρμοσμένο έμβολο.

Το έμβολο συνδέεται σε έναν στροφαλοφόρο άξονα που μετασχηματίζει τη γραμμική κίνηση του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο σε περιστροφική κίνηση στο στροφαλοφόρο άξονα. Οι περισσότερες μηχανές διαθέτουν πολλαπλούς κυλίνδρους που κινούν ένα κοινό στροφαλοφόρο άξονα. Τόσο οι μηχανές κύκλου Otto όσο και οι τετράχρονες μηχανές Diesel ολοκληρώνουν έναν κύκλο λειτουργίας σε τέσσερις κινήσεις του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο. Οι κινήσεις αυτές περιλαμβάνουν:

1. εισαγωγή του αέρα (ή του μίγματος αέρα-καυσίμου) στον κύλινδρο,
2. συμπίεση με καύση του καυσίμου,
3. επιτάχυνση του εμβόλου από τη δύναμη της καύσης (κίνηση ισχύος), και
4. αποβολή των προϊόντων της καύσης από τον κύλινδρο.

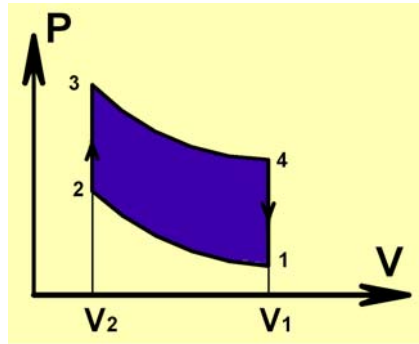
Η κύρια διαφορά μεταξύ των κύκλων Otto και Diesel είναι η μέθοδος της καύσης του καυσίμου. Στον κύκλο Otto χρησιμοποιείται ένας σπινθηριστής για την ανάφλεξη ενός έτοιμου μίγματος αέρα καυσίμου που εισάγεται στον κύλινδρο. Από την άλλη, μια μηχανή Diesel συμπιέζει τον αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο σε υψηλή πίεση, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του στα επίπεδα της θερμοκρασίας ανάφλεξης του καυσίμου που εγχέεται υπό υψηλή πίεση.

#### 1.2.2.1. Κύκλος Otto

Διάφορες μηχανές μπορούν να προσομοιωθούν από τον κύκλο Otto (σχήμα 1.2), όπως είναι οι μηχανές βενζίνης και οι μηχανές αερίου. Ο κύκλος Otto είναι ένας ιδανικός τυποποιημένος κύκλος του αέρα που αποτελείται από τέσσερα στάδια:

- 1 έως 2: Ισεντροπική συμπίεση.
- 2 έως 3: Αντιστρέψιμη θέρμανση υπό σταθερό όγκο.
- 3 έως 4: Ισεντροπική εκτόνωση.
- 4 έως 1: Αντιστρέψιμη ψύξη υπό σταθερό όγκο.





Σχήμα 1.2. Διάγραμμα P-V ενός κύκλου Otto

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός κύκλου Otto με ένα τέλειο αέριο ως ενεργειακό ρευστό είναι:

$$\eta = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)$$

ενώ αποδεικνύεται ότι η ανωτέρω σχέση μπορεί να αναχθεί στην ακόλουθη:

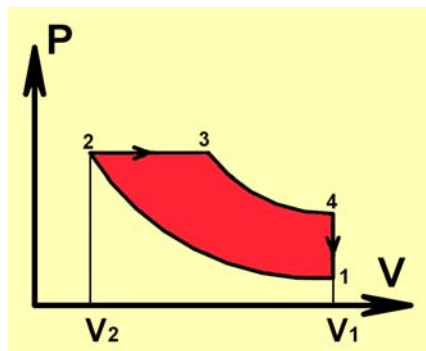
$$\eta = 1 - r^n \quad (1.1)$$

όπου  $r (=V_1/V_2)$  είναι ο λόγος συμπίεσης, και  $n (=1-\gamma)$  μια σταθερά που εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα.

### 1.2.2.2. Κύκλος Diesel

Ο κύκλος Diesel (σχήμα 1.3) είναι ένας ιδανικός τυποποιημένος κύκλος του αέρα που αποτελείται επίσης από τέσσερα στάδια:

- 1 έως 2: Ισεντροπική συμπίεση.
- 2 έως 3: Αντιστρέψιμη θέρμανση υπό σταθερή πίεση.
- 3 έως 4: Ισεντροπική εκτόνωση.
- 4 έως 1: Αντιστρέψιμη ψύξη υπό σταθερό όγκο.



Σχήμα 1.3. Διάγραμμα P-V ενός κύκλου Diesel

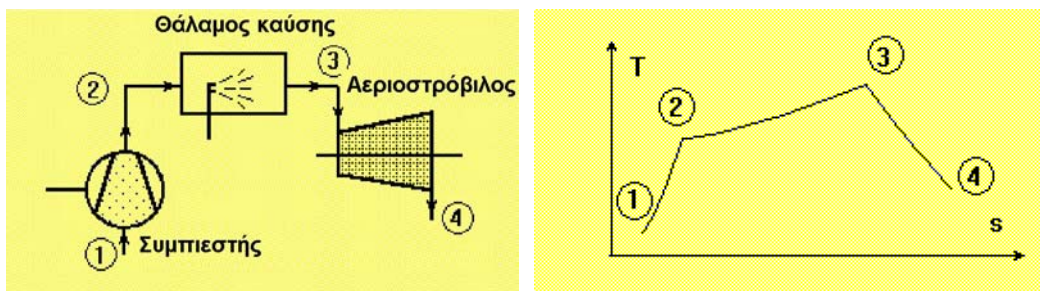
Ορίζοντας τον λόγο συμπίεσης  $r$  ως:  $r = V_1/V_2$  και το λόγο αποκοπής  $\beta$  ως:  $\beta = V_3/V_2$ , ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Diesel με τέλειο αέριο ως ρευστό λειτουργίας είναι:

$$\eta = 1 - [r(\beta^n - 1)] / [(\beta - 1)\gamma r^n] \quad (1.2)$$

όπου  $n (= \gamma)$  είναι μία σταθερά που εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα.

### 1.2.3. Αεριοστρόβιλοι

Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούν τα θερμά αέρια που παράγονται άμεσα από την καύση ορυκτών καυσίμων. Το θερμό αέριο εκτονώνεται μέσα από τα πτερύγια του δρομέα του στροβίλου αναγκάζοντας τα να κινηθούν. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διεργασία του αεριοστροβίλου. Η διεργασία 3-4, που παρουσιάζεται στο διάγραμμα T-s (σχήμα 1.4) του αεριοστροβίλου ανοικτού κύκλου του σχήματος (αριστερά), αντιστοιχεί σε μια μη αναστρέψιμη αλλά σχεδόν αδιαβατική εκτόνωση των αερίων της καύσης.



Σχήμα 1.4. Σχηματική αναπαράσταση ενός αεριοστροβίλου ανοικτού κύκλου (αριστερά) και το αντίστοιχο διάγραμμα T-s (δεξιά)

Το παραγόμενο έργο από το στροβίλο είναι:

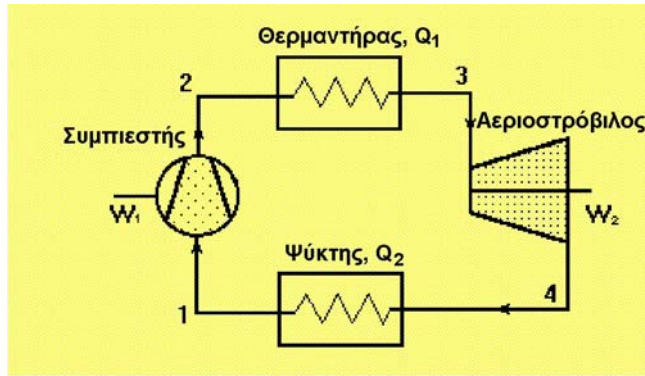
$$\dot{W}_{out} = \dot{m} (h_3 - h_4)$$

Όπου  $\dot{m}$  είναι η παροχή μάζας των καυσαερίων,  $h_3$  είναι η ενθαλπία των καυσαερίων στην είσοδο και  $h_4$  η ενθαλπία τους στην έξοδο. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι:

$$\eta = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (1.3)$$

#### 1.2.3.1. Ο κύκλος Brayton (ή Joule)

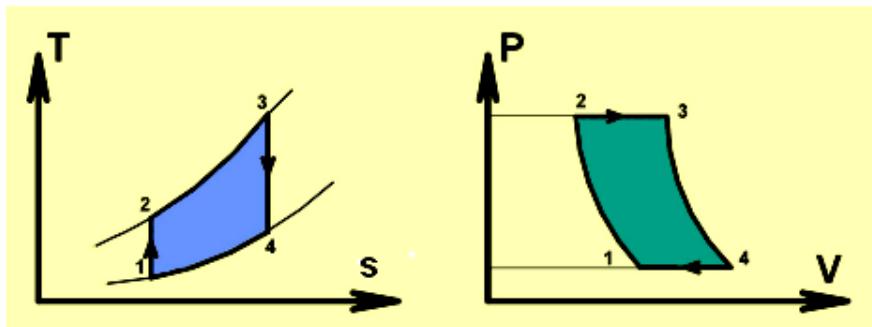
Ο θερμοδυναμικός κύκλος που σχετίζεται με την πλειοψηφία των αεριοστροβιλικών συστημάτων είναι ο κύκλος Brayton, στον οποίο ο ατμοσφαιρικός αέρας, που είναι το εργαζόμενο μέσο, διέρχεται από τον στροβίλο μόνο μία φορά. Οι θερμοδυναμικές διεργασίες του κύκλου Brayton περιλαμβάνουν τη συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, την εισαγωγή και ανάφλεξη του καυσίμου, και την εκτόνωση των θερμών καυσαερίων μέσω του στροβίλου. Η αναπτυσσόμενη ισχύς χρησιμοποιείται για την κίνηση του συμπιεστή και της ηλεκτρογεννήτριας. Οι κύριες συνιστώσες ενός αεριοστροβίλου παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5. Μια μονάδα αεριοστρόβιλου κλειστού κύκλου

Τόσο η εισαγωγή όσο και η απόρριψη της θερμότητας στον κύκλο Brayton γίνεται υπό σταθερή πίεση, και για το λόγο αυτό ο κύκλος είναι επίσης γνωστός ως κύκλος σταθερής πίεσης. Ο κύκλος, του οποίου τα διαγράμματα T-s και P-V παρουσιάζονται παρακάτω στο σχήμα 1.6, αποτελείται από τέσσερις διεργασίες

- 1 έως 2: Ισεντροπική συμπίεση.
- 2 έως 3: Θέρμανση υπό σταθερή πίεση.
- 3 έως 4: Ισεντροπική εκτόνωση.
- 4 έως 1: Αποβολή της θερμότητας υπό σταθερή πίεση.



Σχήμα 1.6. Διαγράμματα T-s και P-V του κύκλου Brayton

Το εισαγόμενο έργο στον κύκλο (συμπιεστής)  $\dot{W}_1$  και το παραγόμενο έργο από τον κύκλο (στρόβιλος)  $\dot{W}_2$  είναι:

$$\dot{W}_1 = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad \text{και} \quad \dot{W}_2 = \dot{m} (h_3 - h_4)$$

όπου  $\dot{m}$  είναι η παροχή μάζας στον κύκλο. Η παρεχόμενη θερμότητα στον κύκλο  $\dot{Q}_1$  (θερμαντήρας) και η απορριπτόμενη θερμότητα  $\dot{Q}_2$  από τον κύκλο (ψυκτική μονάδα) είναι, αντίστοιχα:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m} (h_3 - h_2) \quad \text{και} \quad \dot{Q}_2 = \dot{m} (h_4 - h_1)$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου με ενεργειακό μέσο ένα τέλειο αέριο είναι:

$$\eta = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)$$

Αποδεικνύεται ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να αναχθεί στην εξής:

$$\eta = 1 - r^{-\gamma} \quad (1.4)$$

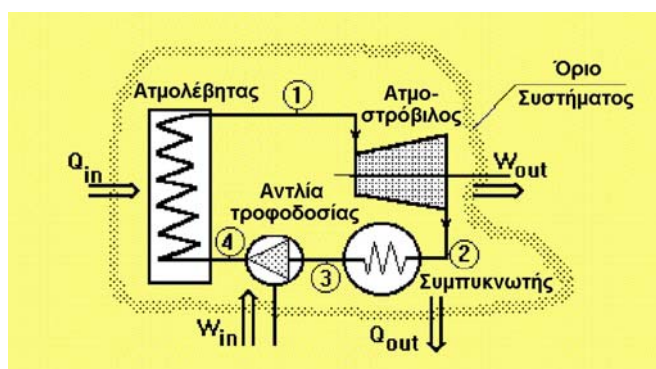


όπου  $r (=P_2/P_1)$  είναι ο λόγος πίεσης και  $n (=1+\gamma)$  μία σταθερά που εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα.

#### 1.2.4. Ατμοστρόβιλοι

Ο ατμοστρόβιλος εξαρτάται από κάποια χωριστή πηγή ενέργειας και δεν μετατρέπει άμεσα το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ατμοστρόβιλοι απαιτούν μία πηγή ατμού υψηλής πίεσης που παράγεται σε κάποιο λέβητα ή ατμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας. Στα καύσιμα των λεβήτων συμπεριλαμβάνονται ορυκτά καύσιμα, όπως ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, ή ανανεώσιμα καύσιμα, όπως το ξύλο ή τα αστικά απορρίμματα. Ο ατμοστρόβιλος μπορεί να αποτελείται από πολλές βαθμίδες, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να οριστεί με την ανάλυση της εκτόνωσης του ατμού από μία υψηλότερη σε μία χαμηλότερη πίεση.

Ο θερμοδυναμικός κύκλος του ατμοστρόβιλου είναι ο κύκλος Rankine, παρόλο που εφαρμόζονται και κάποιοι άλλοι, όπως οι κύκλοι αναθέρμανσης και αναγέννησης, και ο συνδυασμένος κύκλος. Ο κύκλος Rankine είναι ο βασικός κύκλος των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και συνίσταται κατ' αρχήν από μια πηγή θερμότητας (λέβητας) που μετατρέπει το νερό σε ατμό υψηλής πίεσης. Ο ατμός ρέει μέσα από το στρόβιλο και παράγει μηχανική ισχύ, και μπορεί να είναι υγρός, ξηρός κορεσμένος ή υπέρθερμος. Όταν εξέρχεται από τον στρόβιλο συμπυκνώνεται και επιστρέφει στο λέβητα για να επαναληφθεί η διαδικασία, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 1.7. Τα στάδια ενός ολοκληρωμένου συστήματος ατμοστρόβιλου

Σύμφωνα με το διάγραμμα του παραπάνω κύκλου, η ωφέλιμη ισχύς του στρόβιλου σε κατάσταση σταθερής ροής είναι:

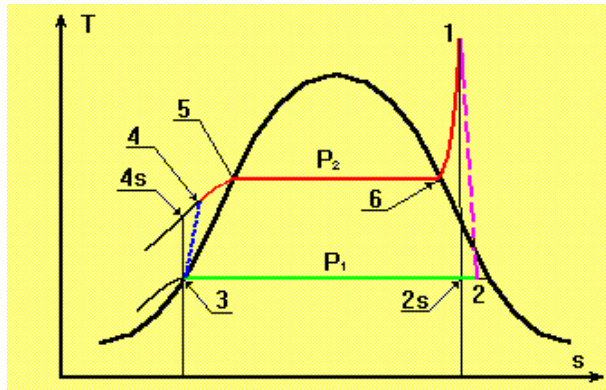
$$P = \dot{m} (h_1 - h_2)$$

όπου  $\dot{m}$  είναι η παροχή μάζας του ατμού μέσα από τον στρόβιλο, ενώ  $h_1$  και  $h_2$  είναι η ειδική ενθαλπία του ατμού στην είσοδο και την έξοδο του στρόβιλου αντίστοιχα. Η αποδοτικότητα των ατμοστρόβιλων συχνά περιγράφεται από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης της διαδικασίας εκτόνωσης. Η παρουσία σταγονιδίων στον ατμό μειώνει την απόδοση του στρόβιλου και προκαλεί τη φυσική διάβρωση των πτερυγίων. Για το λόγο αυτό, ο λόγος ξηρότητας του ατμού στην έξοδο του στρόβιλου δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 0,9.

### 1.2.4.1. Ο κύκλος Rankine

Ο κύκλος Rankine αντιστοιχεί σε μια θερμική μηχανή με κύκλο ισχύος ατμού. Το πιο κοινό εργαζόμενο μέσο είναι το νερό. Ο κύκλος συνίσταται από τέσσερις διεργασίες (βλ. σχήμα 1.8):

- 1 έως 2: Ισεντροπική εκτόνωση (ατμοστρόβιλος).
- 2 έως 3: Αποβολή της θερμότητας υπό σταθερή πίεση (συμπυκνωτής).
- 3 έως 4: Ισεντροπική συμπίεση (αντλία).
- 4 έως 1: Θέρμανση υπό σταθερή πίεση (λέβητας).



Σχήμα 1.8. Διάγραμμα T-s του κύκλου Rankine

Το παραγόμενο έργο του κύκλου (ατμοστρόβιλος)  $\dot{\square}_1$  και το εισαγόμενο έργο στον κύκλο (αντλία)  $\dot{\square}_2$  είναι αντίστοιχα:

$$\dot{\square}_1 = \dot{\square} (h_1 - h_2) \quad \text{και} \quad \dot{\square}_2 = \dot{\square} (h_4 - h_3)$$

με  $\dot{\square}$  την παροχή μάζας του κύκλου. Η παρεχόμενη θερμότητα στον κύκλο (από το λέβητα)  $\dot{Q}_1$  και η απορριπτόμενη θερμότητα από τον κύκλο (στο συμπυκνωτή)  $\dot{Q}_2$  είναι αντίστοιχα:

$$\dot{Q}_1 = \dot{\square} (h_1 - h_4) \quad \text{και} \quad \dot{Q}_2 = \dot{\square} (h_2 - h_3)$$

Το ωφέλιμο έργο του κύκλου είναι:  $\dot{\square} = \dot{\square}_1 - \dot{\square}_2$ , και ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός κύκλου Rankine ορίζεται τότε ως:

$$\eta = \dot{\square} / \dot{Q}_1 \quad (1.5)$$

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine δεν είναι τόσο υψηλός όπως αυτός του κύκλου Carnot, αλλά ο κύκλος αυτός παρουσιάζει λιγότερες πρακτικές δυσκολίες και είναι πιο οικονομικός.

### 1.2.5. Αρχές της καύσης

#### 1.2.5.1. Είδη των καυσίμων

Τα χρησιμοποιούμενα στους λέβητες καύσιμα αποτελούνται από υδρογονάνθρακες που περιλαμβάνουν αλκίνια ( $C_nH_{2n-2}$ ), π.χ. το ακετυλένιο ( $n=2$ ), αλκένια ( $C_nH_{2n}$ ), π.χ. το αιθυλένιο ( $n=2$ ), αλκάνια ( $C_nH_{2n+2}$ ), π.χ. το οκτάνιο ( $n=8$ ). Μια τυπική αντίδραση

καύσης περιλαμβάνει ένα άτομο άνθρακα με δύο άτομα οξυγόνου και παραγωγή θερμότητας, σύμφωνα με την ακόλουθη βασική αντίδραση:



Η παραγόμενη θερμότητα κατά την αντίδραση καύσης είναι γνωστή ως θερμαντική ικανότητα ή θερμογόνος δύναμη (ΘΔ) του καυσίμου, και εκφράζεται σε μονάδες θερμότητας ανά μονάδα βάρους ή όγκου του καυσίμου.

Για να καθοριστεί η βασική σύσταση ενός καυσίμου συνήθως χρησιμοποιούνται δύο αναλύσεις. Η πρώτη ονομάζεται προσεγγιστική ανάλυση και προσδιορίζει την επί τοις εκατό κατά βάρος περιεκτικότητα του καυσίμου σε υγρασία, πτητικά συστατικά, μόνιμο άνθρακα, τέφρα και θείο. Η δεύτερη ανάλυση είναι γνωστή ως στοιχειακή ανάλυση και καθορίζει την επί τοις εκατό κατά βάρος σύσταση του καυσίμου σε άνθρακα, υδρογόνο, άζωτο, και οξυγόνο. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η θερμογόνος δύναμη ενός καυσίμου αυξάνει με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα.

Οι πίνακες 1.2 και 1.3 παρέχουν αντίστοιχα τα αποτελέσματα της ποσοτικής και στοιχειακής ανάλυσης του άνθρακα που εξάγεται από δύο περιοχές των ΗΠΑ. Στον πίνακα 1.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης ενός άλλου στερεού καυσίμου, του ξύλου. Όπως είναι εμφανές, το πεύκο έχει μεγαλύτερη κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα, συνεπώς και μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη.

**Πίνακας 1.2. Αποτελέσματα της ποσοτικής ανάλυσης του άνθρακα που εξάγεται από δύο περιοχές των ΗΠΑ**

Τύπος Γαιάνθρακα	Υγρασία	Πτητικά Συστατικά	Μόνιμος Άνθρακας	Τέφρα	Θείο
Lackawana, PA	2.0	6.3	79.7	12	0.6
Weld, CO	24.0	30.2	40.8	5	0.3

**Πίνακας 1.3. Αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης του άνθρακα που εξάγεται από δύο περιοχές των ΗΠΑ**

Τύπος Γαιάνθρακα	Άνθρακας	Υδρογόνο	Οξυγόνο	Άζωτο	Θερμογόνος δύναμη
Lackawana, PA	93.5	2.6	2.3	0.9	13000
Weld, CO	75.0	5.1	17.9	1.5	9200

**Πίνακας 1.4. Αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης επιλεγμένων τύπων ξύλου**

Τύπος Ξύλου	Άνθρακας	Υδρογόνο	Οξυγόνο	Άζωτο	Θερμογόνος δύναμη
Δρυς	49.5	6.6	43.7	0.2	7980
Πεύκο	59.0	7.2	32.7	1.1	10400
Φλαμουριά	49.7	6.9	43.0	0.3	8200

Τα υγρά καύσιμα ή καύσιμα απόσταξης ταξινομούνται σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τις ιδιότητές τους. Για τα πετρελαϊκά καύσιμα υπάρχουν 6 διαφορετικοί βαθμοί, ανάλογα με το ιξώδες τους. Ο πίνακας 1.5 παρέχει τις τιμές της θερμογόνου δύναμης και τις πιο κοινές χρήσεις 5 τύπων πετρελαίου που διατίθενται στις ΗΠΑ. Το

πετρελαϊκό καύσιμο Ν° 3 έχει τελευταία ενσωματωθεί ως τμήμα του πετρελαϊκού καυσίμου Ν° 2.

**Πίνακας 1.5. Θερμογόνος δύναμη και ειδικό βάρος των πετρελαίων καύσεως που χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ**

<i>Κατηγορία πετρελαίου</i>	<i>Ειδικό Βάρος</i>	<i>Θερμογόνος Δύναμη KWh/litre (MBtu/gal)</i>	<i>Εφαρμογές</i>
N° 1	0.805	9.7 (134)	Για εξάτμιση σε καυστήρες τύπου δοχείου
N° 2	0.850	10.4 (139)	Για γενικής χρήσης οικιακή θέρμανση
N° 3	0.903	10.9 (145)	Για καυστήρες χωρίς προθέρμανση
N° 5	0.933	11.1 (148)	Χρειάζεται προθέρμανση στους 75-95°C
N° 6	0.965	11.3 (151)	Χρειάζεται προθέρμανση στους 95-115°C

Παρόμοια κατάταξη εφαρμόζεται και για τα καύσιμα diesel, με το diesel Ν° 1 να χρησιμοποιείται σε πολύστροφες μηχανές, και το Ν° 2 να χρησιμοποιείται στις βιομηχανικές εφαρμογές και τα βαριά οχήματα. Το υγραέριο (LPG) είναι ένα μίγμα προπανίου και βουτανίου, ενώ το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα μεθανίου και αιθανίου.

#### **1.2.5.2. Τιμές της θερμογόνου δύναμης των καυσίμων**

Η θερμογόνος δύναμη συνήθως παρέχεται για ξηρό καύσιμο. Στην πράξη η υγρασία μειώνει τη θερμογόνο δύναμη των καυσίμων σύμφωνα με την ακόλουθη απλουστευμένη εξίσωση:

$$HV = HV_{dry} \cdot (1 - M) \quad (1.7)$$

όπου  $M$  είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου. Επιπλέον, η θερμογόνος δύναμη των καυσίμων μειώνεται με το υψόμετρο. Αναφέρεται ότι, εμπειρικά, η θερμογόνος δύναμη μειώνεται κατά 4% για κάθε αύξηση του υψόμετρου κατά 300m. Επιπλέον, η θερμογόνος δύναμη επηρεάζεται από τη φάση του νερού / ατμού στα προϊόντα της καύσης.

Εάν το  $H_2O$  είναι σε υγρή μορφή, η θερμογόνος δύναμη ονομάζεται Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ) ή Μικτή Θερμογόνος Δύναμη (ΜΘΔ). Όταν το  $H_2O$  είναι με μορφή ατμού, η θερμογόνος δύναμη καλείται Κατώτερη ή Καθαρή Θερμογόνος Δύναμη (ΚΘΔ). Η ΑΘΔ προσδιορίζεται εργαστηριακά με χρήση του θερμοδομετρητή, που μετρά τη θερμότητα που αφαιρείται κατά την ψύξη μέχρι μία τυπική θερμοκρασία αναφοράς των προϊόντων της καύσης. Κατά συνέπεια, περιλαμβάνει τη λανθάνουσα θερμότητα που ανακτάται κατά τη συμπύκνωση του τμήματος του υδρατμού. Αυτός ο υδρατμός σχηματίζεται ως αποτέλεσμα της καύσης κάθε μορίου υδρογόνου που περιέχεται στο καύσιμο και από την εξάτμιση κάθε περιεχόμενης υγρασίας.

Η ΚΘΔ προσδιορίζεται υπολογιστικά, και είναι ίση με την ΜΘΔ μείον τη λανθάνουσα θερμότητα του υδρατμού που σχηματίζεται από την καύση του υδρογόνου και από οποιαδήποτε ποσότητα υγρασίας που είναι παρούσα στα καύσιμα. Η ΚΘΔ είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική της διαθέσιμης στην πράξη θερμότητας, όταν τα

καύσιμα καίγονται σε συσκευές όπως οι φούρνοι και οι λέβητες. Η λανθάνουσα θερμότητα του υδρατμού που περιλαμβάνεται στα καυσαέρια κανονικά δεν είναι ανακτήσιμη, εκτός από τις περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας που περιλαμβάνει συμπύκνωση των υδρατμών.

Η προμήθεια των καυσίμων συνήθως γίνεται βάσει της ΜΘΔ τους και η κατανάλωση ενέργειας της εγκατάστασης εκφράζεται πάντοτε ως προς την ΜΘΔ, συνεπώς είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται η ΜΘΔ στις ενεργειακές αναλύσεις εφικτότητας της ΣΗΘ. Οποιοδήποτε προκύπτει ενεργειακό ισοζύγιο θα ποικίλει ανάλογα με τη ΘΔ που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς, και αυτό, στη συνέχεια, θα έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές τιμές του θερμικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης και του εξοπλισμού καύσης. Επομένως, πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή σε οποιαδήποτε ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων απόδοσης. Στον πίνακα 1.6 παρατίθενται χαρακτηριστικές ιδιότητες κάποιων επιλεγμένων καυσίμων.

**Πίνακας 1.6. Χαρακτηριστικές ιδιότητες επιλεγμένων καυσίμων**

Καύσιμο	ΘΔ όπως δίνεται συνήθως		Ρύποι %		
	Μικτή	Καθαρή	Θείο	Νερό	Τέφρα
Άνθρακας	30.6 MJ/kg	29.7 MJ/kg	1.2	10.0	8.0
Υπολείμματα ξύλου	15.8 MJ/kg	14.4 MJ/kg	0.4	15	Ίχνος
Μαζούτ	41.2 MJ/litre	38.9 MJ/litre	2.0	0.3	0.04
Βενζίνη	38.3 MJ/litre	36.0 MJ/litre	0.15	0.05	0.01
Φυσικό αέριο	38.0 MJ/m <sup>3</sup>	34.2 MJ/m <sup>3</sup>	-	Ίχνος	-
Βιοαέριο	20.0 MJ/m <sup>3</sup>	18.0 MJ/m <sup>3</sup>	Ίχνος	Ίχνος	-
Αέρια ορυχείων	21.0 MJ/m <sup>3</sup>	18.9 MJ/m <sup>3</sup>	Ίχνος	5.0	-

### 1.2.5.3. Εκπομπές της καύσης

Κατά την καύση όλων των ορυκτών καυσίμων παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμός σε ποσότητες που είναι άμεσες συναρτήσεις της περιεκτικότητας σε άνθρακα και υδρογόνο του καυσίμου που καταναλώνεται. Εάν το καύσιμο περιέχει θείο, θα παραχθεί μία αντίστοιχη ποσότητα διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>). Επιπλέον, η διαδικασία της καύσης παράγει οξειδίο του αζώτου (NO) και διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>), των οποίων ο συνδυασμός γενικά είναι γνωστός ως οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>).

Τα οξειδία αυτά δημιουργούνται από μια χημική αντίδραση μεταξύ των υφιστάμενων στον αέρα οξυγόνου και αζώτου υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Υπάρχουν τρεις κύριοι μηχανισμοί για το σχηματισμό τους:

- Θερμικά NO<sub>x</sub>,
- NO<sub>x</sub> του καυσίμου,
- Άμεσα NO<sub>x</sub>.

Ο ρυθμός με τον οποίο λαμβάνουν χώρα αυτές οι διαφορετικές αντιδράσεις επηρεάζεται πολύ από τη διαδικασία της καύσης, με τη θερμοκρασία και το λόγο αέρα-καυσίμου να αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικούς παράγοντες.



Τα θερμικά NO<sub>x</sub> είναι τα πιο σημαντικά και σχηματίζονται από την αντίδραση του αζώτου και του οξυγόνου στον αέρα της καύσης. Αυτή εκκινεί στην αρχική ζώνη της καύσης, αλλά κατά το μεγαλύτερο μέρος της λαμβάνει χώρα στη δευτερεύουσα ζώνη. Η θερμοκρασία επηρεάζει έντονα το σχηματισμό τους και η αντίδραση προχωρά πολύ γρήγορα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1.300°C. Τα NO<sub>x</sub> του καυσίμου σχηματίζονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (γύρω στους 700°C) και εμφανίζονται μέσα στη φλόγα μέσω της αντίδρασης με το χημικά δέσμιο άζωτο του καυσίμου. Ο τρίτος τύπος, τα άμεσα NO<sub>x</sub>, είναι και ο λιγότερο σημαντικός. Αυτά σχηματίζονται λόγω της παρουσίας ελεύθερων ριζών υδρογονανθράκων στο μέτωπο της φλόγας.

Τα διαφορετικά καύσιμα έχουν και διαφορετικό αδρανιακό περιεχόμενο, επομένως καίγονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες φλόγας, γεγονός που έχει επίδραση στο σχηματισμό των NO<sub>x</sub>. Ο άνθρακας και τα βαριά πετρελαϊκά έλαια δίνουν υψηλότερα επίπεδα εκπομπών NO<sub>x</sub> σε σχέση με τα ελαφρότερα πετρελαϊκά καύσιμα και το φυσικό αέριο, και αυτό απεικονίζεται στην αντιρροπτική/περιβαλλοντική νομοθεσία που καθορίζει διαφορετικά όρια εκπομπών για τους διαφορετικούς τύπους καυσίμων (η νομοθεσία θέτει επίσης όρια στις εκπομπές SO<sub>2</sub>). Η παρουσία αυτών των οξειδίων στην ατμόσφαιρα θεωρείται ότι έχει επιβλαβή αποτελέσματα και υπάρχει ένας γενικός στόχος ελαχιστοποίησης των εκπομπών NO<sub>x</sub> από όλες τις εγκαταστάσεις καύσης, συμπεριλαμβανομένων και των μονάδων ΣΗΘ. Στον πίνακα 1.7 γίνεται μια σύνοψη των υφιστάμενων τεχνικών μείωσης των NO<sub>x</sub>.

**Πίνακας 1.7. Περίληψη των τεχνικών μείωσης των NO<sub>x</sub> [Πηγή: ZREU]**

	<i>Παλινδρομικές Μηχανές</i>	<i>Αεριοστρόβιλοι</i>
Άνευ ορίων	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Στοιχειομετρικοί κινητήρες</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τυποποιημένοι στρόβιλοι</li> </ul>
TA-Air 500 mg/m <sup>3</sup> , 5% O <sub>2</sub> και 150 mg/m <sup>3</sup> , 15% O <sub>2</sub> αντίστοιχα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μηχανές φτωχού μείγματος και αυτομάτου ελέγχου –λ.</li> <li>• Στοιχειομετρικοί κινητήρες με τριοδικό καταλυτικό μετατροπέα.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ξηροί καυστήρες χαμηλών NO<sub>x</sub></li> <li>• Ψεκασμός ατμού/νερού</li> </ul>
Μισό TA-Air 250 mg/m <sup>3</sup> , 5% O <sub>2</sub> και 75 mg/m <sup>3</sup> , 15% O <sub>2</sub> αντίστοιχα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κινητήρες φτωχής καύσης με αισθητήρα λ και δίοδο καταλυτικό μετατροπέα.</li> <li>• Στοιχειομετρικοί κινητήρες με τριοδικό καταλυτικό μετατροπέα.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ξηροί καυστήρες χαμηλών NO<sub>x</sub></li> <li>• Ψεκασμός ατμού/νερού</li> </ul>
Ειδικές μετατροπές	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιλεκτική καταλυτική περιστολή (SCR) – εφαρμόζεται στο πλούσιο σε CO<sub>2</sub> περιβάλλον των θερμοκηπίων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιλεκτική καταλυτική περιστολή (SCR)</li> </ul>

### 1.2.6. Δείκτες αποδοτικότητας των συστημάτων συμπαραγωγής

Πριν από την περιγραφή των τεχνολογιών της συμπαραγωγής, και μετά από τη συνοπτική παρουσίαση των θερμικών μηχανών και των αρχών της καύσης που έγινε στα προηγούμενα, είναι απαραίτητο να καθοριστούν συγκεκριμένοι δείκτες που να προσδιορίζουν τη θερμοδυναμική απόδοση ενός συστήματος συμπαραγωγής και να διευκολύνουν τη σύγκριση των εναλλακτικών επιλογών (συστημάτων). Πολυάριθμοι τέτοιοι δείκτες έχουν εμφανιστεί στη βιβλιογραφία, και οι σημαντικότεροι από αυτούς ορίζονται στα επόμενα.

Ο βαθμός απόδοσης του κύριου κινητήρα (π.χ. του αεριοστροβίλου, της μηχανής Diesel ή Otto, του ατμοστροβίλου, κλπ.) ορίζεται ως:

$$\eta_m = \frac{\dot{W}_s}{\dot{H}_f} = \frac{\dot{W}_s}{\dot{m}_f H_u} \quad (1.8)$$

όπου  $\dot{W}_s$  είναι η ισχύς στον άξονα της κύριας πηγής ενέργειας,  $\dot{H}_f$  είναι η ισχύς του καυσίμου (η παροχή ενέργειας του καυσίμου) που καταναλώνεται από το σύστημα ( $\dot{H}_f = \dot{m}_f H_u$ ),  $\dot{m}_f$  είναι η παροχή μάζας του καυσίμου, και  $H_u$  η κατώτερη θερμογόνος δύναμή του. Πρέπει να σημειωθεί ότι, στην Ευρώπη η ανάλυση συνήθως γίνεται με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (ΚΘΔ). Στις ΗΠΑ συνήθως χρησιμοποιείται η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (ΑΘΔ)  $H_o$ .

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συστήματος συμπαραγωγής είναι:

$$\eta_e = \frac{\dot{W}_e}{\dot{H}_f} = \frac{\dot{W}_e}{\dot{m}_f H_u} \quad (1.9)$$

όπου  $\dot{W}_e$  είναι η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος (η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται από το βοηθητικό εξοπλισμό αφαιρείται από την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας). Επίσης, ο θερμοκός βαθμός απόδοσης του μέρους παραγωγής της θερμότητας του συστήματος είναι:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}}{\dot{H}_f} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_f H_u} \quad (1.10)$$

όπου  $\dot{Q}$  είναι η ωφέλιμη θερμική ισχύς του συστήματος συμπαραγωγής. Τέλος, ο συνολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος συμπαραγωγής είναι:

$$\eta = \eta_e + \eta_{th} = \frac{\dot{W}_e + \dot{Q}}{\dot{H}_f} \quad (1.11)$$

Η ποιότητα της θερμότητας είναι χαμηλότερη από αυτήν της ηλεκτρικής ενέργειας και ελαττώνεται με τη θερμοκρασία στην οποία είναι διαθέσιμη (δηλαδή η ποιότητα της θερμότητας υπό μορφή ζεστού νερού είναι χαμηλότερη από την ποιότητά της υπό μορφή ατμού). Συνεπώς, δεν είναι σκόπιμο να προστίθεται η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα, όπως στην περίπτωση της εξίσωσης (1.11), και μερικές φορές είναι παραπλανητική μια σύγκριση μεταξύ συστημάτων με βάση τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης. Ακόμα κι αν μέχρι τώρα συνήθως χρησιμοποιούνται οι ενεργειακοί βαθμοί απόδοσης, μία θερμοδυναμικά ακριβέστερη αξιολόγηση και μία δικαιότερη σύγκριση μεταξύ των συστημάτων μπορεί να γίνει βάσει των εξεργειακών αποδοτικότητων.

Υπάρχουν όμως και άλλες σημαντικές παράμετροι που πρέπει να εξετάζονται στα συστήματα ΣΗΘ, όπως είναι ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα (PHR):

$$PHR = \frac{\dot{W}_e}{\dot{Q}} \quad (1.12)$$

και ο λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμων:

$$FESR = \frac{\dot{H}_{fs} - \dot{H}_{fc}}{\dot{H}_{fs}} \quad (1.13)$$

όπου  $\dot{H}_{fs}$  είναι η συνολική ισχύς των καυσίμων για χωριστή παραγωγή της  $\dot{W}_e$  και της  $\dot{Q}$ , και  $\dot{H}_{fc}$  είναι η ισχύς των καυσίμων του συστήματος συμπαραγωγής που παράγουν τις ίδιες ποσότητες  $\dot{W}_e$  και  $\dot{Q}$ . Προκειμένου ένα σύστημα συμπαραγωγής να αποτελεί μια λογική επιλογή από την άποψη της εξοικονόμησης ενέργειας, πρέπει να είναι:  $FESR > 0$ .

Οι εξισώσεις (1.9) έως (1.12) οδηγούν στις παρακάτω σχέσεις:

$$\eta = \eta_e \left( 1 + \frac{1}{PHR} \right) \quad (1.14)$$

$$PHR = \frac{\eta_e}{\eta_{th}} = \frac{\eta_e}{\eta - \eta_e} \quad (1.15)$$

οι οποίες βοηθούν στον καθορισμό αποδεκτών τιμών του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα ενός συστήματος, όταν είναι γνωστός ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσής του. Πρέπει να αναφερθεί ότι, σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες για την επιλογή ενός συστήματος συμπαραγωγής.

Εάν θεωρηθεί ότι ένα σύστημα ΣΗΘ αντικαθιστά διακριτές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με βαθμούς απόδοσης  $\eta_w$  και  $\eta_Q$ , αντίστοιχα, τότε αποδεικνύεται ότι

$$FESR = 1 - \frac{PHR + 1}{\eta \left( \frac{PHR}{\eta_w} + \frac{1}{\eta_Q} \right)} \quad (1.16)$$

όπου οι δείκτες  $W$  και  $Q$  υποδηλώνουν τη διακριτή παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και της θερμότητας (π.χ. από μία μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και έναν λέβητα), αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, εάν ένα σύστημα ΣΗΘ με συνολικό βαθμό απόδοσης  $\eta=0,80$  και λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα  $PHR=0,60$  υποκαθιστά μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με απόδοση  $\eta_w=0,35$  και έναν λέβητα αποδοτικότητας  $\eta_Q=0,85$ , τότε από την εξίσωση (1.16) προκύπτει:  $FESR=0,325$ . Αυτό σημαίνει ότι η συμπαραγωγή μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά 32,5%.

Η απόδοση ενός συστήματος εξαρτάται από το φορτίο και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Από την άλλη, ο βαθμός χρησιμοποίησης των παραγόμενων ενεργειακών μορφών επηρεάζεται από την αρχική επιλογή (σχεδιασμός) του συστήματος, τη στρατηγική της συμπαραγωγής (λειτουργικός έλεγχος) και τη σύμπτωση μεταξύ της παραγωγής και χρήσης των ωφέλιμων ενεργειακών μορφών. Για τους λόγους αυτούς, οι ολοκληρωτικοί δείκτες για μία χρονική περίοδο, π.χ. οι ετήσιοι δείκτες, είναι συχνά σημαντικότεροι από τους στιγμιαίους ή τους ονομαστικούς, δεδομένου ότι είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικοί της πραγματικής απόδοσης του συστήματος.

Επιπλέον υπάρχουν νομικά ζητήματα που καθιστούν σημαντικές τις ολοκληρωτικές τιμές των δεικτών. Παραδείγματος χάριν, σύμφωνα με το σχετικό νόμο για τα θέματα συμπαραγωγής στην Ελλάδα, για να μπορεί ένα σύστημα ΣΗΘ να είναι επιλέξιμο για επιδότηση πρέπει να έχει ένα ετήσιο συνολικό βαθμό απόδοσης τουλάχιστον 65% στο βιομηχανικό τομέα, και τουλάχιστον 60% στον τριτογενή τομέα. Εντούτοις, σε όλα τα προηγούμενα χρησιμοποιήθηκαν η ηλεκτρική και θερμική ισχύς και η ισχύς των καύσιμων (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου), καταλήγοντας σε τιμές δεικτών που ισχύουν μόνο για μια ορισμένη χρονική στιγμή ή για ένα συγκεκριμένο φορτίο.

Όλοι οι ανωτέρω ορισμοί ισχύουν επίσης εάν η ισχύς αντικατασταθεί από την ενέργεια σε μία ορισμένη χρονική περίοδο. Τότε, οι προκύπτουσες ολοκληρωτικές τιμές των δεικτών υποδηλώνουν την απόδοση του συστήματος κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής. Έτσι, η εξίσωση (1.11) μπορεί να γραφτεί επίσης ως εξής:

$$\eta_a = \frac{W_{ea} + Q_a}{H_{fa}} \quad (1.17)$$

όπου  $W_{ea}$  είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ΣΗΘ κατά τη διάρκεια ενός έτους,  $Q_a$  είναι η ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας, και  $H_{fa}$  είναι η ενέργεια των καυσίμων που καταναλώνονται κατά τη διάρκεια ενός έτους. Συνεπώς, η εξίσωση (1.17) παρέχει τον ετήσιο ολικό βαθμό απόδοσης  $\eta_a$  του συστήματος.

### 1.3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

#### 1.3.1. Τύποι σχημάτων συμπαραγωγής

Ήδη από το 1900 υπήρχε η πρώτη εφαρμογή αυτού που είναι σήμερα γνωστό ως "συμπαραγωγή" σε μερικές μεγάλες πόλεις και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Ο κύριος κινητήρας των γεννητριών ήταν παλινδρομικές ατμομηχανές που συνήθως απέβαλαν ατμό χαμηλής πίεσης σε κεντρικούς αγωγούς διανομής, οι οποίοι τροφοδοτούσαν με αυτόν συστήματα θέρμανσης και παραγωγικών διεργασιών. Με τον τρόπο αυτό γεννήθηκαν οι πρώτες εγκαταστάσεις «συμπαραγωγής αιχμής», οι οποίες πήραν την ονομασία αυτή από την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας για χρήση τους σε παραγωγικές διεργασίες.

Η εν λόγω ορολογία δεν χρησιμοποιήθηκε γι' αυτόν τον τύπο παραγωγής μέχρι τη δεκαετία του '70, και ο όρος «αιχμή» αναφέρεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς παράγεται από τον κύριο κινητήρα ως πρωταρχική λειτουργία και η θερμική ενέργεια που απορρίπτεται από αυτόν χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τις διεργασίες της μονάδας. Η άλλη διάταξη, κατά την οποία η ηλεκτρική ισχύς παράγεται από απορριπτόμενο ατμό, είναι γνωστή ως κύκλος «βάσης». Κατά συνέπεια, διακρίνονται δύο κύριοι τύποι συμπαραγωγής: τα συστήματα «αιχμής» και «βάσης».

Υπάρχουν τέσσερις τύποι συστημάτων συμπαραγωγής κύκλου αιχμής. Στον πρώτο τύπο τα καύσιμα καταναλώνονται σε έναν αεριοστρόβιλο ή μια μηχανή diesel για την παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ισχύος. Τα καυσαέρια παρέχουν θερμότητα για

διεργασίες, ή οδηγούνται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπου παράγεται ατμός για τη λειτουργία ενός δευτερεύοντος ατμοστροβίλου. Αυτό είναι ένα σύστημα αιχμής συνδυασμένου κύκλου. Ο δεύτερος τύπος συστήματος καταναλώνει καύσιμα (οποιοδήποτε είδους) για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης που στη συνέχεια οδηγείται σε ατμοστρόβιλο παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Η εξαγωγή παρέχει ατμό διεργασιών χαμηλής πίεσης. Αυτό είναι ένα ατμοστροβιλικό σύστημα αιχμής.

Ο τρίτος τύπος καταναλώνει καύσιμα όπως είναι το φυσικό αέριο, το diesel, τα ξύλα, ο αεριοποιημένος άνθρακας, ή το αέριο ΧΥΤΑ. Το ζεστό νερό από το σύστημα ψύξης των χιτωνίων της μηχανής οδηγείται σε έναν λέβητα ανάκτησης θερμότητας, όπου μετατρέπεται σε ατμό διεργασιών και ζεστό νερό για θέρμανση χώρων. Ο τέταρτος τύπος είναι ένα αεριοστροβιλικό σύστημα αιχμής. Ένας στρόβιλος φυσικού αερίου οδηγεί μια γεννήτρια και τα καυσαέρια οδηγούνται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπου παράγεται ατμός και θερμότητα διεργασιών. Σε μία μονάδα κύκλου αιχμής χρησιμοποιούνται πάντοτε κάποια πρόσθετα καύσιμα, πέραν αυτών που απαιτούνται για την παραγωγική διεργασία, και έτσι υφίσταται ένα λειτουργικό κόστος που σχετίζεται με την ηλεκτροπαραγωγή.

Τα συστήματα κύκλου «βάσης» είναι πολύ λιγότερο συνηθισμένα από τα αντίστοιχα κύκλου «αιχμής». Τέτοια συστήματα συναντώνται σε βαριές βιομηχανίες, όπως αυτές του γυαλιού ή οι μεταλλουργικές, όπου χρησιμοποιούνται φούρνοι πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Ένας λέβητας ανάκτησης της απόβλητης θερμότητας συλλέγει τη θερμότητα που αποβάλλεται από κάποια θερμική παραγωγική διεργασία. Αυτή η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να παραχθεί ατμός ο οποίος κινεί έναν ατμοστρόβιλο που παράγει ηλεκτρισμό. Δεδομένου ότι το καύσιμο καίγεται πρώτα κατά την παραγωγική διεργασία, δεν απαιτείται καμία πρόσθετη ποσότητα καυσίμου για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

### **1.3.2. Τρόποι λειτουργίας των συστημάτων συμπαραγωγής**

Ο τρόπος λειτουργίας χαρακτηρίζεται από το κριτήριο στο οποίο βασίζεται η ρύθμιση της παραγωγής του ηλεκτρισμού και της ωφέλιμης θερμότητας ενός συστήματος συμπαραγωγής. Υπάρχουν διάφοροι πιθανοί τρόποι λειτουργίας, οι πιο ευδιάκριτοι από τους οποίους παρατίθενται στη συνέχεια:

- *Κάλυψη του θερμικού φορτίου:* Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η ωφέλιμη παραγωγή θερμότητας του συστήματος συμπαραγωγής είναι ίση με το θερμικό φορτίο (χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος). Εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το φορτίο η πλεονάζουσα ενέργεια πωλείται στο δίκτυο, ενώ εάν είναι μικρότερη η συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια αγοράζεται από το δίκτυο.
- *Κάλυψη του θερμικού φορτίου βάσης:* Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα ΣΗΘ διαστασιοποιείται ώστε να παρέχει την ελάχιστη απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την εγκατάσταση. Εφεδρικοί λέβητες ή καυστήρες χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των περιόδων που η ζήτηση θερμότητας είναι υψηλότερη. Ο κύριος κινητήρας της μονάδας λειτουργεί πάντα υπό πλήρες φορτίο. Εάν η ανάγκη για



ηλεκτρική ενέργεια της εγκατάστασης υπερβαίνει αυτήν που μπορεί να παρέχει ο κύριος κινητήρας, τότε η υπόλοιπη ποσότητα μπορεί να αγοραστεί από το δίκτυο. Αντίστοιχα, εάν το επιτρέπουν οι ισχύοντες νόμοι, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να πωληθεί στην ηλεκτρική εταιρεία.

- *Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου:* Κάθε χρονική στιγμή η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση με το ηλεκτρικό φορτίο (χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος ΣΗΘ). Εάν η συμπαραγόμενη θερμότητα είναι μικρότερη από το θερμικό φορτίο ένας βοηθητικός λέβητας υποβοηθά στην κάλυψη των αναγκών, ενώ εάν είναι μεγαλύτερη η πλεονάζουσα θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω συσκευών ψύξης ή μέσω των καυσαερίων.
- *Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου βάσης:* Σε αυτήν τη διάταξη, η μονάδα ΣΗΘ διαστασιοποιείται ώστε να ικανοποιεί την ελάχιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης, βάσει της καμπύλης των ιστορικών αναγκών. Οι υπόλοιπες ανάγκες σε ηλεκτρισμό καλύπτονται από το δίκτυο. Οι θερμικές ανάγκες της εγκατάστασης θα μπορούσαν να καλυφθούν από το σύστημα συμπαραγωγής μόνο ή με πρόσθετους λέβητες. Εάν η θερμική ενέργεια που παράγεται σύμφωνα με το ηλεκτρικό φορτίο βάσης υπερβαίνει τις απαιτήσεις της εγκατάστασης, και εάν το επιτρέπουν οι συνθήκες, η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια μπορεί να πωληθεί σε γειτονικούς πελάτες.
- *Μικτή κάλυψη:* Σε ορισμένες χρονικές περιόδους ακολουθείται ο τρόπος κάλυψης του θερμικού φορτίου, ενώ σε άλλες περιόδους ακολουθείται ο τρόπος κάλυψης του ηλεκτρικού φορτίου. Η απόφαση βασίζεται στην εκτίμηση παραμέτρων όπως είναι τα επίπεδα των φορτίων, η τιμή των καυσίμων και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την συγκεκριμένη ημέρα και ώρα.
- *Αυτόνομη λειτουργία:* Υφίσταται πλήρης κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή χωρίς σύνδεση με το δίκτυο. Αυτός ο τρόπος απαιτεί να διαθέτει το σύστημα ηλεκτρική και θερμική δυναμικότητα εφεδρείας, έτσι ώστε στην περίπτωση που μια μονάδα τεθεί εκτός λειτουργίας για οποιοδήποτε λόγο, οι υπόλοιπες μονάδες να είναι σε θέση να καλύψουν το ηλεκτρικό και το θερμικό φορτίο. Αυτή είναι και η πιο δαπανηρή στρατηγική, τουλάχιστον από την άποψη του αρχικού κόστους του συστήματος.

Γενικά, η λειτουργία κάλυψης του θερμικού φορτίου οδηγεί στον υψηλότερο βαθμό αξιοποίησης του καυσίμου (λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμων - *FESR*) και ίσως στην καλύτερη οικονομική απόδοση της συμπαραγωγής, τόσο στο βιομηχανικό όσο και στον κτιριακό τομέα. Στον τομέα των εταιριών ηλεκτροπαραγωγής, ο τρόπος λειτουργίας εξαρτάται από το συνολικό φορτίο του δικτύου, τη διαθεσιμότητα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και τις υποχρεώσεις της εταιρίας προς τους πελάτες της, όσον αφορά την τροφοδοσία τους με ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

Εντούτοις, η εφαρμογή γενικών κανόνων δεν είναι η συνετότερη προσέγγιση για την περίπτωση της συμπαραγωγής. Κάθε εφαρμογή έχει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, υπάρχει μια πληθώρα συστημάτων ΣΗΘ (ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας, το μέγεθος, τη διαμόρφωση), ενώ η σχεδίαση ενός συστήματος συμπαραγωγής μπορεί

να προσαρμοστεί στις ανάγκες του χρήστη και έχει επιπτώσεις στους δυνατούς τρόπους λειτουργίας του, και το αντίστροφο. Εξάλλου, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος μπορεί να μεταβάλλονται οι διάφορες τεχνικές και οικονομικές παράμετροι με την ημέρα και τη χρονική στιγμή.

Όλες αυτές οι πτυχές καθιστούν αναγκαία τη λήψη αποφάσεων όχι βάσει γενικών κανόνων μόνο, αλλά με τη χρήση συστηματικών διαδικασιών βελτιστοποίησης που βασίζονται στο μαθηματικό προγραμματισμό, τόσο για το σχεδιασμό όσο και για τη λειτουργία του συστήματος. Για τη λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής, ειδικότερα, διατίθενται συστήματα ελέγχου βασισμένα σε μικροεπεξεργαστές. Αυτά παρέχουν τη δυνατότητα τα διάφορα συστήματα ΣΗΘ να λειτουργούν για την κάλυψη κάποιου φορτίου βάσης, να παρακολουθούν τα ηλεκτρικά ή τα θερμικά φορτία, είτε να λειτουργούν κατά ένα οικονομικοτεχνικά βέλτιστο τρόπο (τρόπος μικτής κάλυψης).

Στην τελευταία περίπτωση, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίβλεψη της απόδοσης του συστήματος συμπαραγωγής, περιλαμβανομένων:

- του βαθμού απόδοσης του συστήματος και του ποσού της διαθέσιμης ωφέλιμης θερμότητας,
- των ηλεκτρικών και των θερμικών αναγκών του χρήστη, της ποσότητας της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να αποδοθεί στο δίκτυο, και του ποσού της θερμότητας που πρέπει να απορριφθεί στο περιβάλλον,
- του κόστους της αγοραζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και της αξίας των πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι αυτά μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την ημέρα της εβδομάδας, ή την εποχή.

Με βάση τα δεδομένα αυτά, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να καθορίσει ποιος τρόπος λειτουργίας είναι ο πιο οικονομικός, ακόμη και το κατά πόσο η μονάδα πρέπει να διακόψει τη λειτουργία της. Επιπλέον, με την παρακολούθηση των παραμέτρων λειτουργίας, όπως είναι η αποδοτικότητα, οι ώρες λειτουργίας, η θερμοκρασία των καυσαερίων, οι θερμοκρασίες του νερού ψύξης, κλπ., ο μικρο-επεξεργαστής μπορεί να βοηθήσει στον προγραμματισμό της συντήρησης του συστήματος. Εάν το σύστημα λειτουργεί χωρίς άμεση επίβλεψη, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να συνδεθεί μέσω τηλεφωνικής γραμμής με ένα κέντρο τηλε-παρακολούθησης, όπου η ανάλυση των δεδομένων μέσω Η/Υ μπορεί να προειδοποιήσει το εξειδικευμένο προσωπικό για μία επικείμενη ανάγκη προγραμματισμένης ή μη συντήρησης. Επιπλέον, ως τμήμα ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να συντάσσει εκθέσεις για την τεχνική και την οικονομική απόδοση του συστήματος.