



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού και  
Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μοντελοποίηση και προβλεπτικός έλεγχος  
διεσπαρμένων συστημάτων συμπαγωγής**

Χρυσανθόπουλος Γιώργος

Επιβλέπων: κ. Σαρίμβεης Χ.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2012

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2011 – 2012 στον τομέα Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Υπεύθυνος κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας ήταν ο καθηγητής κ. Χαράλαμπος Σαρίμβεης στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της. Χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του δεν θα μπορούσε να έρθει εις πέρας.

Αθήνα, 12 Δεκεμβρίου 2012

Γ. Χρυσανθόπουλος

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	6
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	7
<b>1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ</b> .....	8
<b>2. ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ</b> .....	16
2.1 <i>Εισαγωγή</i> .....	16
2.2 <i>Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα</i> .....	18
<b>3. ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ</b> .....	22
3.1 <i>Εισαγωγή</i> .....	22
3.2 <i>Εφαρμογή στον οικιακό τομέα</i> .....	23
3.3 <i>Χαρακτηριστικοί δείκτες ενεργειακής συμπεριφοράς</i> .....	25
3.4 <i>Τεχνολογίες συμπαραγωγής για εφαρμογή στον οικιακό τομέα</i> .....	27
3.4.1 <i>Εμβολοφόρες μηχανές</i> .....	28
3.4.2 <i>Μικροτουρμπίνες</i> .....	30
3.4.3 <i>Κελιά καυσίμου</i> .....	32
3.4.4 <i>Μηχανές τύπου Stirling</i> .....	35
<b>4. ΔΙΚΤΥΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ</b> .....	39
4.1 <i>Μικροδίκτυα</i> .....	39
4.1.1 <i>Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα</i> .....	41
4.1.2 <i>Δομή μικροδικτύου</i> .....	44
4.1.3 <i>Αρχιτεκτονική ιεραρχικού ελέγχου</i> .....	45
4.2 <i>Εργοστάσια εικονικής παραγωγής</i> .....	50
4.2.1 <i>Εισαγωγή</i> .....	50
4.2.2 <i>Χαρακτηριστικά</i> .....	52
4.2.3 <i>Έξυπνοι μετρητές</i> .....	53
4.3 <i>Η μετάβαση σε νέες μορφές δικτύων</i> .....	54
4.3.1 <i>Σύγκριση MG με VPP</i> .....	56
<b>5. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ</b> .....	58
5.1 <i>Εισαγωγή στο πρόβλημα</i> .....	58
5.2 <i>Περιγραφή του συστήματος</i> .....	59
5.3 <i>Διαμόρφωση προβλήματος</i> .....	61
5.3.1 <i>Μέθοδος MPC</i> .....	62
5.4 <i>Μοντελοποίηση</i> .....	65
5.4.1 <i>Γεννήτρια συμπαραγωγής</i> .....	65
5.4.2 <i>Βοηθητικός καυστήρας</i> .....	68
5.4.3 <i>Αποθηκευτικές μονάδες-ισοζύγια</i> .....	69

5.4.4 Αντικειμενική συνάρτηση.....	71
5.4.5 Περισσότερες μονάδες συμπαραγωγής .....	72
<b>6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>76</b>
6.1 Δεδομένα.....	76
6.2 Λειτουργία μοντέλου.....	79
6.3 Ανάλυση ευαισθησίας.....	84
6.3.1 Τιμές ρεύματος-καυσίμου .....	84
6.3.2 Αποθηκευτικές μονάδες .....	87
6.3.3 Ορίζοντας ρύθμισης.....	88
6.3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά CHP .....	89
6.3.5 Ενεργειακές απαιτήσεις .....	91
6.3.6 Βοηθητικός καυστήρας .....	92
6.4 Σύνδεση περισσότερων μονάδων .....	93
6.4.1 Δύο μονάδες .....	93
6.4.2 Περισσότερες από δύο μονάδες .....	97
<b>7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>100</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>101</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενεργειακών υβριδικών συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής που βρίσκουν εφαρμογή στον οικιακό τομέα. Συγκεκριμένα εξετάζεται η λειτουργία της εγκατάστασης μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Το σύστημα αποτελείται από τη γεννήτρια συμπαραγωγής τύπου Stirling, ένα βοηθητικό καυστήρα, μία μπαταρία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας και μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμού νερού. Το σύστημα έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού για την αγορά και πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, εξετάζεται η συμπεριφορά της λειτουργίας πολλών διασυνδεδεμένων μονάδων συμπαραγωγής που σχηματίζουν ένα μικροδίκτυο.

Ζητούμενο είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας προβλεπτικού ελέγχου (MPC) η οποία θα αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το πρόβλημα της ρύθμισης του συστήματος, ενώ παράλληλα θα χαρακτηρίζεται από χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Σε αντίθεση με τα συμβατικά προβλήματα MPC τετραγωνικού προγραμματισμού όπου στόχος είναι η παρακολούθηση μιας τροχιάς αναφοράς, το πρόβλημα MPC που διαμορφώνεται στη διπλωματική εργασία είναι μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming – MILP) και ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση λειτουργικού κόστους. Ο σχεδιασμός και η προσομοίωση του συστήματος έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab.

Μεγάλη έμφαση δόθηκε στην ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων που διαμορφώνουν το σύστημα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο [Κεφάλαιο 6](#) με αναλυτικά και συγκριτικά διαγράμματα και τα τελικά συμπεράσματα στο [Κεφάλαιο 7](#).

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Διεσπαρμένη Παραγωγή, μικρο-Συμπαραγωγή, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Μικροδίκτυα, Εργοστάσια εικονικής παραγωγής, Έξυπνο δίκτυο, Μέθοδος προβλεπτικού μοντέλου (MPC), Μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (MILP)

## ABSTRACT

---

The purpose of this diploma thesis is to study energy hybrid systems of distributed generation that find application in residential sector. More specifically this study examines the operation of cogeneration units which simultaneously produce electrical and thermal energy. The considered system consists of the cogenerator (Stirling engine), an auxiliary burner, a battery storage of electricity and a hot water storage tank. The system is able to communicate with the central electrical grid for the purchase and sale of electricity. Emphasis is given in the performance of many interconnected cogeneration units that form a microgrid.

The main goal is to develop a Model Predictive Control methodology which will effectively address the problem of controlling the system. It is important to be characterized by low computational requirements so that proper decisions can be made in short period of time. In contrast to conventional MPC quadratic programming problems, where the goal is to monitor a reference trajectory, the MPC problem formed in this thesis is a mixed integer linear programming (MILP) one and minimizes the operating cost function. Design and simulation of the system performed using Matlab program.

Emphasis was given into the part of sensitivity analysis of all the parameters that compose the system. Simulation results are presented in [Chapter 6](#) with detailed and comparative diagrams and final conclusions in [Chapter 7](#).

### KEY WORDS

Distributed Generation, micro-Cogeneration, Renewable Energy Sources (RES), Microgrids, Virtual Power Plants, Smart Grid, Model Predictive Control (MPC), Mixed Integer Linear Programming (MILP)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια αποτελεί ένα πολύτιμο αγαθό το οποίο σήμερα θεωρείται δεδομένο. Πάνω σε αυτό στηρίζεται όλη η τεχνολογική ανάπτυξη και η σύγχρονη ζωή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως τη γνωρίζουμε μέχρι και σήμερα συγκεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό στα απομακρυσμένα από τα αστικά κέντρα εργοστάσια (Centralized Generation). Έτσι για να φτάσει μέχρι το σημείο κατανάλωσης πρέπει να διανύσει μεγάλη απόσταση με αποτέλεσμα ένα σημαντικό μέρος της να χάνεται. Αυτό το μοντέλο δημιουργήθηκε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα σύμφωνα με τις τεχνολογικές γνώσεις, δυνατότητες και τις ανάγκες αγοράς εκείνης της εποχής. Χαρακτηρίζεται από μεγάλες ποσότητες εκπομπής αέριων ρύπων, μερική αξιοποίηση των πρωτογενών ενεργειακών υλών και μεγάλο λειτουργικό κόστος λόγω της ανάγκης συντήρησης. Οι σημερινές απαιτήσεις έχουν φέρει στην επιφάνεια πολλές αδυναμίες του.

Μια διαφορετική προσέγγιση της ικανοποίησης των ενεργειακών αναγκών είναι η αποκεντρωμένη παραγωγή (Decentralized Generation). Συνεχώς αυξανόμενη προσοχή δέχονται τα **συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής** (Distributed Energy Resources – DER's) που εμφανίζουν υψηλούς βαθμούς αποδοτικότητας, είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον και προωθούν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας (τυπικά μικρότερες των 50 MW) οι οποίες τοποθετούνται πολύ κοντά στο σημείο κατανάλωσης. Υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας μιας μόνο μονάδας για την υποβοήθηση ικανοποίησης των αναγκών ενός απλού νοικοκυριού, αλλά και η συνύπαρξη πολλών και διαφορετικών τεχνολογιών δημιουργώντας ένα μικροδίκτυο που είναι ικανό να τροφοδοτήσει μία ολόκληρη περιοχή. Μάλιστα σκοπός είναι η δημιουργία «έξυπνων» συσκευών-μικροδικτύων που θα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού. Χαρακτηριστικό είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα αγοράς αλλά και πώλησης ρεύματος από και προς το δίκτυο αντίστοιχα, ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες του καταναλωτή και τις τιμές ρεύματος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Παραδείγματα μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι ανεμογεννήτριες, πάνελ φωτοβολταϊκών και οι **γεννήτριες συμπαραγωγής**, (Combined Heat and Power, CHP) με τις οποίες και θα ασχοληθούμε περισσότερο στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής.

## 1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

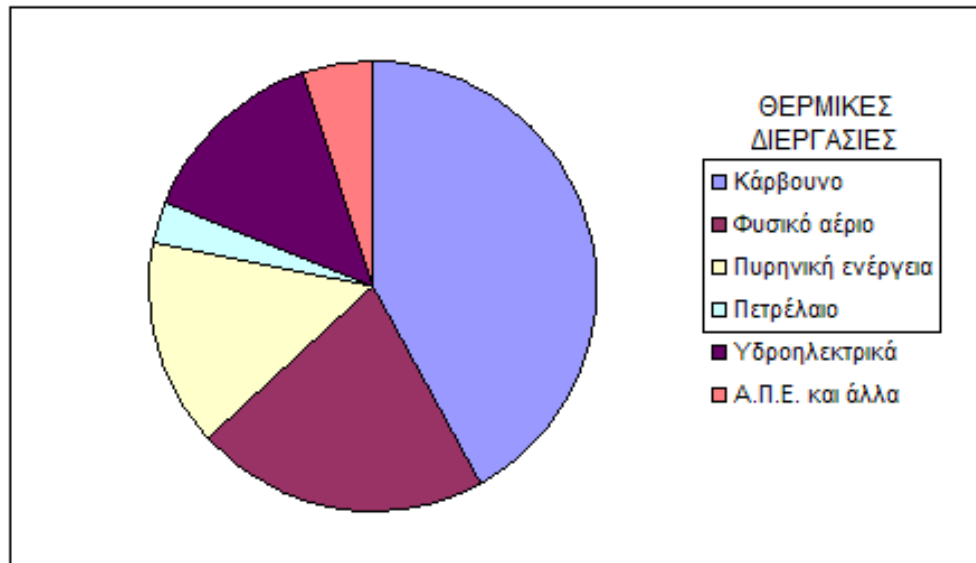
Σε αυτή την πρώτη ενότητα θα γίνει αναφορά στην επικρατούσα ενεργειακή κατάσταση της υφελίου, μεταβαίνοντας στην Ευρώπη με τελική κατάληξη την Ελλάδα. Θα αναφερθούμε στο κομμάτι της συμβατικής παραγωγής και θα απαντήσουμε στο ερώτημα κατά πόσο έχουν εισχωρήσει τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής στο ενεργειακό δίκτυο.

Η ηλεκτροπαραγωγή κατατάσσεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος των πηγών ενέργειας που χρησιμοποιεί. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Η ηλεκτροπαραγωγή από **συμβατικά καύσιμα**, η οποία χρησιμοποιεί σαν πηγή ενέργειας ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα τα οποία έχουν σχηματιστεί σε παλαιότερες γεωλογικές περιόδους και βρίσκονται αποθηκευμένα στο υπέδαφος, σε μικρότερα ή μεγαλύτερα βάθη σε πεπερασμένες μη ανανεώσιμες ποσότητες.
- Η ηλεκτροπαραγωγή από **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**, η οποία αντίθετα με την πρώτη, χρησιμοποιεί πηγές διαχρονικές, που δεν εξαντλούν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα. Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα φυσικά φαινόμενα και κατά συνέπεια εξαρτάται από την περιοδικότητα ή την στοχαστικότητα αυτών των φαινομένων.

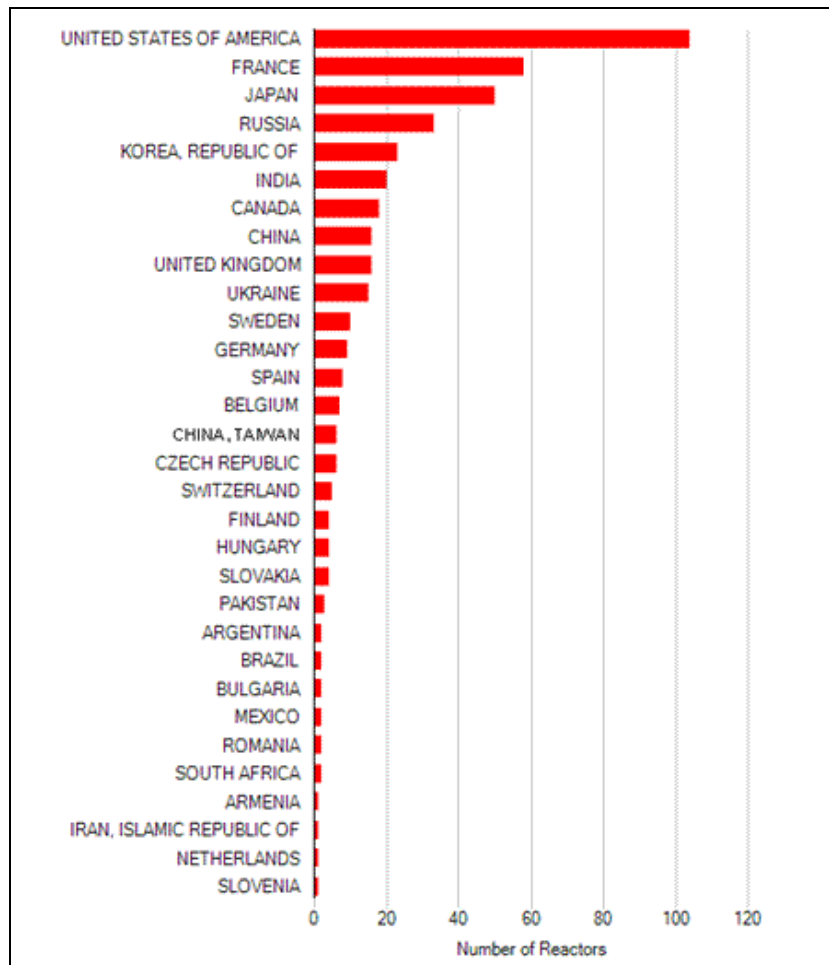
Τα πιο πρόσφατα στοιχεία δείχνουν πως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως στηρίζεται κατά κύριο λόγο στη χρήση κάρβουνου (40-45%) (διάγραμμα 1.1). Ακολουθεί το φυσικό αέριο με ποσοστό γύρω στο 20% που αυξήθηκε πολύ τα τελευταία χρόνια αντικαθιστώντας σε μεγάλο βαθμό το πετρέλαιο, η πυρηνική ενέργεια με 15-18% και τα υδροηλεκτρικά που συνεισφέρουν 12-16%. Η χρήση πετρελαίου είναι περίπου στο 3-5%, ενώ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. και άλλες μορφές είναι στο 4-5%.





Διάγραμμα 1.1: Μερίδιο πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως σήμερα

Σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία παρατηρούμε πως οι τρεις πρώτες σε ποσοστό και συνολικά οι τέσσερις από τις έξι βασικές πηγές συνδέονται με θερμικές διεργασίες. Αναφερόμαστε στα ορυκτά καύσιμα και στην πυρηνική ενέργεια. Οι θερμικοί σταθμοί τα χρησιμοποιούν για τη θέρμανση νερού με σκοπό την παραγωγή ατμού υψηλής ποιότητας. Ο ατμός εισέρχεται σε στρόβιλους προς εκτόνωση με αποτέλεσμα την παραγωγή έργου. Η μηχανική ενέργεια τελικά θα μετατραπεί σε ηλεκτρική με τη βοήθεια μαγνητών που κινούνται σε πηνίο. Όπως είναι φυσικό κατά τη διεργασία που περιγράφηκε παράγονται και μεγάλα ποσά θερμότητας, τα οποία όμως δεν εκμεταλλεύονται και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. **Οι θερμικοί σταθμοί είναι υπεύθυνοι για το 75 και πλέον τοις εκατό της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.** Μέρος αυτών είναι οι πυρηνικοί. Σήμερα λειτουργούν 439 ανά τον κόσμο με τους περισσότερους να βρίσκονται στην Αμερική (διάγραμμα 1.2).



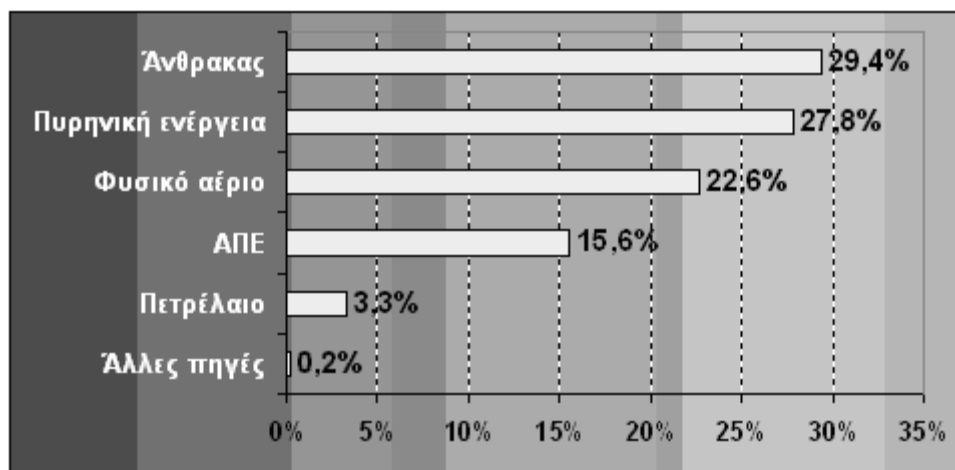
Διάγραμμα 1.2: Αριθμός πυρηνικών αντιδραστήρων σήμερα σε λειτουργία

Η διαδικασία της παραγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος που μόλις περιγράφηκε είναι ένα κομμάτι στο παζλ της υπάρχουσας κατάστασης, καθώς από μόνη δεν αρκεί ώστε να εξασφαλίσει τη χρήση του από τους καταναλωτές. Για να καταφέρουμε να τροφοδοτήσουμε τις ηλεκτρικές συσκευές μεσολαβούν κι' άλλα δύο βασικά στάδια η **μεταφορά** και η **διανομή**.

Πιο συγκεκριμένα μετά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας έπεται το στάδιο της μεταφοράς, όπου και πρέπει να διανύσει πολύ μεγάλες αποστάσεις σε καλώδια υψηλής τάσης ώστε να φτάσει σε υποσταθμούς που βρίσκονται πιο κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Στην τρίτη φάση της διανομής το ρεύμα διανύει μικρότερες αποστάσεις με καλώδια χαμηλότερης τάσης και τελικά φτάνει σε κάθε πελάτη-καταναλωτή. Σύμφωνα με αυτό μπορούμε να διαχωρίσουμε το δίκτυο σε περιοχές χαμηλής-μέσης-υψηλής τάσης. Ο υποβιβασμός της τάσης όσο πλησιάζουμε στο σημείο κατανάλωσης γίνεται με τους γνωστούς μετασχηματιστές. Το ηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζει δύο μορφές. Μπορεί να έχει σταθερή διεύθυνση, οπότε λέγεται συνεχές (direct current - DC), ή η διεύθυνση του να αντιστρέφεται συνεχώς, οπότε λέγεται εναλλασσόμενο (alternating current - AC). Κάθε μορφή έχει τα δικά της χαρακτηριστικά.

Από το 1882 που κατασκευάστηκαν οι πρώτοι σταθμοί παραγωγής δημόσιας χρήσης σε Λονδίνο και Νέα Υόρκη ξεκίνησε η αντιμαχία χρήσης εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά του. Οι δύο μορφές παρουσίαζαν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τελικά, επικράτησε το AC λόγω του χαμηλότερου κόστους και του ευκολότερου μετασχηματισμού του σε σχέση με το DC και έτσι μέχρι και σήμερα τα καλώδια μεταφοράς-διανομής του δικτύου διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Περνώντας και τις τρεις στάσεις της διαδρομής μπορούμε να εκτιμήσουμε το συνολικό βαθμό απόδοσης του κεντρικού δικτύου παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Από την παραγωγή μέχρι την κατανάλωση έχουμε απώλειες της τάξης του 65%, επομένως η αποδοτικότητα του δικτύου φτάνει μόλις το 35%.

Γυρνώντας πάλι στην παραγωγική διαδικασία βλέπουμε πως στην Ευρώπη τα πράγματα δεν είναι πολύ διαφορετικά καθώς ο λιγνίτης φαίνεται να κυριαρχεί και πάλι (διάγραμμα 1.3).



Διάγραμμα 1.3: Πηγές ηλεκτροπαραγωγής στην ΕΕ των 27 (2008)

Η Γαλλία στηρίζει το 78% της παραγωγής της στην πυρηνική ενέργεια, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και σε Βέλγιο (54.5%), Ουγγαρία (37.5%), στη Σουηδία (47%) και στην Ελβετία (43%). Από την άλλη το 2008 το 98,5% της παραγωγής της Νορβηγίας προήλθε από υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Χώρες όπως Αυστρία και Ελβετία, φαίνεται και αυτές να χρησιμοποιούν εκτενώς την ίδια μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ποσοστά της τάξης του 64% και 51% της εγχώριας παραγωγής τους αντίστοιχα. Έτσι προκύπτει το μεγάλο ποσοστό των Α.Π.Ε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

Στην Ελλάδα οι πρωτογενείς πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στο διάγραμμα 1.4:



*Διάγραμμα 1.4: Πηγές ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα (2008)*

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής καλύπτεται από το λιγνίτη, ενώ η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μόλις στο 3%. Η χρήση πετρελαίου έχει περιοριστεί στο 7% μετά την εισαγωγή του φυσικού αερίου (συμμετοχή 26%), το οποίο αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς. Η Ελλάδα είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Το ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας διακρίνεται στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα (Ε.Δ.Σ.) και στο Νησιωτικό Σύστημα. Το σύστημα μεταφοράς του Ε.Δ.Σ. απαρτίζεται από γραμμές μεταφοράς υψηλής (150kV) και υπερυψηλής (400 kV) τάσης. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται κυρίως από θερμικούς σταθμούς της Βόρειας Ελλάδας, όπου και υπάρχουν τα μεγαλύτερα αποθέματα λιγνίτη. Συνολικά η Περιφέρεια Δ. Μακεδονίας καλύπτει το 80% των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια της χώρας. Η συγκέντρωση της παραγωγής στο βορρά της χώρας δημιουργεί αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά στο υπόλοιπο μέρος της και ανισορροπία στη λειτουργία καθώς το ένα τρίτο της συνολικής παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται στην Αττική. Το νησιωτικό σύστημα αφορά σε ένα μεγάλο αριθμό νησιών στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους. Περιλαμβάνει αυτόνομα συστήματα βασισμένα σε πετρελαϊκές μονάδες με κύρια καύσιμα το μαζούτ και το ντίζελ. Οι χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες είναι κυρίως αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι. Από τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των 12.760 MW αυτή που αντιστοιχεί σε Α.Π.Ε. είναι περίπου 2500 MW (πίνακας 1.1).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

	<b>Αιολικά (MW)</b>	<b>Φ/Β (MW)</b>	<b>Μικρά Υδροηλεκτρικά (MW)</b>	<b>Βιοαέριο Βιομάζα (MW)</b>
<b>Εγκατεστημένη ισχύς</b>	1.636	724,18	205,33	44,5

*Πίνακας 1.1: Εγκατεστημένη ισχύς Α.Π.Ε. στην Ελλάδα σήμερα*

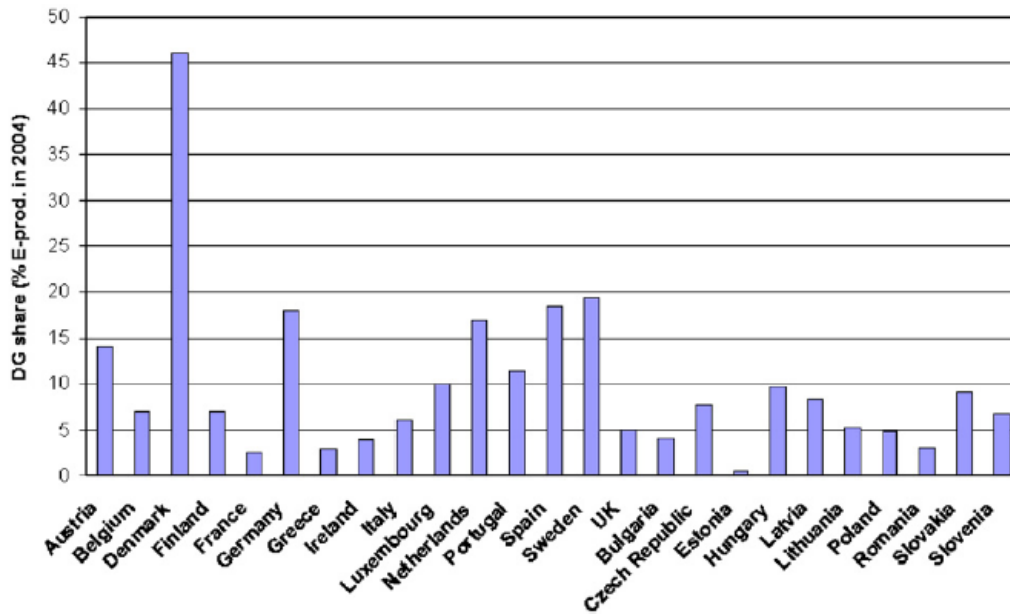
Παρατηρείται συνεχής αύξηση σε αυτό τον τομέα καθώς μόνο από τον Ιανουάριο του 2012 η ισχύς όλων των εν λειτουργία Α.Π.Ε. αυξήθηκε κατά 15% ως το τέλος του Ιουνίου, ενώ αναμένεται περαιτέρω διεύρυνση. Την κυρίαρχη θέση κατέχουν τα αιολικά με τα 2/3 του συνόλου. Ενώ, πολύ σημαντικό είναι το στοιχείο ότι η Ελλάδα καταλαμβάνει την όγδοη θέση παγκοσμίως στην εγκατεστημένη αιολική ισχύ σύμφωνα με στοιχεία του Global Wind Energy Council, με 151 MW ανά εκατομμύριο κατοίκων. Στον επόμενο πίνακα (πίνακας 1.2) παρουσιάζεται η πραγματική παραγωγή των Α.Π.Ε για τα δύο περασμένα έτη:

	<b>Αιολικά (GWh)</b>	<b>Φ/Β (GWh)</b>	<b>Μικρά Υδροηλεκτρικά (GWh)</b>	<b>Βιοαέριο Βιομάζα (GWh)</b>	<b>Μερίδιο επί του συνόλου</b>
<b>2010</b>	2.061	132	753	194	4,37%
<b>2011</b>	2.596	442	581	199	5,21%

*Πίνακας 1.2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. στην Ελλάδα*

Όσα αναφέρθησαν μέχρι τώρα εξετάζουν την παραγωγή ενέργειας από τη σκοπιά των πρωτογενών πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται. Μια διαφορετική ματιά στο ίδιο ζήτημα είναι το μερίδιο συνεισφοράς διεσπαρμένης και συμβατικής παραγωγής. Στο διάγραμμα 1.5 παρουσιάζεται η εισχώρηση των συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά το έτος 2004.

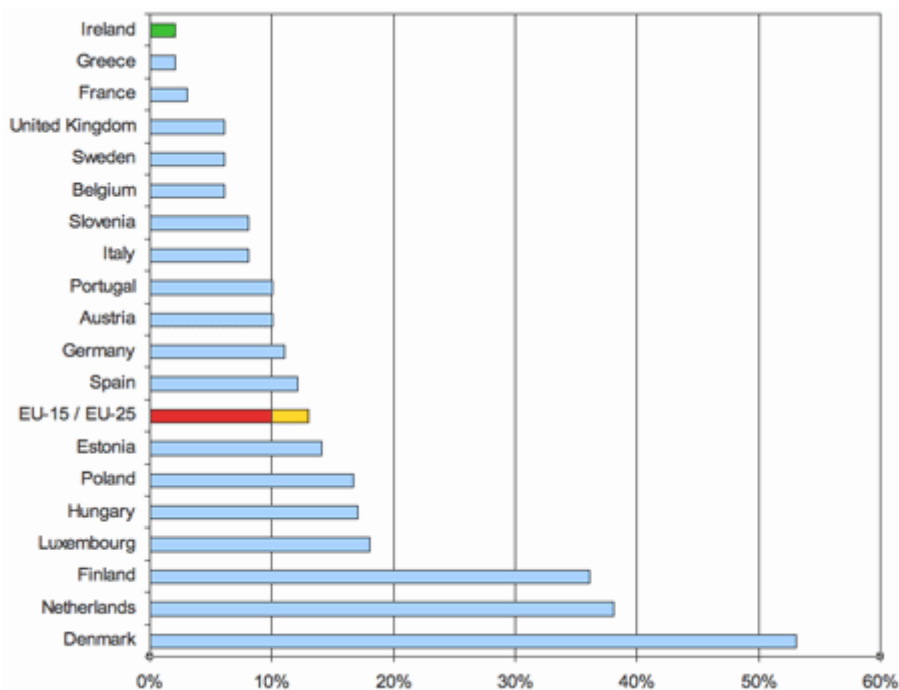
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ



*Διάγραμμα 1.5: Διεσπαρμένη παραγωγή στην ΕΕ των 25 (2004)*

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της διεσπαρμένης παραγωγής στην Ευρώπη φαίνεται από το διάγραμμα 1.5 πως κυρίαρχες χώρες είναι η Δανία που στηρίζει πάνω από το μισό της παραγωγής της, η Ολλανδία και η Φινλανδία. Η Ελλάδα το 2004 βρισκόταν στην τελευταία θέση μαζί με την Ιρλανδία.

Τέλος, στο διάγραμμα 1.6 βλέπουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη από τεχνολογίες συμπαραγωγής:



*Διάγραμμα 1.6: Συνεισφορά συμπαραγωγής σε χώρες της Ευρώπης*

Στην Ελλάδα το 2011 η συμπαραγωγή συνεισέφερε 141,636 MWh, με εγκατεστημένη ισχύ της τάξης των 89,07 MW και έχει παραμείνει σταθερή μέχρι και σήμερα.

Είναι γνωστό πως τα ορυκτά καύσιμα ανήκουν στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και όπως είδαμε από τα όσα αναφέρθησαν παραπάνω στηρίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα αποθέματά τους δεν είναι σε αφθονία και κάποια στιγμή θα τεθεί σημαντικό ενεργειακό ζήτημα. Όπως είναι φανερό λύση σε αυτό το πρόβλημα σκοπεύουν να δώσουν μέθοδοι παραγωγής που εκμεταλλεύονται τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά ταυτόχρονα και νέες τεχνολογίες που αξιοποιούν σε πολύ υψηλότερο βαθμό την αξία των συμβατικών καυσίμων σε σχέση με τις υπάρχουσες συμβατικές.

## **2. ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ**

Μέχρι στιγμής έχει περιγραφεί πως λειτουργεί το μοντέλο της συμβατικής παραγωγής. Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με ένα διαφορετικό τρόπο και τα χαρακτηριστικά του.

### *2.1 Εισαγωγή*

Διεσπαρμένη (Distributed Generation) ορίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας (τυπικά από 1 kW μέχρι 50-100 MW) και αναφέρεται στην εγκατάσταση ηλεκτρικών πηγών εντός ενός δικτύου διανομής ή στο ακραίο τμήμα αυτού στην πλευρά του καταναλωτή. Εναλλακτικά μπορούμε να συναντήσουμε τους όρους κατακεντρωμένη ή διανεμημένη παραγωγή.

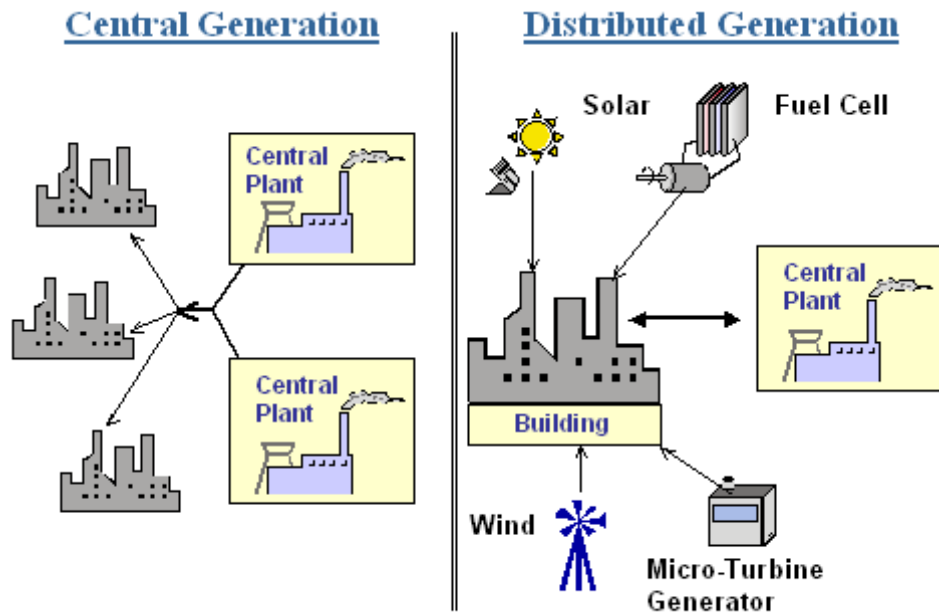
Οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται ανήκουν τόσο στην κατηγορία των ανανεώσιμων όσο και σε αυτή των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ενδεικτικά οι κυριότερες είναι:

- **Φωτοβολταϊκά συστήματα**
- **Ανεμογεννήτριες**
- **Γεωθερμία**
- **Μικρά υδροηλεκτρικά**
- **Βιομάζα**
- **Μικρο-συμπαγωγή**

Βλέπουμε πως 5 από τις 6 τεχνολογίες ανήκουν στις Α.Π.Ε. επομένως μπορούμε να αναλογιστούμε άμεσα τα περιβαλλοντικά οφέλη. Στη συμπαγωγή από την άλλη χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ορυκτά καύσιμα. Επειδή αποτελεί σημαντικό κομμάτι της διεσπαρμένης παραγωγής, με σημαντικές εφαρμογές και διάφορες τεχνολογίες, θα ασχοληθούμε εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται πως διαμορφώνονται τόσο η κεντρική όσο και η διεσπαρμένη παραγωγή.

Ο καθορισμός της παραγωγής ως διανεμημένη διαφέρει από κράτος σε κράτος λόγω της διαφορετικής νομοθεσίας. Σε γενικές γραμμές όμως υπάρχουν κάποια γενικά χαρακτηριστικά. Τα κυριότερα είναι ότι το σύστημα δεν σχεδιάζεται ούτε αναπτύσσεται κεντρικά από την εταιρία ηλεκτρισμού, είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο διανομής ανάλογα με το πώς ορίζεται για κάθε υπό μελέτη σύστημα και η ισχύς όλων των εγκατεστημένων μονάδων δεν υπερβαίνει τα 50-100 MW, αλλά συνήθως είναι της τάξης κάποιων εκατοντάδων kW.





Εικόνα 2.1: Κεντρική και διεσπαρμένη παραγωγή

Η διεσπαρμένη παραγωγή φαίνεται πως θα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο τα επόμενα χρόνια στη διαμόρφωση της ενεργειακής πολιτικής της Ευρώπης, ενισχύοντας το σχέδιο 20-20-20 της Ε.Ε. σύμφωνα με το οποίο τίθενται ενεργειακοί και κλιματικοί στόχοι για το έτος 2020. Συγκεκριμένα προβλέπεται:

- η μείωση κατά 20% των αερίων θερμοκηπίου από τα επίπεδα του 1990
- η βελτίωση κατά 20% της ενεργειακής αποδοτικότητας και
- η αύξηση κατά 20% της προσφοράς Α.Π.Ε.

Ταυτόχρονα παράγοντες όπως η ανάπτυξη τεχνολογικών καινοτομιών, οι περιορισμοί στη βελτίωση υπάρχοντων και κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς ενέργειας, οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιοπιστία στην παροχή ενέργειας και η αναμενόμενη απελευθέρωση της αγοράς προωθούν ακόμα περισσότερο τη χρήση συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής.

Η ανάγκη για την αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενέργειας είναι ίσως ισχυρότερη από κάθε άλλη προηγούμενη χρονική περίοδο. Η υπάρχουσα διάρθρωση του συστήματος έχει ως αποτέλεσμα μεγάλα ποσοστά ενέργειας να χάνονται και τελικά μόνο ένα μικρό μέρος από την αρχική καταναλισκόμενη να φτάνει στον καταναλωτή. Οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζονται σε παραγωγή, μεταφορά και μετατροπή. Πιο συγκεκριμένα ξεκινούν από το αρχικό κιόλας στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας, συνεχίζονται κατά τη μεταφορά στο δίκτυο AC και ολοκληρώνονται στο τελικό στάδιο με την μετατροπή για

συσκευές που λειτουργούν με DC. Η συνέπεια αυτών είναι τελικά να αξιοποιείται μόλις περίπου το 35% των πρωταρχικών πηγών ενέργειας. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να δοθεί αν εστιάσουμε στην πραγματική αιτία των απωλειών, που δεν είναι άλλη από την εγκατάσταση των σταθμών παραγωγής πολύ μακριά από το σημείο κατανάλωσης. Αν όμως φέρουμε την παραγωγή δίπλα στην κατανάλωση, τότε η διαχείριση της ενέργειας θα γίνει πολύ αποτελεσματικότερη. Όσον αφορά το πρόβλημα της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης αυτό μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση περισσότερων εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Όλα τα παραπάνω συναινούν στο πέρασμα της εποχής διεσπαρμένης παραγωγής.

### *2.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα*

Η διανεμημένη παραγωγή συνδέεται με πολλούς τομείς της ζωής μας και έτσι μπορεί να επηρεάσει σε διάφορα επίπεδα. Τα **πλεονεκτήματα** που μπορούν να προκύψουν από την εφαρμογή της είναι ενεργειακής, οικονομικής καθώς και περιβαλλοντικής φύσης. Τα κυριότερα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει μία ευρεία γκάμα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων που παρέχουν ισχύ μικρής κλίμακας, σε τοποθεσία κοντά στους χρήστες, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες στην αγορά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Η παραγωγή της ενέργειας κοντά στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται, ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος (πάνω από το 30%) του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού.
- Η τροφοδότηση των φορτίων από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, μειώνει σημαντικά τις απώλειες ισχύος στις γραμμές διανομής.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή βοηθά στην αποσυμφόρηση των ήδη υπάρχοντων δικτύων. Επιπρόσθετα, επιτρέπει τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε εφαρμογές συμπαραγωγής, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος.
- Όσο αυξάνεται η ζήτηση για περισσότερη και καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ, η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει εναλλακτικές λύσεις για αξιόπιστη και οικονομική παροχή σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις. Μπορεί να εξασφαλίσει στους πελάτες ότι η παροχή είναι συνεχόμενη και αξιόπιστη,

αποκαθιστώντας την ηλεκτρική ενέργεια σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, σε περιπτώσεις διακοπής της ρευματοδότησης.

- Η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές θερμικών φορτίων, μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής, καθώς επίσης και σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε φτηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα στο φυσικό αέριο. Επιπλέον, προσφέρει πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής που ζούνε και μπορούν να αξιοποιήσουν τις ανανεώσιμες πηγές.
- Η εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βοηθάει στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και σε επιβλαβείς εκπομπές όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.
- Είναι πρακτικά πιο εύκολο να βρεθούν τοποθεσίες για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες διεσπαρμένες παραγωγές από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.
- Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών, αλλά και άλλων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, εκτός από την υψηλότερη απόδοση ενέργειας αποφέρει μείωση στις εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την άλλη μεριά τα μειονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής, είναι:

- Το σχετικά **υψηλό κόστος** κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής. Επιπλέον, διαφορές υπάρχουν και στα κόστη κεφαλαίου για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής που μπορούν να ποικίλλουν από 1000 €/kW έως 20000 €/kW.
- Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τα αιολικά πάρκα. Πρέπει να γίνεται **μετεωρολογική πρόβλεψη**, που δεν μπορεί όμως να προβλέψει ακριβώς την ποσότητα ισχύος που θα είναι δυνατό να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και

απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών, όπως είναι για παράδειγμα ο άνεμος. Έτσι υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, η διείσδυση είναι δηλαδή περιορισμένη και πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

- Η αυξανόμενη συμμετοχή της διεσπαρμένης παραγωγής στην εγκατεστημένη παραγωγή θα επιφέρει μικρότερες δυνατότητες επιλογής μεταξύ των βασικών καυσίμων. Αυτό θα μπορούσε να αποβεί σε βάρος κάποιων πρωτογενών αποθεμάτων ενέργειας. Δεδομένου ότι οι περισσότερες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται πρωταρχικά στο φυσικό αέριο, αναμένεται έντονα αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό.
- Το κόστος για την παροχή πρωτογενούς καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή, προβλέπεται να είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- Η μη μελετημένη ή ανεξέλεγκτη διείσδυση μονάδων διανεμημένης παραγωγής μπορεί να προκαλέσει τεχνικά προβλήματα και να δημιουργήσει διαταραχές στην ομαλή λειτουργία του δικτύου. Παρά το γεγονός ότι μπορούν να επηρεάσουν θετικά την ποιότητα ισχύος, ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί και το αντίστροφο. Ο μεγάλος αριθμός μονάδων παραγωγής μπορεί να προκαλέσει, εκτός από τη συνήθη ροή φορτίου από τη υψηλή τάση στη χαμηλή, επιπλέον ροή φορτίου, από την χαμηλή τάση στο δίκτυο υψηλότερης τάσης. Αυτή η αμφίδρομη ροή φορτίου, απαιτεί διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης. Επιπλέον, η σημαντική προσαρμοστικότητα που προσφέρουν οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, προϋποθέτει καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη προσοχή, όσον αφορά τη διαχείριση και λειτουργία του δικτύου.
- Όσον αφορά στις επιπτώσεις της διανεμημένης παραγωγής στο περιβάλλον γενικά οι τεχνολογίες κατανεμημένης παραγωγής περιγράφονται ως περιβαλλοντικά φιλικές σε σχέση με τις αντίστοιχες τεχνολογίες ενός κεντρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση όμως των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς για κάθε τεχνολογία παραγωγής υπάρχουν έμμεσες και άμεσες εκπομπές ρύπων. Οι έμμεσες εκπομπές είναι εκπομπές ρύπων κατά τη διαδικασία κατασκευής της μονάδας, αναζήτησης και μεταφοράς των πηγών ενέργειας. Κάποιοι πιστεύουν πως η μεγάλη διείσδυση και χρήση σταθμών κατανεμημένης παραγωγής θα έχει ως αποτέλεσμα την υπολειτουργία των μεγάλων κεντρικών σταθμών

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να αυξηθούν οι εκπομπές ανά παραγόμενη κιλοβατώρα. Άλλα στοιχεία τα οποία κάνουν δύσκολη την ενιαία περιβαλλοντική εκτίμηση, είναι οι διαφορετικές απόψεις που διατυπώνονται σε διάφορα σχετικά θέματα όπως για παράδειγμα, την επικινδυνότητα των πυρηνικών σταθμών, ή την υψηλή στάθμη θορύβου και την οπτική ρύπανση που μπορεί να προκαλεί μια ανεμογεννήτρια.

### **3. ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ**

#### *3.1 Εισαγωγή*

Με τον όρο συμπαραγωγή (Cogeneration ή Combined Heat and Power) αναφερόμαστε στη συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Οι μονάδες CHP έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά ταυτόχρονα εκμεταλλεύονται και τη θερμότητα που αποβάλλεται, η οποία αξιοποιείται ως ζεστό νερό. Αποτελεί μια αποδοτική ενεργειακά και οικονομικά μέθοδο. Με τη διαδικασία της συμπαραγωγής λοιπόν μειώνεται σημαντικά η συνολική κατανάλωση καυσίμου και τα ποσοστά εκπομπών καυσαερίων με συνέπεια να αποσπώνται τεράστια περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Μία μονάδα συμπαραγωγής αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Τον κινητήρα ο οποίος είναι η καρδιά του συστήματος και είναι υπεύθυνος για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Εκμεταλλεύεται την ενέργεια ενός καυσίμου για την παραγωγή έργου.
- Τη γεννήτρια η οποία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική κινώντας μαγνήτες μέσα σε πηνίο.
- Το σύστημα ανάκτησης θερμικής ενέργειας (εναλλάκτες θερμότητας) που περιβάλλει τον κινητήρα και ανακτά την παραγόμενη θερμότητα από τη λειτουργία του.

Να σημειωθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού δεν γίνεται πάντα από σύστημα κινητήρα-γεννήτριας. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται κελιά καυσίμου η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι άμεση. Αυτή η τεχνολογία όπως και όλα όσα αναφέρθησαν παραπάνω θα αναλυθούν εκτενώς σε επόμενες ενότητες.

Εγκατάσταση και λειτουργία CHP μπορεί να γίνει οπουδήποτε υπάρχει ανάγκη ηλεκτρισμού και θερμού νερού. Από μικρής κλίμακας εφαρμογές όπως πολυκατοικίες, σπίτια και γενικά απλά νοικοκυριά μέχρι και ολόκληρα κτιριακά συγκροτήματα όπως ξενοδοχειακές μονάδες, νοσοκομεία και εστίες πανεπιστημίων. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής είναι ανεξάρτητος της κλίμακας του σταθμού κι έτσι μπορεί να εφαρμοστεί σε τοπική κλίμακα, για να καλύψει τις ανάγκες συγκεκριμένων φορτίων. Οι κυριότεροι τομείς ευρείας εφαρμογής της συμπαραγωγής είναι ο βιομηχανικός, ο εμπορικός-κτιριακός και ο αγροτικός. Η επιλογή του μέγεθος της μονάδας που κατ'επέκταση

καθορίζει τις δυνατότητές της, γίνεται βέβαια ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες.

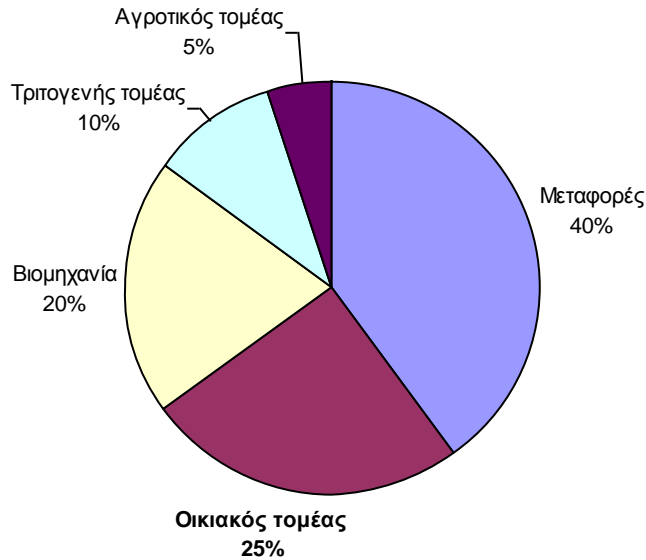
### *3.2 Εφαρμογή στον οικιακό τομέα*

Το γεγονός ότι έχουμε και ταυτόχρονη παραγωγή θερμού νερού είναι αυτό που την ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής και γι'αυτό γίνεται προσπάθεια να μπει στον οικιακό ενεργειακό τομέα. Σε αντίθεση με τα δεδομένα του παραδοσιακού ενεργειακού συστήματος όπου η κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων υλοποιούνται ως διακριτές διαδικασίες, με τη συμπαραγωγή μπορούμε να πραγματοποιήσουμε τον συγκερασμό τους. Όταν μιλάμε για συμπαραγωγή στον οικιακό τομέα αναφερόμαστε σε μονάδες **μικροσυμπαραγωγής** (micro-CHP ή μ-CHP) με μέγεθος αντίστοιχο των καυστήρων ή και μικρότερο που υπάρχουν σήμερα στις πολυκατοικίες. Μία τέτοια μονάδα θα μπορούμε να βοηθήσει στην κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρισμό αλλά και ταυτόχρονα στην κάλυψη αναγκών σε ζεστό νερό και θέρμανσης χώρου. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από το CHP μαζί με αυτό που προέρχεται από το δίκτυο τροφοδοτούν όλες τις ηλεκτρικές συσκευές. Η ζήτηση σε ζεστό νερό ικανοποιείται άμεσα, ενώ η θέρμανση μπορεί να γίνει με αέρα που θα κυκλοφορεί στο χώρο ο οποίος πρώτα θα έρχεται σε επαφή με το ζεστό νερό είτε με κάποια επιδαπέδια εγκατάσταση. Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα εκμετάλλευσης της παραγόμενης θερμότητας και για την ψύξη χώρων. Για να γίνει αυτό πρέπει το θερμό νερό να περάσει από μονάδα απορρόφησης ψύξης (absorption chiller) που έχει ως προϊόν κρύο νερό. Στους ψύκτες απορρόφησης θερμαίνονται δύο ουσίες (ψυκτικό μέσο και μέσο απορρόφησης) που βρίσκονται σε θερμική ισορροπία μέχρι να διαχωριστούν. Στη συνέχεια επανενώνονται με ταυτόχρονη απορρόφηση ενέργειας με αποτέλεσμα την παραγωγή κρύου νερού. Ο συνδυασμός νερού (ψυκτικό μέσο) και άλατος LiBr (μέσο απορρόφησης) χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψυχρού νερού σε θερμοκρασίες 6-12°C. Ο συνδυασμός αμμωνίας (ψυκτικό μέσο) και νερού (μέσο απορρόφησης) χρησιμοποιείται για την παραγωγή πολύ χαμηλών θερμοκρασιών (μέχρι -60°C). Επομένως, τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον κλιματισμό χώρων αλλά και για ψυκτικούς θαλάμους. Μία τέτοια μονάδα ονομάζεται CCHP (Combined Cooling Heat and Power) και πλέον περνάμε στο κομμάτι της **τριπαραγωγής** (trigeneration).

Σε κάθε χώρα ο οικιακός τομέας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα το ποσοστό αυτό είναι της τάξης του 25% (διάγραμμα 3.1). Ένας αποτελεσματικός

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

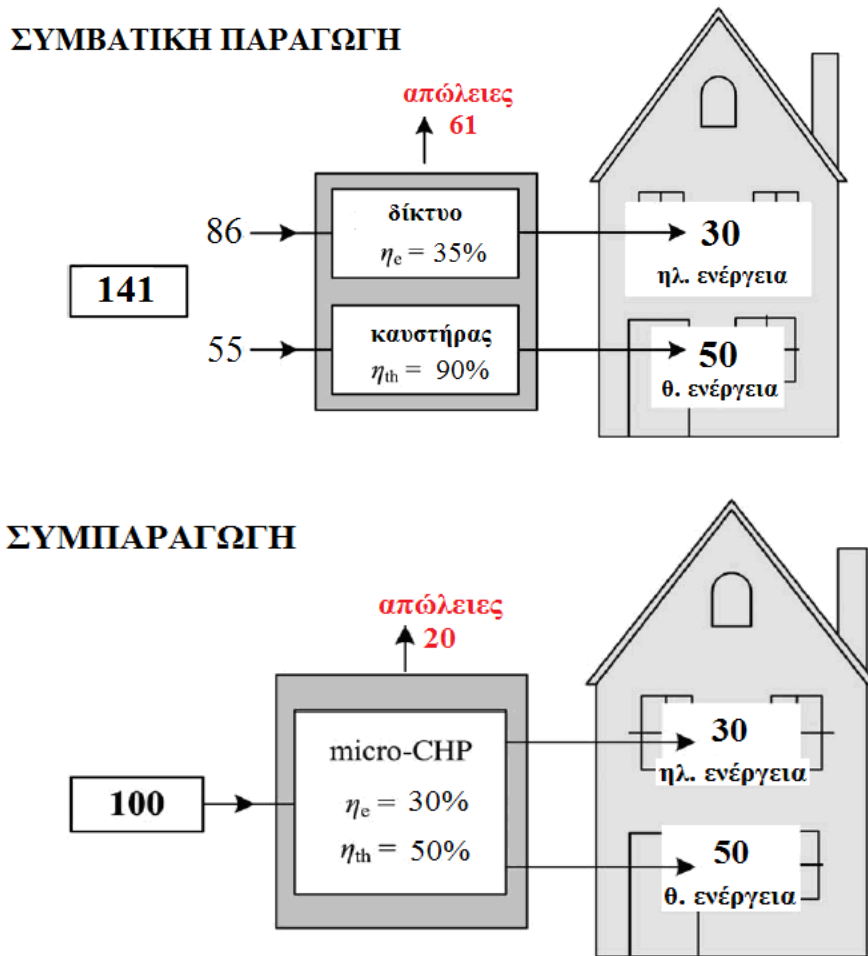
τρόπος για να μειώσουμε την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των νοικοκυριών από το δίκτυο είναι η εγκατάσταση συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής.



*Διάγραμμα 3.1: Κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά τομέα στην Ελλάδα*

Για να γίνει κατανοητό πως μπορεί να συνεισφέρει η συμπαραγωγή στον οικιακό τομέα θα αναφερθούμε σε ένα παράδειγμα εφαρμογής σαν και αυτό που φαίνεται στην εικόνα 3.1. Ας θεωρήσουμε ένα απλό νοικοκυριό που χρειάζεται 50 μονάδες θερμικής ενέργειας και 30 ηλεκτρικής. Υποθέτουμε πως διαθέτει ένα καυστήρα με βαθμό απόδοσης 90% και ότι από το δίκτυο ηλεκτρισμού έχουμε μία συνολική αποδοτικότητα της τάξης του 35%. Αυτό σημαίνει πως στην πραγματικότητα καταναλώνει 141 μονάδες ενέργειας για να καλύψει τις ανάγκες του. Το εναλλακτικό σενάριο είναι να εγκαταστήσουμε μία τυπική μονάδα CHP με 30% ηλεκτρική και 50% θερμική αποδοτικότητα. Σε αυτή την περίπτωση 100 μονάδες αρκούν. Βλέπουμε δηλαδή πως με τη συμπαραγωγή έχουμε άμεσα αυξημένη αποδοτικότητα και μεγαλύτερη οικονομία.





Εικόνα 3.1: Η συμπαραγωγή στον οικιακό τομέα

Στο πρώτο σενάριο έχουμε συνολική αποδοτικότητα 57%, ενώ στο δεύτερο 80%. Έτσι μπορούμε να μειώσουμε τις απώλειες από 61 μονάδες ενέργειας σε 20 και τις αρχικές 141 μονάδες κατανάλωσης σε 100. Χάρη στην έρευνα και την ανάπτυξη οι δυνατότητες των γεννητριών συμπαραγωγής συνεχώς αυξάνονται και μπορούμε να φτάσουμε σε αποδοτικότητες έως ακόμα και 90-95%. Αποτέλεσμα είναι η ακόμα αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενέργειας.

### 3.3 Χαρακτηριστικοί δείκτες ενεργειακής συμπεριφοράς

Η αποδοτικότητα των μονάδων συμπαραγωγής μετριέται ως το πηλίκο της παραγόμενης ενέργειας προς την κατανάλωση καυσίμου. Διακρίνουμε δύο όρους αποδοτικότητας:

- Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης:  $n_e = \frac{P}{F}$
- Θερμικός βαθμός απόδοσης:  $n_h = \frac{Q}{F}$ , όπου

P = η ωφέλιμη παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια (kWh)

Q = η ωφέλιμη παραχθείσα θερμική ενέργεια (kWh)

F = το καταναλωθέν καύσιμο (kWh).

Φυσικά η συνολική αποδοτικότητα είναι:

$$n_{\text{tot}} = n_e + n_h = \frac{P + Q}{F}$$

Τυπικά, ένα απλό CHP μπορούμε να πούμε ότι έχει  $n_e = 25-35\%$  και  $n_{\text{tot}} = 75-85\%$ .

Το χαρακτηριστικότερο ίσως μέγεθος ενός CHP το **heat to power ratio** (HPR). Προκύπτει από τη διαίρεση του θερμικού προς τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης και ορίζεται ως το πηλίκο ωφέλιμης παραγόμενης θερμικής προς παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

$$\text{HPR} = \frac{Q}{P}$$

Το ίδιο μέγεθος μπορεί να εμφανιστεί και ως power to heat ratio (PHR). Μας δίνει την ίδια πληροφορία απλά με διαφορετικό τρόπο. Το σημαντικό είναι να υπάρχει ευελιξία έναντι μιας σταθερής τιμής αναλογίας για τη μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα σε διαφορετικού τύπου εφαρμογές. Οι κυριότεροι τρόποι λειτουργίας ενός συστήματος συμπαραγωγής, δηλαδή οι τρόποι ρυθμίσεως της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή, είναι οι ακόλουθοι:

- **Παραγωγή θερμότητας ίσης με το θερμικό φορτίο (Heat match).** Η παραγωγή του CHP ρυθμίζεται ώστε να ικανοποιεί ακριβώς τις θερμικές ανάγκες. Στην περίπτωση που έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περίσσεια πωλείται στο δίκτυο, ενώ στην περίπτωση ελλειμματικής παραγωγής αγοράζεται.
- **Παραγωγή ηλεκτρισμού ίσου με το ηλεκτρικό φορτίο (Electricity match).** Η παραγωγή του CHP ρυθμίζεται ώστε να ικανοποιεί ακριβώς τις ανάγκες ηλεκτρισμού. Εάν προκύψει ανάγκη σε θερμό φορτίο χρησιμοποιείται βοηθητικός καυστήρας, ενώ η περίσσεια θερμότητα αποβάλλεται σε ψυγεία.
- **Μικτός τρόπος.** Η παραγωγή του CHP ρυθμίζεται με παρακολούθηση άλλοτε του θερμικού και άλλοτε του ηλεκτρικού φορτίου.
- **Πλήρης κάλυψη του θερμικού και του ηλεκτρικού φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή.** Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί μεγάλη

επάρκεια εφεδρικής ισχύος και επομένως περίπλοκο σύστημα συμπαραγωγής. Συνεπώς, είναι η πιο ακριβή λύση, τουλάχιστον από πλευράς αρχικού επενδυτικού κόστους.

Κατά κανόνα, ο πρώτος τρόπος προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή και οικονομική απόδοση για συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής. Η τελική, όμως, επιλογή του τρόπου λειτουργίας εξαρτάται από τις ανάγκες του δικτύου, τις διαθέσιμες μονάδες καθώς και τις υποχρεώσεις απέναντι στους καταναλωτές.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μιας γεννήτριας συμπαραγωγής εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Αυτοί μπορεί να είναι κατασκευαστικής είτε λειτουργικής φύσης. Έτσι ρόλο παίζουν τόσο ο τύπος της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται και το είδος του καυσίμου με το οποίο τροφοδοτείται, όσο και ο τρόπος και οι συνθήκες λειτουργίας. Το heat to power ratio συμμετέχει κι' αυτό στη διαμόρφωση της ολικής αποδοτικότητας.

#### *3.4 Τεχνολογίες συμπαραγωγής για εφαρμογή στον οικιακό τομέα*

Τα συστήματα που είτε χρησιμοποιούνται είτε έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως γεννήτριες συμπαραγωγής σε εφαρμογές στον οικιακό τομέα είναι:

- **Εμβολοφόρες μηχανές**
- **Μικροτουρμπίνες**
- **Κελιά καυσίμου**
- **Μηχανές τύπου Stirling**

Σε αυτά τα συστήματα και στην τεχνολογία που τα συνοδεύει θα αναφερθούμε στις ενότητες που ακολουθούν. Τα στοιχεία που ενδιαφέρουν περισσότερο όσον αφορά εφαρμογές οικιακού τύπου είναι φυσικά η ισχύς και το κόστος της μονάδας, αλλά και τα επίπεδα θορύβου, η απαιτούμενη συχνότητα συντήρησης, η ευελιξία στην επιλογή καυσίμου λειτουργίας, οι εκπομπές ρύπων και η συμβατότητα του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος με αυτό του δικτύου.

### *3.4.1 Εμβολοφόρες μηχανές*

Πρόκειται για τις γνωστές μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) που λειτουργούν με την παλινδρομική κίνηση ενός εμβόλου. Είναι ο κλασικός τύπος μηχανής που χρησιμοποιείται στα οχήματα. Είναι ιδανικές για εφαρμογές μικρής κλίμακας λόγω του αποδεδειγμένα μεγάλου τεχνογνωστικού επιπέδου που έχουν. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο ανάφλεξης του καυσίμου:

- μηχανές καύσεως (κύκλο του Diesel)
- μηχανές εκρήξεως (κύκλο του Otto)

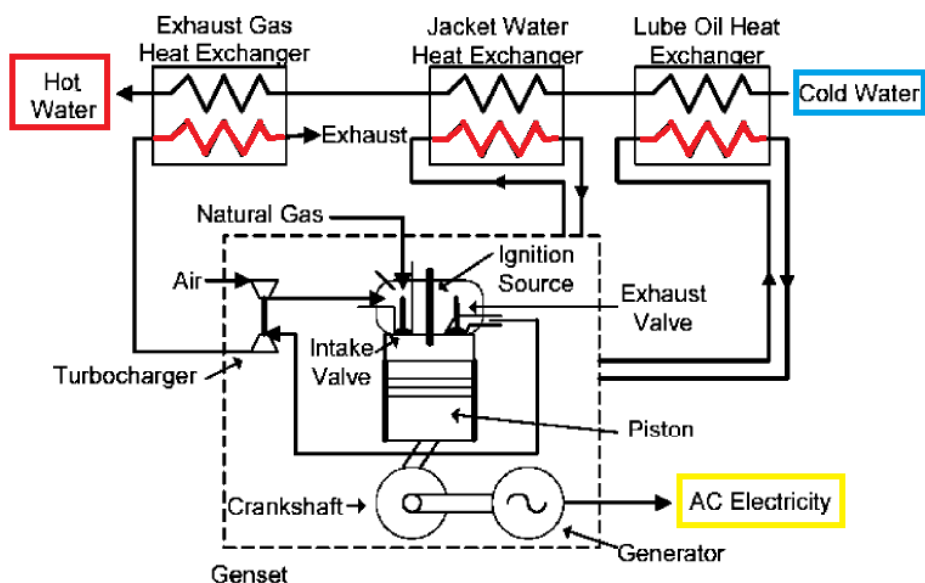
Στην πρώτη κατηγορία έχουμε αυτανάφλεξη του καυσίμου (compression ignition – CI), ενώ στη δεύτερη έχουμε ανάφλεξη με σπινθήρα (spark ignition – SI). Υπάρχουν και οι μηχανές μικτού τύπου που λειτουργούν και με τα δύο κύκλα.

Μονάδες Μ.Ε.Κ. για συμπαραγωγή είναι διαθέσιμες από κάποια kW μέχρι και πάνω από 10 MW. Σήμερα κατασκευάζονται μονάδες που μπορούν να αποδώσουν 1 kW ηλεκτρικής ενέργειας και 3 kW θερμικής, σε μέγεθος τέτοιο ώστε να αποτελούν ιδανική λύση για οικιακή εφαρμογή. Οι SI μπορούν να λειτουργήσουν με διάφορα καύσιμα όπως προπάνιο, βενζίνη, βιοαέριο (από αποσύνθεση αποβλήτων) αλλά συνήθως επιλέγεται το φυσικό αέριο. Από την άλλη οι CI λειτουργούν με καύσιμο ντίζελ και συνήθως προορίζονται για μεγαλύτερες εφαρμογές. Η ανάκτηση θερμότητας μπορεί να παράγει θερμό νερό θερμοκρασίας έως 85°C για τις CI και έως 160°C για τις SI. Η ηλεκτρική αποδοτικότητα στις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης κυμαίνεται από 25% μέχρι και 45% και αυξάνει αναλογικά με το μέγεθος τους. Κατά κανόνα οι CI είναι αποδοτικότερες σε σχέση με τις SI λόγω ότι μπορούν να επιτύχουν υψηλές σχέσεις συμπίεσης και αυτό γίνεται πιο εμφανές στα μικρότερα μεγέθη μηχανών. Τέτοιου τύπου κινητήρες ισχύος μικρότερης των 500kW κοστίζουν από 800 έως 1300 δολάρια ανά kW. Η τιμή ακολουθεί αντιστρόφως ανάλογη πορεία σε σχέση με το μέγεθος της μονάδας. Κάτι τέτοιο ισχύει και για τις υπόλοιπες γεννήτριες συμπαραγωγής.

#### Αρχή λειτουργίας

Στην ενότητα αυτή θα περιοριστούμε μόνο στις πληροφορίες που χρειαζόμαστε ώστε να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά τέτοιων μηχανών σε εφαρμογές συμπαραγωγής καθώς δεν κρίνεται απαραίτητο να μελετήσουμε αναλυτικά τη λειτουργία τους.

Ατμοσφαιρικός αέρας και καύσιμο εισέρχονται στο θάλαμο καύσης του κινητήρα. Τα δύο αυτά στοιχεία δημιουργούν ένα εκρηκτικό μίγμα που αναφλέγεται. Τα παραγόμενα αέρια από τη διεργασία της καύσης ωθούν προς τα κάτω το έμβολο. Στη συνέχεια το έμβολο θα κινηθεί προς τα πάνω και μετά πάλι προς τα κάτω και έτσι προκύπτει αυτή η παλινδρομική κίνηση. Το έμβολο μεταδίδει την κίνηση του στο συνδεδεμένο σύστημα στροφάλου-διωστήρα όπου έχουμε την παραγωγή έργου. Η μηχανική ενέργεια με τη βοήθεια μαγνητών μέσα σε ένα πηνίο θα μετατραπεί σε ηλεκτρική. Με άλλα λόγια έχουμε την παραγωγή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος (alternating current – AC). Σε υψηλές ταχύτητες μπορούν να φτάσουν και τις 3600 στροφές το λεπτό. Για την αύξηση της ισχύος μιας μονάδας, αντίστοιχα όπως και στα οχήματα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στροβιλοσυμπιεστής (turbocharger). Ο στροβιλοσυμπιεστής εισάγει συμπιεσμένο αέρα στον κύλινδρο, και έτσι επιτυγχάνεται η είσοδος μεγαλύτερης μάζας αέρα στον συγκεκριμένο όγκο, με την καύση να γίνεται πολύ πιο αποτελεσματικά. Κάτι τέτοιο αυξάνει τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης αλλά μπορεί να μειώσει τη ζωή του κινητήρα καθώς λειτουργεί σε επιβαρυνμένες συνθήκες. Όπως είναι φυσικό από τη διεργασία αυτή παράγεται και θερμότητα η οποία δεν μένει αναξιοποίητη. Ο κινητήρας εξωτερικά περιβάλλεται από ένα σύστημα ψύξης που κυκλοφορεί νερό το οποίο λειτουργεί ως αποθηκευτικό μέσο της θερμικής ενέργειας που παράχθηκε αλλά ταυτόχρονα και ως ψυκτικό για την αποφυγή υπερθέρμανσης του κινητήρα. Έτσι με έναν απλό εναλλάκτη θερμότητας μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ενέργεια που σε διαφορετική περίπτωση θα απελευθερωνόταν στο περιβάλλον. Η λειτουργία μιας εμβολοφόρου μηχανής για την ανάκτηση θερμότητας φαίνεται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Λειτουργία εμβολοφόρου μηχανής για την ανάκτηση θερμότητας

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης που βρίσκουν εφαρμογές στη συμπαραγωγή χρειάζονται μια τυπική συντήρηση. Εκτιμάται ότι μετά από 500-2000 ώρες λειτουργίας απαιτείται αλλαγή στα λάδια της μηχανής, ενώ ολική συντήρηση γίνεται μετά από 24000-30000 ώρες συνολικής λειτουργίας.

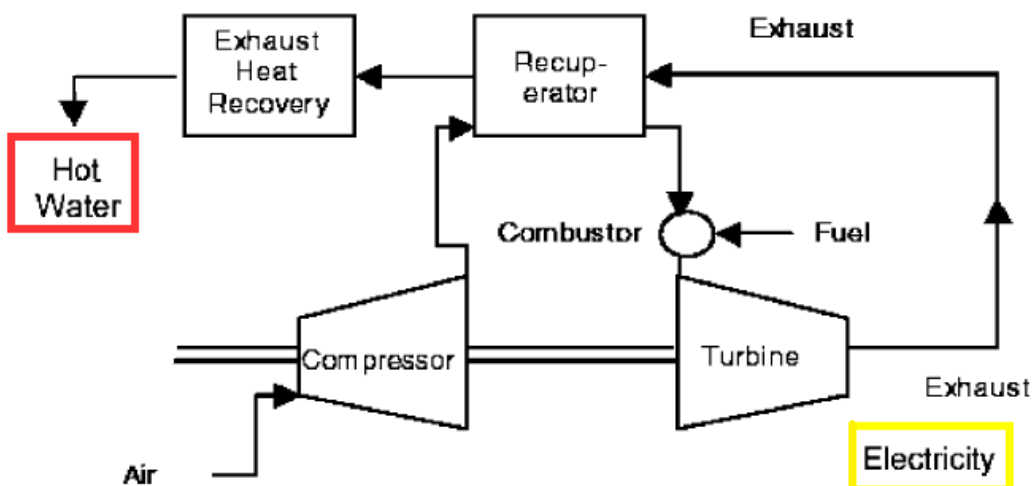
Οι εκπομπές καυσαερίων εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται αλλά και από παράγοντες όπως μέγεθος μονάδας, επίπεδο λειτουργίας, στοιχειομετρία καύσης. Τα πολλά χρόνια ερευνών και ανάπτυξης στις Μ.Ε.Κ. έχουν μειώσει κατά πολύ τα επίπεδα εκπομπών και τα έχουν προσαρμόσει στα σημερινά επιτρεπτά όρια. Οι κυριότεροι αέριοι ρύποι που συνδέονται με τέτοιου τύπου μηχανές συμπαραγωγής είναι οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και πτητικές οργανικές ουσίες (VOC's). Όπως και σε ένα αυτοκίνητο έτσι και στην περίπτωση χρήσης των κινητήρων για συμπαραγωγή, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής καταλυτικού μετατροπέα για ακόμα μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών.

#### *3.4.2 Μικροτουρμπίνες*

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές εκδοχές των αεριοστρόβιλων (τουρμπίνες) που αποτελούν τη δεύτερη μεγάλη κατηγορία των μηχανών εσωτερικής καύσης. Έχουν ηλεκτρική αποδοτικότητα γύρω στο 30%, δυνατότητα λειτουργίας με πληθώρα καυσίμων (φυσικό αέριο, βιοαέριο, ντίζελ κ.α.), μικρό επίπεδο εκπομπών και απαιτούν λίγη συντήρηση. Οι υπάρχουσες μεγάλες μονάδες αποδίδουν ισχύ που κυμαίνεται από 25 έως 80 kW. Στόχος είναι η διοχέτευση στην αγορά μικρότερων μονάδων (1-10 kW) με συνολική αποδοτικότητα 80% που θα είναι καταλληλότερες για απλές οικιακές εφαρμογές. Αυτά τα συστήματα συμπαραγωγής παρουσιάζουν μία σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τις εμβολοφόρες μηχανές. Έχουν μικρότερο μέγεθος άρα και μικρότερο βάρος, παράγουν μικρότερα επίπεδα θορύβου και διαθέτουν πολύ λιγότερα κινητά μηχανικά μέρη πράγμα που τα καθιστά ανθεκτικότερα. Επίσης, σε συνθήκες υψηλής λειτουργίας έχουν και μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Άλλα χαρακτηριστικά τους είναι πως έχουν σχετικά μικρό κόστος αρχικής εγκατάστασης, χαμηλά επίπεδα εκπομπής καυσαερίων, πολύ υψηλές ταχύτητες της τάξης των 60.000 – 12.000 rpm και ταυτόχρονα υψηλή αξιοπιστία.

Αρχή λειτουργίας

Το ιδανικό κύκλο λειτουργίας ενός αεροστρόβιλου ονομάζεται Brayton ή Joule. Η θερμοδυναμική διαδικασία των μικροτουρμπίνων ξεκινά με τη συμπίεση του εισερχόμενου ατμοσφαιρικού αέρα με τη χρήση ενός συμπιεστήρα (compressor). Στη συνέχεια ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης αναμιγνύεται με το καύσιμο το οποίο βρίσκεται υπό μορφή σταγονιδίων και προκαλείται ανάφλεξη. Τα παραγόμενα αέρια εκτονώνονται στον στρόβιλο (τουρμπίνα) και οδηγούν στην παραγωγή έργου. Συμπιεστήρας και στρόβιλος είναι συνδεδεμένοι με τον ίδιο άξονα. Επομένως, μέρος του παραγόμενου έργου χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του συμπιεστήρα και το υπόλοιπο για την παραγωγή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Πολύ σημαντικό ρόλο στην αύξηση της αποδοτικότητας παίζει ένας εναλλάκτης θερμότητας (**recuperator**) από φύλλα μετάλλου (ή κεραμικά για πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας) χάρη στον οποίο μπορούμε να πάρουμε περισσότερη ωφέλιμη ενέργεια με την ίδια ποσότητα καυσίμου. Με την προσθήκη του εναλλάκτη εκμεταλλευόμαστε τη θερμική ενέργεια των καυσαερίων προθερμαίνοντας τον συμπιεσμένο αέρα πριν αυτός εισέλθει στον θάλαμο καύσης. Η προθέρμανση του αέρα, μειώνει την ποσότητα των απαιτούμενων καυσίμων για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στην είσοδο του στροβίλου. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η ηλεκτρική αποδοτικότητα στο 40%. Η λειτουργία μιας μικροτουρμπίνας για την ανάκτηση θερμότητας φαίνεται στην εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Λειτουργία μικροτουρμπίνας για την ανάκτηση θερμότητας

### 3.4.3 Κελιά καυσίμου

Τα κελιά καυσίμου, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνοντας κυρίως υδρογόνο το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά με ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας και νερού. Μπορούν να λειτουργήσουν και με φυσικό αέριο, όμως το μέγιστο της αποδοτικότητας τους (έως και 85-90%) επιτυγχάνεται με καύσιμο το υδρογόνο. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από φυσικό αέριο, προπάνιο, κάρβουνο αλλά και με ηλεκτρόλυση νερού. Στην περίπτωση που παράγεται με ηλεκτρόλυση και με τη βοήθεια Α.Π.Ε. τότε η εγκατάσταση συνολικά μπορεί να χαρακτηριστεί ως εγκατάσταση Α.Π.Ε. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ιδιότητά τους να μετατρέπουν απευθείας τη χημική ενέργεια σε συνεχές ρεύμα (direct current – DC) σε πολύ υψηλά ποσοστά απόδοσης, υψηλότερα από οποιοδήποτε άλλο θερμομηχανικό σύστημα. Κάποια άλλα από τα πλεονεκτήματά τους είναι τα πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου, μικρή ανάγκη συντήρησης και πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων. Όταν λειτουργούν με υδρογόνο οι εκπομπές είναι μηδενικές, ενώ και στην περίπτωση του φυσικού αερίου οι εκπομπές είναι κατά πολύ μικρότερες από όλες τις άλλες μεθόδους. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν λαμβάνει χώρα αντίδραση καύσης. Μειονεκτήματα αποτελούν το υψηλό κόστος καθώς και ο μικρός χρόνος ζωής τους (ένα τυπικό κελί μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων έχει χρόνο ζωής περίπου 2.000 ώρες). Η τεχνολογία των κελιών καυσίμου είναι σε διαρκή εξέλιξη για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της, τη μείωση του κόστους της, αλλά και την ασφαλή αποθήκευση και μεταφορά του υδρογόνου.

#### Αρχή λειτουργίας

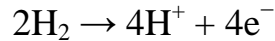
Λειτουργούν με βάση τις αρχές μιας κοινής μπαταρίας με τη διαφορά ότι το κελί καυσίμου είναι σαν ένας χημικός αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας που όσο τροφοδοτείται με υδρογόνο και οξυγόνο δεν «αδειάζει» ή δεν χρειάζεται κάποια επαναφόρτιση. Τα βασικά στοιχεία ενός κελιού καυσίμου είναι:

- το ηλεκτρόδιο ανόδου (-)
- το ηλεκτρόδιο καθόδου (+)
- ο ηλεκτρολύτης

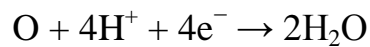
Στην άνοδο τροφοδοτείται το αέριο υδρογόνο και στην κάθοδο το αέριο οξυγόνο. Ο ηλεκτρολύτης λειτουργεί ως διαχωριστική μεμβράνη για τα δύο αέρια και ανάλογα με τη φύση του επιτρέπει τη διέλευση μόνο συγκεκριμένων ιόντων.



Στην περίπτωση του **όξιου** ηλεκτρολύτη (επιτρέπει τη διέλευση κατιόντων) όταν το υδρογόνο έρθει σε επαφή με την άνοδο ιονίζεται (εικόνα 3.4). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση ηλεκτρονίων και τη δημιουργία ιόντων  $H^+$  σύμφωνα με την αντίδραση:

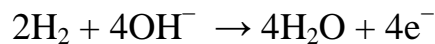


Ο όξινος ηλεκτρολύτης επιτρέπει τη διέλευση των  $H^+$  που μετακινούνται από την άνοδο στην κάθοδο και προσκολώνται στην τελευταία. Το ίδιο γίνεται και με τα ηλεκτρόνια που από το ηλεκτρόδιο της ανόδου κινούνται προς αυτό της καθόδου. Εκεί με την παρουσία του οξυγόνου αντιδρούν προς σχηματισμό νερού:



Η συνεχής διεξαγωγή των αντιδράσεων απαιτεί τη διαρκή ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο διαμέσου ενός κλειστού κυκλώματος. Ροή ηλεκτρονίων σημαίνει ηλεκτρικό ρεύμα.

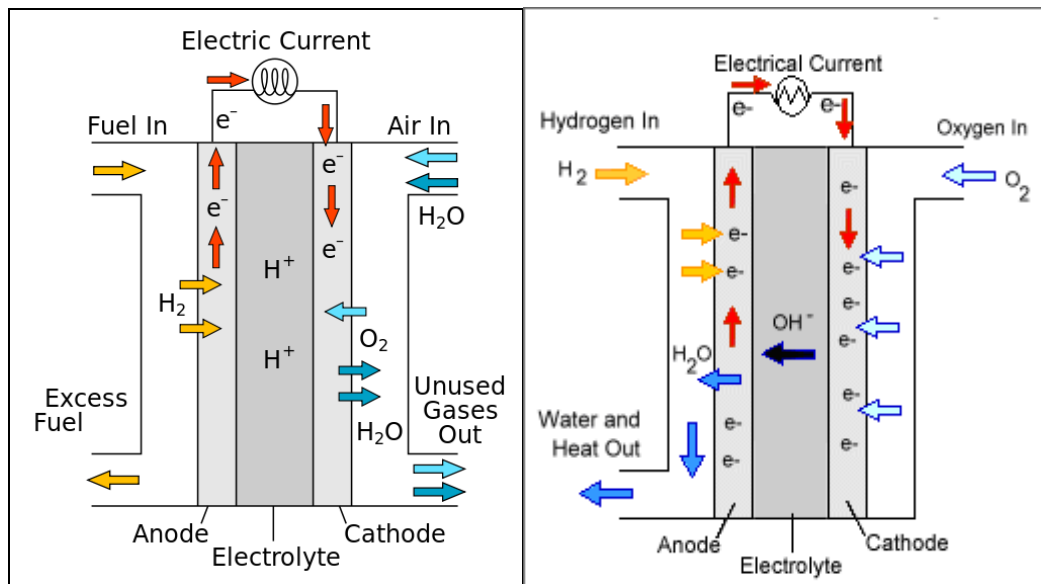
Σε ένα κελί καυσίμου με **αλκαλικό** ηλεκτρολύτη (εικόνα 3.4) η διαδικασία είναι παρόμοια, όμως οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται σε κάθε ηλεκτρόδιο είναι διαφορετικές. Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης επιτρέπει μόνο τη διέλευση ιόντων  $OH^-$ . Στην άνοδο τα ιόντα  $OH^-$  αντιδρούν με το υδρογόνο απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια, ενώ παράλληλα παράγεται νερό:



Στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από τα ηλεκτρόδια και το νερό μέσω του ηλεκτρολύτη σχηματίζοντας νέα ιόντα  $OH^-$ .

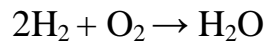


Βλέπουμε ότι και σε αυτή την περίπτωση για τη συνεχή πραγματοποίηση των αντιδράσεων είναι αναγκαία η ύπαρξη κλειστού κυκλώματος για την ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο.



Εικόνα 3.4: Όξινο (αριστερά) και αλκαλικό κελί (δεξιά)

Η συνολική αντίδραση και στις δύο περιπτώσεις είναι αυτή του σχηματισμού νερού:



Η αντίδραση αυτή παρουσιάζει έντονα εξώθερμο χαρακτήρα με αποτέλεσμα τη απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας την οποία και εκμεταλλευόμαστε.

Ένα κελί καυσίμου μπορεί να δημιουργήσει δυναμικό της τάξης του 0,7V. Για την αύξηση του δυναμικού απαιτείται η σύνδεση διαδοχικών κελιών σε σειρά με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας συστοιχίας. Η διασύνδεση των κελιών καυσίμου πραγματοποιείται με τη χρήση των διπολικών πλακών. Οι πλάκες αυτές έχουν κατάλληλα διαμορφωμένα κανάλια για τη ροή των αερίων, δηλαδή του υδρογόνου και του οξυγόνου, στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

Τα κελιά καυσίμου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Σύμφωνα με αυτό υπάρχουν οι εξής 6 κατηγορίες:

- Φωσφορικού Οξέος (PAFC)
- Μembrάνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
- Τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)
- Στερεού οξειδίου (SOFC)
- Αλκαλικά (AFC)
- Μεθανόλης (DMFC)

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των μονάδων φαίνονται στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί:

	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC	AFC	DMFC
Ηλεκτρολύτης	Φωσφορικό οξύ	Πολυμερές	Μίγμα ανθρακικών αλκαλίων	Σταθεροποιημένο ζirkόνιο	Υδροξείδιο του καλίου	Πολυμερές
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	150-220	70-100	600-700	650-1000	60-90	90
Θερμότητα από συμπαραγωγή	Μέτριας ποιότητας	Χαμηλής ποιότητας	Υψηλή	Υψηλή	Καθόλου	Καθόλου
Καύσιμο	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, φυσικό αέριο	H <sub>2</sub> , CO, φυσικό αέριο	H <sub>2</sub>	Διάλυμα νερού/μεθανόλης
Ισχύς	<50 kW	Μέχρι 250 kW	>1 MW	>200 kW	Μέχρι 20 kW	<10 kW

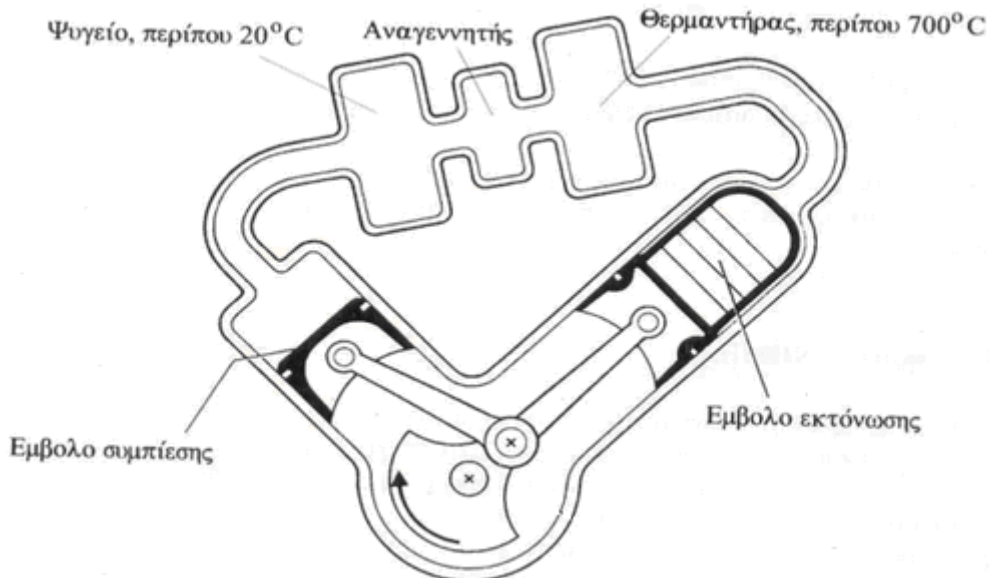
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων κελιών καυσίμου

Η θερμοκρασία στην οποία ανακτάται το νερό, όπως είναι φυσικό εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου και τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Οι MCFC και SOFC λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας δεν χρησιμοποιούνται συχνά για διεσπαρμένη παραγωγή σε οικιακές εφαρμογές. Χάρη στο πολύ μεγάλο θερμικό φορτίο που παράγουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ατμού που θα εκτονωθεί σε κάποιο στρόβιλο για την περαιτέρω παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 3.4.4 Μηχανές τύπου Stirling

Ανήκουν στην κατηγορία των μηχανών εξωτερικής καύσης, δηλαδή η καύση του καυσίμου γίνεται σε χώρο διαφορετικό από αυτόν της παραγωγής έργου. Οφείλουν το όνομα τους στον σκωτσέζο εφευρέτη τους R. Stirling. Η τεχνολογία τους δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί και διαδοθεί αρκετά, αλλά το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη της έχει αναθερμανθεί τα τελευταία χάρη στην ανακάλυψη ενός νέου τύπου που ονομάζεται **ελεύθερου εμβόλου** (free piston). Το γεγονός πως ανήκουν στις μηχανές εξωτερικής καύσης δίνει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή καυσίμου. Ουσιαστικά μπορούν να λειτουργήσουν με οποιαδήποτε καύσιμη ύλη. Υπάρχουν μονάδες που λαμβάνουν την απαιτούμενη ενέργεια για να λειτουργήσουν από ανανεώσιμες πηγές, όπως βιομάζα ακόμα και από φωτοβολταϊκά πάνελ. Παρουσιάζουν μικρά επίπεδα θορύβου, κραδασμών και εκπομπών και είναι ικανά να λειτουργούν για

μεγάλες περιόδους χρόνου χωρίς να απαιτούν συντήρηση. Τα στοιχεία αυτά τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογή στον οικιακό τομέα. Τέτοιοι κινητήρες ισχύος μέχρι 1-1,5 MW έχουν αναμενόμενη διάρκεια ζωής της τάξεως των 20 ετών. Υστερούν σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης στο σημείο ότι οι τελευταίες μετρούν χρόνια εφαρμογών, έρευνας και βελτιστοποίησης και έτσι το γνωστικό επίπεδο είναι πολύ μεγαλύτερο.



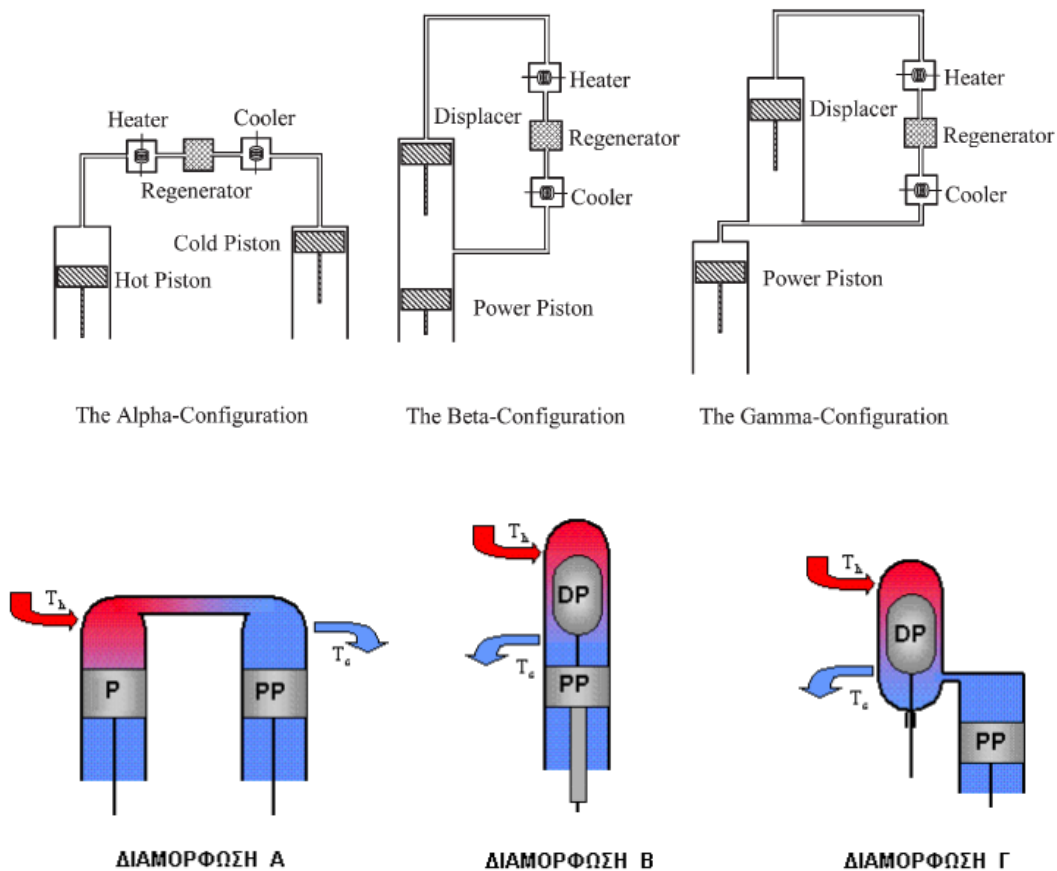
Εικόνα 3.5: Μορφολογία μηχανής τύπου Stirling

Στο παραπάνω σχήμα (εικόνα 3.5) παρουσιάζεται μια απλοποιημένη απεικόνιση ενός κινητήρα Stirling. Η διάταξη είναι στεγανή ώστε να μην υπάρχουν διαρροές του ρευστού (π.χ. αέρας, υδρογόνο, ήλιο). Το ρευστό βρίσκεται μεταξύ του συστήματος κυλίνδρου - δύο εμβόλων και κινείται εντός των εναλλακτών και του **αναγεννητή**. Η κινητήριος δύναμη είναι η διαφορά θερμοκρασίας των εναλλακτών. Η θερμότητα μεταφέρεται από την πηγή θέρμανσης (θερμαντήρας) στο ρευστό και τελικά σε ένα ψυχοδοχείο (ψυγείο). Η διεργασία περιλαμβάνει εναλλασσόμενους κύκλους ψύξης και θέρμανσης του ρευστού με αποτέλεσμα τη συμπίεση και αποσυμπίεση του. Αυτό δίνει κίνηση στα έμβολα τα οποία με τη σειρά τους περιστρέφουν το στροφαλοφόρο άξονα παράγοντας έργο. Η μηχανική ενέργεια θα μετατραπεί σε ηλεκτρική και επιπλέον θα αξιοποιηθεί και η θερμική. Ο αναγεννητής αποθηκεύει θερμότητα κατά τη διάρκεια της μιας φάσης του κύκλου λειτουργίας και την αποδίδει κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου μέρους του κύκλου. Είναι κάτι αντίστοιχο με τον recuperator που συναντήσαμε στις μικροτουρμπίνες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της μηχανής.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η κατηγοριοποίηση μηχανών τέτοιου τύπου γίνεται ανάλογα με τα μηχανικά μέρη που διαθέτουν (εικόνα 3.6). Έτσι υπάρχουν οι τρεις παρακάτω βασικές κατηγορίες που ονομάζονται διαμορφώσεις:

- **Διαμόρφωση Α:** Περιλαμβάνει δύο κυλίνδρους. Ο κύλινδρος συμπίεσης έχει το έμβολο ισχύος ή έμβολο συμπίεσης (power piston - PP) και ψύχεται. Στον κύλινδρο εκτόνωσης υπάρχει το έμβολο εκτόνωσης (piston - P) και εφαρμόζεται η πηγή θέρμανσης. Μεταξύ τους βρίσκεται ο θερμοαντήρας.
- **Διαμόρφωση Β:** Εδώ υπάρχει μόνο ένας κύλινδρος όπου θερμαίνεται στο ένα άκρο και ψύχεται στο άλλο. Μέσα στον κύλινδρο βρίσκονται το έμβολο ισχύος (PP) και το έμβολο του εκτοπιστή (displacer - DP). Στο έμβολο ισχύος λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες συμπίεσης-εκτόνωσης, ενώ η δουλειά του εκτοπιστή είναι να μετακινεί το ρευστό εναλλάξ στο θερμό και ψυχρό χώρο. Ο αναγεννητής βρίσκεται μεταξύ των δύο χώρων.
- **Διαμόρφωση Γ:** Σε αυτή την περίπτωση το έμβολο ισχύος και ο εκτοπιστής βρίσκονται σε διαφορετικούς κυλίνδρους. Οι εναλλάκτες εφαρμόζονται στον κύλινδρο του εκτοπιστή.



Εικόνα 3.6: Διαμορφώσεις μηχανών τύπου Stirling

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

Όπως ήδη αναφέραμε από τις πιο καινούριες εφαρμογές του κύκλου Stirling είναι η μηχανή με διαμόρφωση ελευθέρων εμβόλων την οποία σχεδίασε και κατασκεύασε στις αρχές του 1960 ο William T. Beale. Οι μηχανές αυτές λειτουργούν χωρίς φυσικές συνδεσμολογίες. Στηρίζονται μόνο στις πιέσεις των αερίων για να μεταβιβάσουν τις σωστές κινήσεις στα παλινδρομούντα μέρη. Τέτοιες μηχανές έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας, του χαμηλού κόστους, και της αξιοπιστίας σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές Stirling.

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 3.2) συνοψίζονται κάποια από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά κάθε συστήματος συμπαραγωγής.

	<b>ΕΜΒΟΛΟ ΦΟΡΕΣ</b>	<b>ΜΙΚΡΟ ΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ</b>	<b>ΚΕΛΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ</b>	<b>STIRLING</b>
<b>Ηλεκτρική αποδοτικότητα</b>	20-40%	30-40%	40-60%	25-40%
<b>Ολική αποδοτικότητα</b>	70-90%	80-85%	80-90%	80-95%
<b>Heat to Power ratio</b>	2:1	1,5:1 με 3:1	1:1 με 1,3:1	2:1
<b>Θερμοκρασία ανάκτησης νερού</b>	έως 160 °C	70-90 °C	έως 200 °C	120 °C
<b>Τύπος ηλεκτρικού ρεύματος</b>	AC	AC	DC	AC
<b>Επίπεδα ήχου</b>	σχετικά υψηλά	μέτρια	πολύ χαμηλά	μέτρια έως χαμηλά

*Πίνακας 3.2: Γενικά χαρακτηριστικά μονάδων συμπαραγωγής για οικιακές εφαρμογές*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχει η δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας περισσότερων από μιας μονάδων. Έτσι δημιουργείται η έννοια των δικτύων παραγωγής, όπου συνυπάρχουν διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν με το δίκτυο.

## **4. ΔΙΚΤΥΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά σε νέα δίκτυα παραγωγής όπου η λειτουργία τους βασίζεται κατά κύριο λόγο σε διεσπαρμένα συστήματα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα μικροδίκτυα (Microgrid - MG) και τα εργοστάσια εικονικής παραγωγής (Virtual Power Plants - VPP).

### *4.1 Μικροδίκτυα*

Με την έννοια μικροδίκτυο εννοούμε ένα δίκτυο ενέργειας που αποτελείται από διάφορες γεννήτριες διεσπαρμένης παραγωγής, τις μονάδες αποθήκευσης, ηλεκτρικά φορτία καθώς επίσης και από ένα σύστημα διαχείρισης της ενέργειας. Το βασικότερο χαρακτηριστικό του είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει όντας συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο, αλλά και απομονωμένα-αυτόνομα. Η ισχύς του μπορεί να είναι από λίγα kW μέχρι 1-2MW γι'αυτό συνδέεται σε δίκτυα χαμηλής και μέσης τάσης.

Ο σχεδιασμός του είναι ανεξάρτητος από αυτόν του κεντρικού δικτύου, ωστόσο υπάρχει και η δυνατότητα διασύνδεσης. Με την τελευταία έχουμε αλληλεπίδραση και ανταλλαγή ενέργειας. Όταν η ζήτηση είναι πολύ μεγάλη και δεν μπορεί να καλυφθεί αποκλειστικά από το MG, τότε υποβοηθάται από το κεντρικό δίκτυο (αγορά ρεύματος). Όταν όμως έχουμε πλεονάζουσα ενέργεια και οι τιμές είναι ευνοϊκές τότε το MG δίνοντας ενέργεια πίσω στο κεντρικό δίκτυο αποκομίζει οικονομικά οφέλη (πώληση ρεύματος). Ένα MG παίζει υποστηρικτικό ρόλο προς το κεντρικό δίκτυο και σε καμία περίπτωση δεν το επιβαρύνει. Από την άλλη, την απομονωμένη λειτουργία (islanded mode) δεν έχουμε αλληλεπίδραση και το MG λειτουργεί ως μια ξεχωριστή-αποκομμένη μονάδα παραγωγής ενέργειας. Έτσι ο ρόλος του είναι διττός, αφού είναι ταυτόχρονα ένα μέσο αντιμετώπισης των φορτίων αιχμής, αλλά και μια ικανή μονάδα να τροφοδοτήσει από μόνη της ένα μεγάλο κομμάτι καταναλωτών. Η ειδοποιός διαφορά ενός μικροδικτύου από ένα απλό σύνολο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι η ικανότητα του για την κατά το δυνατόν αδιατάρακτη μετάβαση από τη διασυνδεδεμένη σε απομονωμένη λειτουργία και το αντίστροφο.

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μια φυσική μορφή ενέργειας ώστε να στηριχθεί κατά κύριο λόγο σε Α.Π.Ε. και με τη βοήθεια και της συμπαραγωγής να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες μιας περιοχής. Αντίστοιχα με μια μεμονωμένη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να είναι μικρό ώστε να τροφοδοτεί ένα νοικοκυριό, αλλά και αρκετά μεγάλο ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες εκατοντάδων καταναλωτών. Για παράδειγμα ένα σύστημα

από μια μικρή ανεμογεννήτρια και ένα μικρό βενζινοκινητήρα που θα βοηθούσε στην κάλυψη των αναγκών ενός σπιτιού μπορεί να χαρακτηριστεί ως μικροδίκτυο. Μικροδίκτυο επίσης είναι και ένα σύστημα που αποτελείται από κυψέλες καυσίμου, μονάδα ηλεκτρόλυσης που τροφοδοτείται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών πάνελ και σειρές κινητήρων εσωτερικής και εξωτερικής καύσης που ανάλογα με τη δυναμικότητα του είναι ικανό να ικανοποιήσει τις ανάγκες ακόμα και μιας μικρής πόλης. Μια σωστή συνδυασμένη μάλιστα χρήση νέων τεχνολογιών συμπαραγωγής και ανανεώσιμων πηγών, θα μπορούσε ίσως να κάνει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο μικροδίκτυο ανταγωνιστική έναντι αυτής του κεντρικού δικτύου.

Για τον αποτελεσματικό έλεγχο και τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του ένα MG θα πρέπει να διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Η προσθήκη μιας νέας γεννήτριας θα πρέπει να γίνεται χωρίς τροποποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού.
- Θα πρέπει να συνδέεται και να αποσυνδέεται από το δίκτυο με γρήγορο και εύκολο τρόπο.
- Πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του δικτύου όσον αφορά τη συχνότητα και το δυναμικό του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Τυχόν πτώσεις τάσης ή ανισοροπίες θα πρέπει να διορθώνονται άμεσα.

Το υπάρχον δίκτυο παροχής ενέργειας δείχνει συνεχώς τις αδυναμίες του. Το πιο πρόσφατο παράδειγμα είναι αυτό της Ινδίας, όπου τον Ιούλιο του 2012 μονάδες συνολικής δυναμικότητας 32 GW τέθηκαν ξαφνικά εκτός λειτουργίας. Αποτέλεσμα το μεγαλύτερο blackout της ιστορίας και 620 εκατομμύρια άνθρωποι, δηλαδή το ένα δέκατο του παγκόσμιου πληθυσμού, να μείνουν χωρίς ρεύμα. Τέτοια περιστατικά στο μέλλον θα αποφεύγονται με την ένταξη MGs στο κεντρικό δίκτυο. Η εξάρτηση μεταφοράς ενέργειας από μακρινές αποστάσεις θα μειώνεται μέχρι ίσως του σημείου της πλήρους ανεξαρτητοποίησης από το κεντρικό δίκτυο. Από την οπτική γωνία του τελευταίου είναι σαν ένας απλός καταναλωτής με την ιδιαιτερότητα ότι μπορεί να γίνει και παραγωγός.

Εφαρμογές μικροδικτύων έχουν ήδη γίνει ανά τον κόσμο συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, όπου λειτουργεί ένα πιλοτικό πρόγραμμα στην Κύθνο που ηλεκτροδοτεί 12 σπίτια. Το μικροδίκτυο πληροί τις προϋποθέσεις ασφαλείας που προβλέπονται από τη ΔΕΗ για τη σύνδεση με τα σπίτια ώστε μελλοντικά να συνδεθεί με το υπόλοιπο δίκτυο του νησιού. Σε ένα κτήριο 20 τετραγωνικών μέτρων που κατασκευάστηκε στη μέση του οικισμού τοποθετήθηκαν οι μπαταρίες, η



ντηζελογεννήτρια καθώς και οι υπόλοιπες ηλεκτρονικές συσκευές μαζί με τον υπολογιστή ελέγχου και το υλικό επικοινωνίας.

#### *4.1.1 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα*

Τα μικροδίκτυα μπορούν να δώσουν υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας και καλύτερη ποιότητα ισχύος, εξομαλύνοντας την τάση. Συγκεντρωτικά το πλεονεκτήματα που εμφανίζουν είναι τα εξής:

- Εξασφαλισμένη και συνεχής παροχή ενέργειας στους καταναλωτές οι οποίοι ανήκουν στο εκάστοτε μικροδίκτυο ακόμα και σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου χάρη στη δυνατότητα της απομονωμένης λειτουργίας. Το ζήτημα αυτό είναι ύψιστης σημασίας για καταναλωτές όπως κέντρα υγείας-περίθαλψης που χρειάζονται αξιόπιστα συστήματα παραγωγής ενέργειας.
- Αποδοτικότερη παραγωγή ενέργειας και καλύτερη αξιοποίηση των πρώτων υλών (καύσιμα) με τη χρήση μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP).
- Ελαχιστοποίηση των απωλειών και βελτίωση της ποιότητας ισχύος λόγω της πολιτικής τοπικής κάλυψης, που συνεπάγεται ότι δεν παρεμβάλλονται ούτε μεγάλα μήκη γραμμών ούτε πολλοί ενδιάμεσοι καταναλωτές που αλλοιώνουν τον συντελεστή ισχύος.
- Μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση χρησιμοποιώντας σε μεγάλο βαθμό ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γενικότερα νέες τεχνολογίες, φιλικότερες προς το περιβάλλον. Η ενσωμάτωση τοπικά παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας διαμορφώνει ευνοϊκότερους όρους για το περιβάλλον και την αειφόρο ανάπτυξη.
- Μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα του συστήματος, αφού τα μικροδίκτυα ακολουθούν την αρχή της διεσπαρμένης παραγωγής, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ενέργεια να μην παράγεται αποκλειστικά από λίγες μεγάλες μονάδες.
- Μεγάλη ευστάθεια λόγω της ενεργούς διαχείρισης των φορτίων. Η διαδικασία αυτή βοηθά σημαντικά και στην οικονομική λειτουργία του συστήματος.
- Μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών, όταν το μικροδίκτυο συμμετέχει σε πλήρως απελευθερωμένη αγορά ενέργειας.
- Οικονομικές και λειτουργικές διευκολύνσεις στο κεντρικό δίκτυο τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η τοπική κάλυψη φορτίων από ένα μικροδίκτυο έχει ως αποτέλεσμα την αναβολή επενδύσεων

προς ενίσχυση του προβληματικού δικτύου και των κεντρικών σταθμών παραγωγής. Επίσης, προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, ιδιαίτερα κατά τον χειρισμό των συμφορήσεων και την επαναφορά του συστήματος μετά από σβέση.

Από την άλλη η εισαγωγή μονάδων παραγωγής στο επίπεδο χαμηλής και μέσης τάσης δεν είναι απλό θέμα από τεχνικής πλευράς ειδικά με την εμφάνιση όλο και περισσότερων μικροδικτύων στο μέλλον. Δημιουργούνται έτσι, μία σειρά από τεχνικά ζητήματα τα οποία αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Μεταβολές στην τάση του δικτύου:**

Για κάθε δίκτυο διανομής έχουν τεθεί συγκεκριμένα όρια για την τάση. Αυτά τα όρια σε κάθε περίπτωση είναι σημαντική παράμετρος τόσο για την επέκταση του δικτύου όσο και για το κόστος που αυτό συνεπάγεται. Το πλέον επικίνδυνο σενάριο από την παρουσία μικροπηγών στο επίπεδο της χαμηλής και μέσης τάσης είναι η πιθανότητα η τάση να υπερβεί τα μέγιστα επιτρεπτά όρια. Το σενάριο αυτό θα συμβεί στην περίπτωση που το φορτίο τοπικά είναι στο ελάχιστο και παράλληλα έχουμε σημαντική παραγωγή από την μονάδα. Το πρόβλημα εντείνεται στην χαμηλή τάση δεδομένου ότι εκεί η τιμή της αντίστασης των καλωδίων είναι σχετικά μεγάλη οπότε στην τιμή της τάσης εμπλέκεται και η ενεργός ισχύς. Μία προτεινόμενη λύση σε αυτήν την περίπτωση είναι η αύξηση της ζήτησης έργου ισχύος από την πλευρά της μονάδας ενώ μία άλλη λύση είναι η χρήση με αντισταθμιστικό τρόπο των λήψεων του μετασχηματιστή.

- **Αύξηση στη στάθμη βραχυκυκλώσεως του δικτύου:**

Η χρήση στρεφόμενων κυρίως μηχανών στις μονάδες παραγωγής προφανώς θα έχει επίπτωση στο επίπεδο του σφάλματος. Η αύξηση του επιπέδου του σφάλματος πιθανόν να απαιτεί αλλαγές στους διακόπτες του δικτύου κάτι που συνεπάγεται σημαντική αύξηση του κόστους ειδικά αν τις όποιες αναβαθμίσεις είναι υποχρεωμένος να τις αναλάβει ο ιδιοκτήτης της μονάδας. Μια λύση είναι η εγκατάσταση μίας αντίδρασης (μετασχηματιστή ή πηνίο) μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου με αύξηση όμως των απωλειών και των μεταβολών στην τάση.

- **Ποιότητα ισχύος:**

Η ποιότητα της ισχύος είναι ένα σημαντικό θέμα στην εισαγωγή των μικρομονάδων στο δίκτυο και περιλαμβάνει μία σειρά από φαινόμενα με κυριότερο αυτό της μεταβολής της τάσης. Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να προέλθουν από την παρουσία στρεφόμενων μηχανών και από απότομη σύνδεση ή αποσύνδεση μονάδων και συνήθως αντιμετωπίζονται με ένα αποδοτικό σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος.

- **Προστασία:**

Η προστασία των συσκευών του μικροδικτύου είναι ένα σύνθετο θέμα αφού αφορά τόσο την λειτουργία των υπάρχοντων προστασιών αλλά και των αλλαγών που θα πρέπει να γίνουν στο σύστημα διανομής. Ειδικότερα θα πρέπει να μελετηθεί το θέμα των γειώσεων, των προστασιών που θα πρέπει να έχουν οι μονάδες αλλά και τη λειτουργία του συστήματος σε κατάσταση νησίδας.

- **Ευστάθεια του δικτύου:**

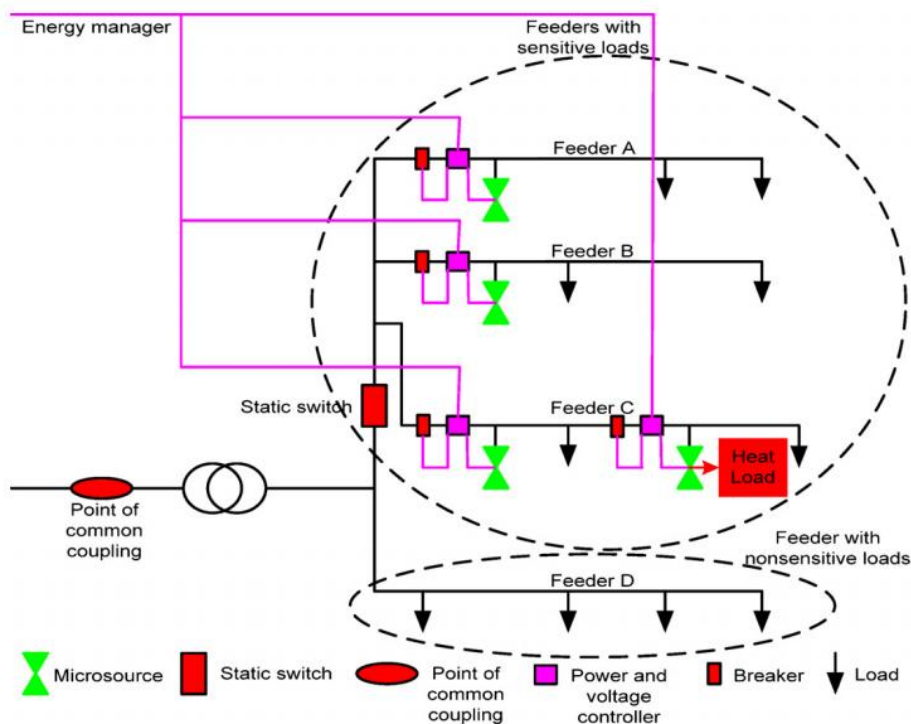
Το θέμα της ευστάθειας του συστήματος αφορά κυρίως την περίπτωση που η εκτεταμένη χρήση της διεσπαρμένης παραγωγής αλλά και των μικρομονάδων χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ασφάλειας του δικτύου. Το βασικό πρόβλημα σε αυτήν την περίπτωση είναι η συμπεριφορά των διεσπαρμένων μονάδων μετά από μία απώλεια μίας μεγάλης μονάδος ή μίας μεγάλης γραμμής μεταφοράς.

- **Ρύπανση:**

Η δημιουργία μικροδικτύων πρέπει να αναφέρουμε ότι μπορεί να δημιουργήσει τοπικά ένα είδος ρύπανσης, ειδικά αν δεν έχει γίνει σωστός σχεδιασμός των εγκαταστάσεων παραγωγής. Αυτό γιατί οι γεννήτριες μπορεί να προκαλούν ηχορύπανση αν δεν βρίσκονται σε χώρο με καλή μόνωση καθώς επίσης, αν δεν είναι τοποθετημένες σε μη εμφανή μέρη το αισθητικό αποτέλεσμα δεν θα είναι ευχάριστο. Παράλληλα, η παραγωγή δίπλα στο φορτίο, για τα αστικά κέντρα προκαλεί επιπλέον ρύπανση σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής που βρίσκονται συνήθως σε απομακρυσμένες περιοχές παρόλο που είναι περισσότερο ρυπογόνοι. Για αυτούς τους λόγους θα πρέπει να επιλέγονται καθαρές τεχνολογίες με χαμηλά επίπεδα θορύβου.

4.1.2 Δομή μικροδικτύου

Η βασική δομή ενός MG παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1. Πάνω σε αυτή θα στηριχθούμε ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία του.



Εικόνα 4.1: Δομή μικροδικτύου

Παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο μικροδίκτυο αποτελείται από τέσσερις γραμμές φορτίων (Feeders A-D). Τα φορτία των γραμμών A-C χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητα. Τα φορτία αυτά χρήζουν άμεσης ικανοποίησης γι' αυτό το λόγο σε κάθε μία από τις γραμμές A-C υπάρχει κάποια μονάδα παραγωγής (microsource) ώστε να έχουμε συνεχή τροφοδοσία ενέργειας. Ειδικότερα στη γραμμή C βλέπουμε ότι υπάρχει και ένα σύστημα συμπαραγωγής. Αντίθετα, τα φορτία της γραμμής D δεν έχουν την ίδια σημαντικότητα (μη ευαίσθητα) και έτσι δεν έχουμε κάποια γεννήτρια. Η ζήτηση τους ικανοποιείται κατά κύριο λόγο από το κεντρικό δίκτυο καθώς και από την περίσσεια ενέργειας του ευαίσθητου τμήματος. Το MG συνδέεται και αποσυνδέεται με το κεντρικό δίκτυο με το ζυγό κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling – PCC). Έτσι σε περίπτωση διαταραχών στο κεντρικό δίκτυο έχουμε τη δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας. Αυτό συνεπάγεται ότι η παραγωγή από το MG πρέπει να είναι επαρκής ώστε να καλύψει τις ανάγκες μέχρι τη στιγμή που θα αποκατασταθεί η ισορροπία και θα μπορέσει να επιστρέψει ομαλά και πάλι σε παράλληλη λειτουργία. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα απομόνωσης μόνο των γραμμών A-C με τον στατικό διακόπτη (static

switch) ώστε να ικανοποιηθούν τα ευαίσθητα φορτία. Ο ενεργειακός διαχειριστής (energy manager) είναι υπεύθυνος για τη σωστή λειτουργία του συστήματος ρυθμίζοντας την τάση και τη μεταφορά ενέργειας μέσω κάθε ρυθμιστή της κάθε γεννήτριας. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του κεντρικού δικτύου.

Η παρουσία αποθηκευτικών μέσων σε ένα μικροδίκτυο είναι απαραίτητη καθώς σε αντίθεση με τη συμβατική παραγωγή όπου η κατανάλωση της ενέργειας είναι ταυτόχρονη με την παραγωγή της, εδώ δεν έχουμε άμεση διανομή. Οι βασικές τεχνολογίες αποθήκευσης είναι:

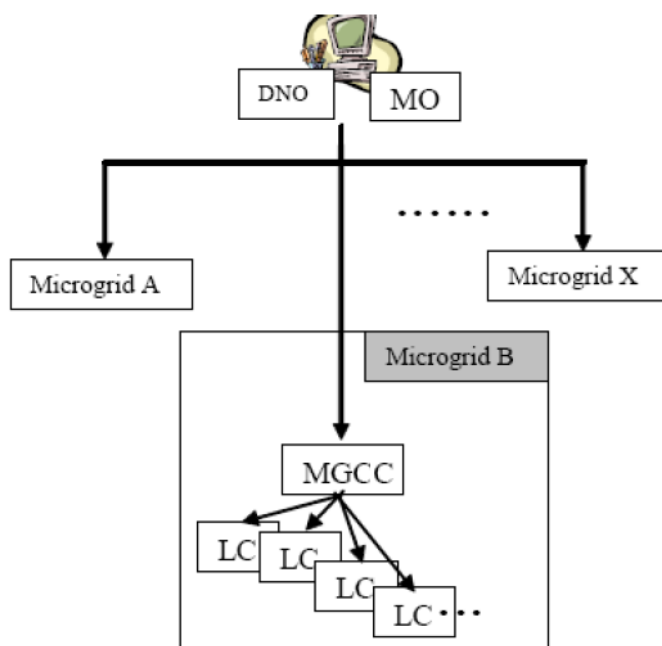
- Ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή κοινώς μπαταρίες και κυρίως μπαταρίες μολύβδου οξέος που αποτελούν μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μετά την ηλεκτροχημική μετατροπή της.
- Μονάδες που λειτουργούν με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES), όπου ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την συμπίεση ποσότητας αέρα η οποία στη συνέχεια κινώντας έναν στρόβιλο αναπαράγει την ηλεκτρική ενέργεια.
- Σφόνδυλοι (flywheels). Πρόκειται για διατάξεις όπου μέσω ενός κινητήρα – γεννήτριας μπορεί να γίνει αποθήκευση με την μορφή κινητικής ενέργειας σε μια στρεφόμενη μάζα.
- Υπεραγώγιμες διατάξεις. Εφαρμογές με διατάξεις που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση ενώ επίσης διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.
- Διατάξεις άντλησης. Η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές χρησιμοποιείται για άντληση νερού σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη. Κατόπιν ηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν ζητηθεί με έναν υδροστρόβιλο

Για να επωφεληθούμε κατά το δυνατόν περισσότερο από τη λειτουργία ενός μικροδικτύου απαραίτητη είναι η παρουσία μίας μορφή ελέγχου η οποία στοχεύει στην αριστοποίηση του συστήματος.

#### *4.1.3 Αρχιτεκτονική ιεραρχικού ελέγχου*

Τα ηλεκτρικά δίκτυα σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν την ενέργεια με μονοκατευθυντική ροή από τις συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής στους πελάτες μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Η παραγωγή ενέργειας από διεσπαρμένες πηγές σε μικροδίκτυα μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της ροής της ισχύος στα δίκτυα διανομής επηρεάζοντας ολόκληρη τη λειτουργία του συστήματος, επομένως ο έλεγχος λειτουργίας τους είναι καθοριστικής σημασίας. Ο συνολικός έλεγχος ενός μικροδικτύου περιλαμβάνει διάφορα στάδια τα οποία αντιστοιχούν σε 3 επίπεδα ιεραρχίας (εικόνα 4.2):

1. **Σύστημα διαχείρισης (Distribution Management System - DMS)** που αποτελείται από τον διαχειριστή δικτύου διανομής (**Distribution Network Operator - DNO**) και διαχειριστές αγοράς (**Market Operator - MO**).
2. **Κεντρικός ρυθμιστής μικροδικτύου (Microgrid Central Controller – MGCC)**.
3. **Τοπικοί ρυθμιστές (Local Controllers – LC)** που αποτελούνται από τους ρυθμιστές μικρογεννητριών, ρυθμιστές αποθηκευτικών μέσων και τους ρυθμιστές φορτίου.



Εικόνα 4.2: Αρχιτεκτονική ιεραρχικού ελέγχου

Θα ξεκινήσουμε από την τελευταία βαθμίδα ιεραρχίας με τους τοπικούς ρυθμιστές οι οποίοι στοχεύουν στο να ελέγχουν τις μικρογεννήτριες με τη χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος. Πολλές από τις μονάδες που συναντάμε σε ένα μικροδίκτυο δεν μπορούν να αποδώσουν άμεσα την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν στο κεντρικό δίκτυο γιατί αυτή δεν είναι στην κατάλληλη μορφή. Το ρεύμα για παράδειγμα που φτάνει στα ελληνικά νοικοκυριά από το κεντρικό δίκτυο είναι ημιτονοειδές εναλλασσόμενο, τάσης 220-240 V και συχνότητας 50 Hz, το οποίο αντιστοιχεί σε 50 εναλλαγές το δευτερόλεπτο. Επομένως, ένα μικροδίκτυο που θα λειτουργούσε στη χώρα μας θα έπρεπε να διοχετεύει ρεύμα ακριβώς με αυτά τα χαρακτηριστικά. Συνεχές ρεύμα ή εναλλασσόμενο σε υψηλές συχνότητες θα ήταν μη συμβατό. Παραδείγματα μονάδων με διαφορετικού τύπου ρεύματος από αυτό του κεντρικού δικτύου είναι τα κελιά καυσίμου, τα φωτοβολταϊκά, και φυσικά οι συσσωρευτές. Όλες αυτές οι μονάδες παράγουν συνεχές

ρεύμα. Υπάρχει όμως η δυνατότητα μετατροπής από τον ένα τύπο στον άλλο με τη χρήση κατάλληλων **ηλεκτρονικών ισχύος**. Ο ανορθωτής (rectifier) μετατρέπει από AC σε DC και ο αντιστροφέας (inverter) από DC σε AC. Επίσης, οι μετασχηματιστές (transformers) αλλάζουν την τάση του ρεύματος. Σε περιπτώσεις παραλληλισμένης λειτουργίας λοιπόν με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί το μικροδίκτυο προβλήματα. Αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα ρεύματος πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου και η απορροφώμενη ενέργεια να μην ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητες τακτικές ελέγχου μετατροπής (inverter control strategies) σαν αυτές που περιγράφονται παρακάτω:

### Βασικός έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος (PQ Control)

Η ενέργεια που καταναλώνεται από μια συσκευή ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται φαινόμενη ισχύς (S) και χωρίζεται σε δύο υποσύνολα: την ενεργό (active power - P) και την άεργο ισχύ (reactive power - Q) η οποία ονομάζεται έτσι διότι σε αντίθεση με την ενεργό δεν μετατρέπεται σε έργο. Η άεργος ισχύς εμφανίζεται στην περίπτωση που υπάρχουν επαγωγικά (πηνία) ή χωρητικά στοιχεία (πυκνωτές) ως φορτία σε κύκλωμα που διατρέχεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Τα στοιχεία αυτά αποθηκεύουν ενέργεια σε μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο αντίστοιχα χωρίς θεωρητικά να την καταναλώνουν. Η ενέργεια αυτή επιστρέφει στο ηλεκτρικό δίκτυο ως ρεύμα αυξάνοντας τις θερμικές απώλειες. Για τη σωστή λειτουργία οποιουδήποτε κυκλώματος, όπως και αυτό του μικροδικτύου, η κυκλοφορία άεργης ισχύος θα πρέπει να ελέγχεται αυστηρά.

**Ο σκοπός του PQ control είναι να ρυθμίζει τις τιμές εξόδου της ενεργού και άεργου ισχύος κάθε μικροπηγής.** Η τακτική αυτή επιλέγεται στην περίπτωση που θέλουμε σταθερές τιμές τάσης και συχνότητας. Γι'αυτό το λόγο εφαρμόζεται κυρίως όταν έχουμε διασυνδεδεμένη λειτουργία και οι τιμές αυτές ορίζονται από το κεντρικό δίκτυο.

### Ρύθμιση τάσης μέσω της μεθόδου πτώσης (Droop Control)

Η διείσδυση μεγάλου αριθμού μικροπηγών σε ένα μικροδίκτυο δεν είναι δυνατή με τους βασικούς ελέγχους P-Q. Χωρίς τον τοπικό έλεγχο τάσης συστήματα με μεγάλο πλήθος μονάδων παραγωγής μπορεί να παρουσιάσουν διακυμάνσεις τάσεως ή/και άεργου ισχύος. Ο ρυθμιστής τάσης πρέπει να διασφαλίζει πως δεν θα υπάρχουν μεγάλα άεργα ρεύματα στα κυκλώματα μεταξύ των πηγών. Σε αντίθεση με το κεντρικό

δίκτυο κάτι τέτοιο σε ένα μικροδίκτυο είναι σημαντικό και πρέπει να αποφεύγεται.

Αυτή η μέθοδος ελέγχου μπορεί να εφαρμοστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο οι τιμές αναφοράς για την ενεργό και άεργο ισχύ προκύπτουν από τις αντίστοιχες μετρούμενες για τη συχνότητα του συστήματος και το πλάτος τάσης ( $f$ - $P/Q$ - $V$ ). Στο δεύτερο τύπο ελέγχου γίνεται το αντίθετο, δηλαδή μέσω των τιμών ισχύος ρυθμίζονται η συχνότητα και η τάση ( $P$ - $f/V$ - $Q$ ).

Το droop control είναι μία μέθοδος παρόμοια με την πρωτογενή ρύθμιση της συχνότητας που χρησιμοποιείται στο υπάρχον σύστημα ενέργειας. Μπορεί να ανταποκριθεί αποτελεσματικά χωρίς την ανάγκη επικοινωνίας με άλλες μικροπηγές. Οι σχέσεις που συνδέουν την ενεργό ισχύ με τη συχνότητα και άεργο ισχύ με το πλάτος τάσης είναι και οι δύο γραμμικές. Έτσι επιτυγχάνεται ο έλεγχος της τάσης που αποτρέπει την ύπαρξη μεγάλων άεργων ρευμάτων στο κύκλωμα.

### Ρύθμιση τάσης/συχνότητας (V/f Control)

Το V/f control είναι μία μέθοδος παρόμοια με την δευτερογενή ρύθμιση της συχνότητας που χρησιμοποιείται στο υπάρχον σύστημα ενέργειας. Χρησιμοποιείται κυρίως στην απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου όπου οι τιμές συχνότητας και τάσης δεν είναι σταθερές ώστε οι μονάδες παραγωγής να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των φορτίων.

Η αξιόπιστη λειτουργία λοιπόν ενός MG, απαιτεί τη συνεχή ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας ώστε να μην δημιουργεί προβλήματα στο κεντρικό δίκτυο. Είτε η παραγόμενη ισχύς είναι διαρκώς μεταβαλλόμενη, όπως στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών, είτε ελεγχόμενη όπως των υδροηλεκτρικών σταθμών και των ντιζελογεννητριών, η διοχέτευση αυτής μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος κάνει εφικτό τον έλεγχο των πιο σημαντικών μεγεθών αυτής, δηλαδή της ηλεκτρικής τάσης και της συχνότητας, μέσω της ροής ενεργού και άεργου ισχύος.

Για κάθε μικροδίκτυο υπάρχει ένας MGCC ο οποίος παρεμβάλλεται ανάμεσα στο μικροδίκτυο και στο σύστημα διαχείρισης και αποτελεί το δεύτερο επίπεδο στην ιεραρχία του ελέγχου. Ο MGCC είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό των τοπικών ρυθμιστών και για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικροδικτύου. Βασίζεται στην ακολουθούμενη πολιτική αγοράς και προσφοράς φορτίων, τις τιμές αγοράς-πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, τα τεχνικά όρια των μονάδων παραγωγής και την



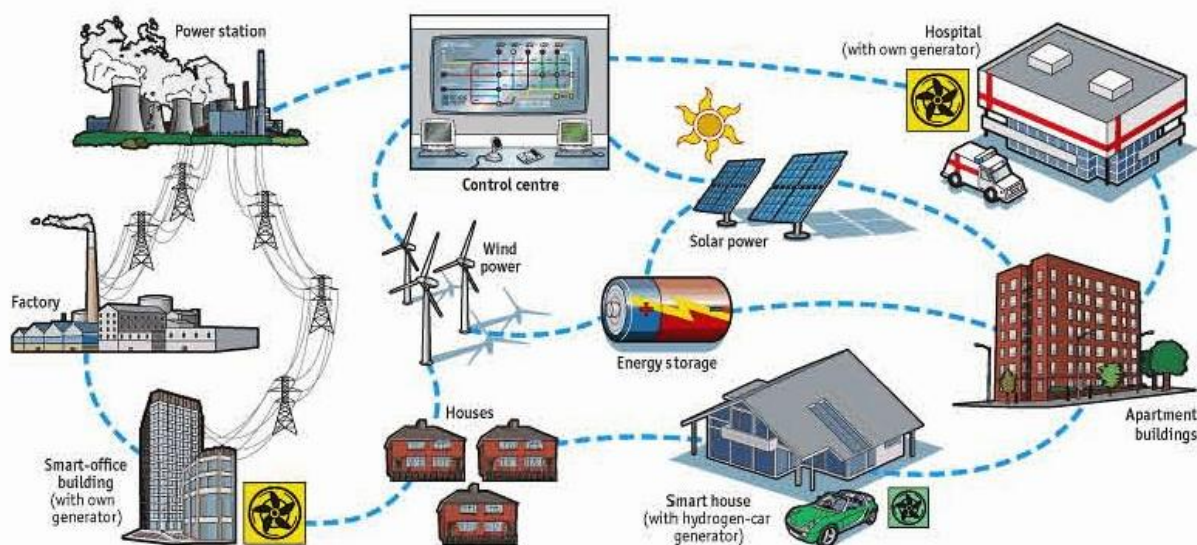
πρόβλεψη παραγωγής από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την πρόβλεψη φορτίων καθώς και τους υπάρχοντες περιορισμούς ασφαλείας του δικτύου. Από αυτούς τους παράγοντες ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. 15 λεπτά) καθορίζεται το βέλτιστο σενάριο λειτουργίας με σκοπό την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους. Οι MGCC υπάγονται στο σύστημα διαχείρισης.

Ο DNO έχει την ευθύνη της λειτουργίας των περιοχών μέσης και χαμηλής τάσης στις οποίες βρίσκονται τα μικροδίκτυα. Ο MO απ'την άλλη είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία της αγοράς ενέργειας στην συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου διανομής. Ανάλογα με το μοντέλο της αγοράς ενέργειας μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι του ενός MO. Αυτές οι δύο οντότητες (DNO και MO) δεν ανήκουν στο μικροδίκτυο αλλά αποτελούν τους εκπροσώπους του κεντρικού δικτύου με τους οποίους επικοινωνεί το μικροδίκτυο. Θα πρέπει να τονιστεί ότι παρά την αυτονομία του μικροδικτύου, εφόσον είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο, θα πρέπει να υπάρχει ένα ελάχιστο επίπεδο συντονισμού με τους DNO/MO ώστε αυτοί να το αντιλαμβάνονται ως ένα ενιαίο φορτίο.

**Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι η σειρά ελέγχου έχει ως εξής: Οι DNO/MO επικοινωνούν με το μικροδίκτυο μέσω του MGCC. Ο MGCC προωθεί τεχνικές και οικονομικές πολιτικές διαχείρισης και παρέχει τα καθοριστικά σημεία λειτουργίας στους τοπικούς ρυθμιστές. Αυτή με τη σειρά τους είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο του επιπέδου παραγωγής ενεργής και άεργου ισχύος των μικροπηγών.**

#### 4.2 Εργοστάσια εικονικής παραγωγής

Με τον όρο εργοστάσια εικονικής παραγωγής (**Virtual Power Plants –VPP**) αναφερόμαστε σε ένα πλήθος διαφορετικών μονάδων παραγωγής που λειτουργούν σαν ένα σύστημα κάτω από μια πλατφόρμα επικοινωνίας. Τα VPP είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την έννοια της επικοινωνίας καθώς η λειτουργία τους στηρίζεται στη συνεχή ανταλλαγή πληροφοριών και αυτή είναι που δημιουργεί νέες δυνατότητες. Βασίζονται σε ειδικά λογισμικά με τα οποία είναι δυνατή η εξ'αποστάσεως διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας για την βέλτιστη χρησιμοποίηση της. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα μιας ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικότερης διασυνδεδεμένης λειτουργίας, παρότι αν λειτουργούσε η κάθε μονάδα μόνη της.



Sources: The Economist, ABB

Εικόνα 4.3: Virtual Power Plant

##### 4.2.1 Εισαγωγή

Ένα παράδειγμα VPP φαίνεται στην εικόνα 4.3. Σε αντίθεση με τα μικροδίκτυα εδώ ο σχεδιασμός περιλαμβάνει τόσο την κεντρική όσο και τη διανεμημένη παραγωγή. Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι χωρίς την ανάγκη επενδυτικών κεφαλαίων για την βελτιστοποίηση των υποδομών του υπάρχοντος δικτύου, αλλά χάρη στην απλή τεχνολογία για την εξασφάλιση της μεταφοράς δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μπορεί να αλλάξει δραματικά ο τρόπος διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας. Για να συμβεί αυτό υποχρεωτικά είναι συστήματα πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών για τη διαχείριση της ζήτησης (**Demand Side**

Management/Demand Response-DSM/DR). Η εγκατάσταση αισθητήρων σε διάφορα κομβικά σημεία του δικτύου, που ασύρματα θα επικοινωνούν με το κεντρικό σύστημα ελέγχου δημιουργούν τη γέφυρα επικοινωνίας. Έτσι μέσω υπολογιστικών συστημάτων καθίσταται δυνατή η ρύθμιση της λειτουργίας των μονάδων ώστε να παραχθεί το ζητούμενο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας. Με τα VPP είναι δυνατός ο έλεγχος μονάδων που βρίσκονται πολύ μακριά από το κέντρο διαχείρισης αλλά και μεταξύ τους. Για να γίνει κατανοητό πως μπορεί να γίνει αυτό, δίνοντας παράλληλα έμφαση στην έκταση ενός VPP και στη στοχαστικότητα των καιρικών φαινομένων ακολουθεί παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι φωτοβολταϊκά πάνελ που είναι εγκατεστημένα στο βόρειο τμήμα της χώρας δεν παράγουν ενέργεια λόγω της απουσίας ηλιοφάνειας. Είναι πιθανό όμως ένα πάρκο με ανεμογεννήτριες που είναι εγκατεστημένο σε κάποιο άλλο σημείο της χώρας λόγω αυξημένης έντασης ανέμων να έχει υψηλή παραγωγή. Έτσι μπορεί και πάλι να καλυφθεί ικανοποιητικά η ζήτηση. Θα μπορούσε να συμβαίνει και το αντίστροφο. Ακόμα και στην περίπτωση όπου δεν ευνοείται τόσο η λειτουργία των φωτοβολταϊκών όσο και των ανεμογεννητριών μπορεί η ευθύνη παραγωγής να ανατεθεί πλήρως στα κεντρικά εργοστάσια. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπερπηδήσουμε τα εμπόδια που σχετίζονται με την τυχαιότητα των καιρικών συνθηκών με αποτέλεσμα να επιτρέπεται σε μεγαλύτερο βαθμό η διείσδυση των Α.Π.Ε. στην παραγωγή. Σκοπός του ελέγχου είναι η επεξεργασία ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα όλων των μεταβλητών, όπως πρόγνωση καιρού, τιμές αγοράς και ζήτηση ώστε να καταστρωθεί το ιδανικό σχέδιο κατανομής της ενέργειας. Σημαντικό ρόλο μπορεί να διαδραματίσουν και τα αποθηκευτικά μέσα. Σε στιγμές όπου η παραγόμενη ενέργεια υπερτερεί αυτής που καταναλώνεται, αποθηκεύεται ώστε να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη στιγμή όπου η παραγωγή έχει πέσει. Ρόλο σε VPP μπορούν να έχουν κάτω υπό προϋποθέσεις ακόμα και έξυπνα ηλεκτρικά οχήματα που διαθέτουν μπαταρίες για την τοπική κάλυψη φορτίων.

Τέτοιες εφαρμογές ήδη αποτελούν πραγματικότητα. Εργοστάσια εικονικής παραγωγής υπάρχουν και λειτουργούν σε Αμερική, και σε χώρες της Ευρώπης. Το μεγαλύτερο βρίσκεται στη Γερμανία, όπου διαχειρίζεται 12,6 MW ισχύς από ανεμογεννήτριες, 5,5 MW φωτοβολταϊκών και 4 MW συστημάτων με βιοαέριο διαθέτοντας 8,4 GWh αποθηκευτικής ικανότητας. Όλες οι μονάδες συνδυάζονται και παρακολουθούνται μέσω ενός έξυπνου συστήματος ελέγχου που επιτρέπει στους διαχειριστές να προσαρμόζονται στις διακυμάνσεις των ενεργειακών απαιτήσεων. Στο νησί Μπόρνχολμ της Δανίας αναμένεται σε λίγο καιρό το πιο ανεπτυγμένο τεχνολογικά όπου θα εξυπηρετεί τους 42.000 κατοίκους του.

Οι δυνατότητες που δημιουργούνται μέσω της επικοινωνίας δεν περιορίζονται μόνο στο κομμάτι της διαμόρφωσης της παραγωγής, αλλά επεκτείνονται τόσο στη μεταφορά και την κατανάλωση της. **Στόχος των VPP γενικότερα είναι η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας.** Με την υπάρχουσα ενεργειακή κατάσταση σε ώρες αιχμής θα πρέπει να αυξηθεί η παραγωγή ώστε να καλυφθεί η ζήτηση. Επομένως, η εταιρία ηλεκτρισμού θέτει σε λειτουργία τις εφεδρικές μονάδες γεγονός που αυξάνει κατά πολύ το κόστος. Στην περίπτωση ενός VPP όμως τα φορτία αιχμής μπορούν να καλυφθούν με διάφορους άλλους τρόπους όπως την αξιοποίηση αποθηκευμένης ενέργειας ή την απενεργοποίηση έξυπνων συσκευών ώστε να ελαφρυνθεί το δίκτυο. Επίσης, εμφανίζεται και η δυνατότητα γρήγορης πληροφόρησης για βλάβες και πιθανές αστοχίες ώστε να ληφθούν άμεσα οι αποφάσεις αποκατάστασής τους. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Για παράδειγμα σε περίπτωση που εμφανιστεί πρόβλημα σε ένα τμήμα του δικτύου, με γρήγορη πληροφόρηση του ζητήματος είναι δυνατή η άμεση δράση για την απομόνωση του συγκεκριμένου μόνο τμήματος και την ανεπηρέαστη συνέχιση της λειτουργίας του υπόλοιπου. Όταν η κατάσταση επιδιορθωθεί τότε το τμήμα αυτό θα μπορέσει να επανατροφοδοτηθεί με ενέργεια.

Στην προηγούμενη παράγραφο περιγράψαμε κάποιες από τις δυνατότητες που δημιουργούνται για το δίκτυο. Η επικοινωνία είναι αμφίδρομη και τα οφέλη της το ίδιο, επομένως κάτι αντίστοιχο γίνεται και για την πλευρά των καταναλωτών. Έτσι οι καταναλωτές, οι οποίοι έχουν ενεργή συμμετοχή, μπορούν στο μέλλον να παρακολουθούν και να ελέγχουν κατά βούληση την κατανάλωση ενέργειας. Μια δυνατότητα που μεταξύ άλλων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων, περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και καλύτερη προστασία του περιβάλλοντος.

#### *4.2.2 Χαρακτηριστικά*

Τα VPP αποτελούν κομμάτι του **έξυπνου δικτύου** (smart grid), το σχέδιο διασύνδεσης όλων των σημείων παραγωγής και κατανάλωσης μέσω δικτύων πληροφοριών. Θα μπορούν να εξασφαλίζουν ασφάλεια και σταθερότητα στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, εκμεταλλευόμενα καινοτόμες τεχνολογίες, ώστε να συμβαδίσουν με τις νέες πολιτικές και τα νέα επιχειρηματικά πλαίσια. Στη προσπάθεια μετάβασης σε αυτή τη νέα διαφορετική μορφή δικτύου συνεισφέρουν όλοι οι χρήστες (παραγωγοί και καταναλωτές). Συνοψίζοντας, τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου δικτύου που θα στηρίζεται στην επικοινωνία είναι:

- **Ευελιξία**, δηλαδή θα καλύπτει τις ανάγκες των καταναλωτών και θα ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις και τις προκλήσεις του μέλλοντος.
- **Προσβασιμότητα**, δηλαδή θα εγγυάται την πρόσβαση των χρηστών σε όλα τα δίκτυα, κυρίως σε ΑΠΕ και σε δίκτυα τοπικής παραγωγής με υψηλή απόδοση και χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές άνθρακα.
- **Αξιοπιστία**, δηλαδή θα διασφαλίζει και θα βελτιώνει την ασφάλεια και την ποιότητα της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας συμβαδίζοντας με τις απαιτήσεις της ψηφιακής εποχής.
- **Αποδοτικότητα**, χάρη στην εκμετάλλευση νέων τεχνολογιών και στη σωστή διαχείριση ενέργειας.
- **Οικονομία**, δηλαδή παροχή της καλύτερης αξίας μέσω καινοτομιών, αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας και ανταγωνισμός επί ίσοις όροις μέσω νομοθετικών ρυθμίσεων.

#### 4.2.3 Έξυπνοι μετρητές

Μία μορφή αισθητήρα είναι και οι έξυπνοι μετρητές (smart meters) οι οποίοι θα εγκαθίστανται στα σημεία κατανάλωσης αντικαθιστώντας τους σημερινούς μετρητές και θα αποστέλλουν τα ακριβή δεδομένα κατανάλωσης. Ουσιαστικά ένας έξυπνος μετρητής είναι μία συσκευή η οποία μετράει την ενέργεια που χρησιμοποιείται και στέλνει τις πληροφορίες στο σύστημα. Με τη χρήση τους θα υπάρχει μία αμφίδρομη μορφή επικοινωνίας καθώς εκτός από την αποστολή δεδομένων θα γίνεται και λήψη εντολών. Χάρη σε αυτή την ηλεκτρονική συσκευή ο χρήστης θα είναι σε θέση να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή πόση ενέργεια έχει καταναλώσει και το αντίστοιχο κόστος της. Αποτελούν ένα οικονομικό τρόπο για μέτρηση και παρακολούθηση της κατανάλωσης, που επιτρέπει στην καλύτερη ρύθμιση της παραγωγής βασιζόμενη σε ημερήσια δεδομένα πραγματικού χρόνου.

Οι έξυπνοι μετρητές θα έχουν την δυνατότητα να μετρούν άμεσα την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος και να μεταδίδουν τις μετρήσεις στις βάσεις δεδομένων στο κέντρο διαχείρισης. Ο καταναλωτής μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να έχει γνώση της πραγματικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε συνθήκες απελευθερωμένης αγοράς, οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας θα έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με τους καταναλωτές μέσω μηνυμάτων πάνω στον έξυπνο μετρητή και να προσφέρουν μειωμένες χρεώσεις κιλοβατώρας ή να κάνουν προσφορές ώστε να καταρτίσουν ειδικά προγράμματα χρέωσης με βάση τις ώρες κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση της τιμής της

κιλοβατώρας σε περιόδους αιχμής είναι μια μέθοδος που μπορεί να μειώσει την αντίστοιχη ζήτηση με αποτέλεσμα τεράστιο όφελος τόσο για τον παραγωγό όσο και την γενικότερη πολιτική εξοικονόμησης.

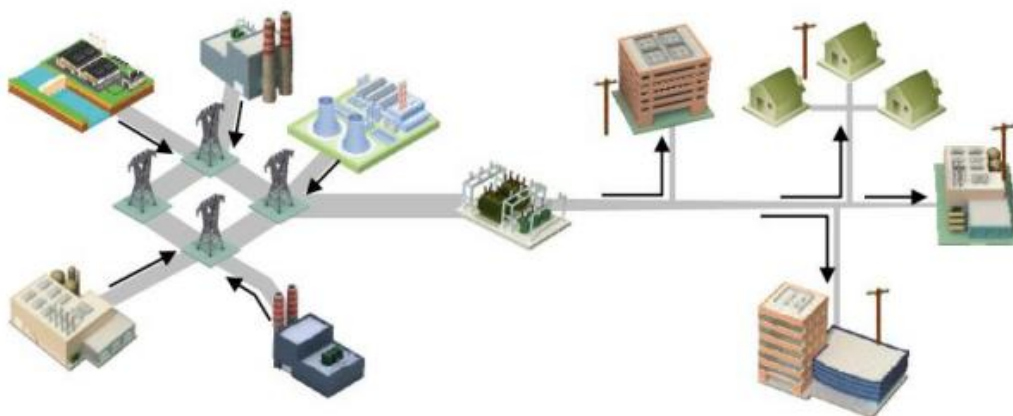
Ήδη σε χώρες όπως Ιταλία, Βρετανία και Η.Π.Α. έχει αρχίσει η εγκατάσταση τέτοιων μετρητών σε κατοικίες, δίνοντας τη δυνατότητα σε καταναλωτές να κερδίσουν κάποια μείωση στο λογαριασμό τους εξοικονομώντας ενέργεια όταν το δίκτυο τη χρειάζεται περισσότερο. Για παράδειγμα σε ώρες αιχμής έξυπνες συσκευές (smart appliances) θα ειδοποιούν για την απενεργοποίηση τους καθώς θα λαμβάνουν το κατάλληλο σήμα. Με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών οι μετρητές γίνονται όλο και φθηνότεροι με αποτέλεσμα μέσα στις επόμενες δεκαετίες να αναμένεται κάθε σπίτι να έχει το δικό του.

#### *4.3 Η μετάβαση σε νέες μορφές δικτύων*

Η σημερινή εποχή είναι ίσως η πλέον κατάλληλη για την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων. Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας σε συνδυασμό με το όλο και αυξανόμενο ενδιαφέρον σε ενεργειακά θέματα καθώς και οι τεχνολογικές εξελίξεις συντελούν προς αυτή την κατεύθυνση. Οι πολιτικές που ακολουθούνται από τις κυβερνήσεις ενθαρρύνουν τις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας με μειωμένες επιβλαβείς εκπομπές καθώς και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παράλληλα οι εξελίξεις στον τομέα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, της διαχείρισης φορτίου και της επικοινωνίας καθώς και η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας καθιστούν επιτακτική ανάγκη την επένδυση στη δημιουργία νέων δικτύων. Όλα αυτά οδηγούν στη δημιουργία ενός κοινού οράματος, τη δημιουργία των έξυπνων δικτύων. Τα νέα αυτά δίκτυα πρέπει να είναι ασφαλή, φιλικά προς το περιβάλλον και να συμφέρουν οικονομικά. Οι παράγοντες που πρέπει να απασχολήσουν τα δίκτυα του μέλλοντος στην Ευρώπη έχουν να κάνουν με:

- **Το περιβάλλον.** Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ορυκτών καυσίμων είναι ότι κατά την καύση τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκλύουν τοξικά αέρια (διοξείδιο του άνθρακα και του θείου, νιτρικά οξείδια) βλαβερά για το περιβάλλον. Τα αέρια του θερμοκηπίου, όπως αποκαλούνται, συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή η οποία είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις και απειλές που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα.

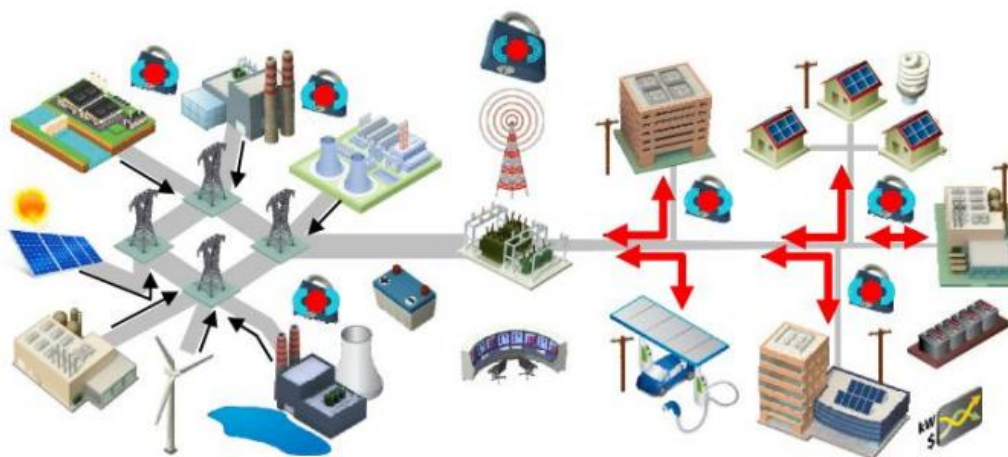
- **Την ασφάλεια και την ποιότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.** Η σύγχρονη κοινωνία εξαρτάται πολύ από την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας. Η παλαιότητα των δομών της μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας απειλούν την ασφάλεια, την ποιότητα και την αξιοπιστία της παροχής αυτής. Παράλληλα η μειωμένη διαθεσιμότητα ορυκτών καυσίμων σε αρκετές χώρες είναι ένας ανησυχητικός παράγοντας.
- **Την Ευρωπαϊκή εσωτερική αγορά.** Η εξέλιξη της αγοράς σε συνδυασμό με ένα αποδοτικό νομοθετικό πλαίσιο θα βοηθήσει στην οικονομική εξέλιξη της Ευρώπης. Ο αυξανόμενος ανταγωνισμός θα οδηγήσει σε νέες τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομίες. Έτσι η εσωτερική αγορά της Ευρώπης αναμένεται να παρέχει πολλά οφέλη στους Ευρωπαίους πολίτες όπως ένα μεγαλύτερο εύρος υπηρεσιών που θα οδηγήσει σε μείωση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας.



*Εικόνα 4.4: Δίκτυο του σήμερα*

Τα υπάρχοντα δίκτυα όπως έχουμε ήδη αναφέρει βασίζονται κυρίως σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής (εικόνα 4.4). Η διανομή και η μεταφορά της ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο μονοπωλιακά από δημόσιους φορείς ενώ αντίθετα στον τομέα της παραγωγής υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός. Η παροχή ισχύος και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται από κεντρικές εγκαταστάσεις και έτσι ελέγχονται διάφορες περιοχές από ένα μέρος. Υπάρχει λίγο έως καθόλου συμμετοχή του καταναλωτή και απουσιάζει εντελώς η επικοινωνία. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται υπάρχουν σχεδόν για ένα αιώνα και τα δίκτυα έχουν σχεδιασθεί να λειτουργούν βέλτιστα για τοπική κάλυψη. Οι διασυνδέσεις αναπτύχθηκαν κυρίως για αμοιβαία υποστήριξη μεταξύ χωρών και περιφερειών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης αλλά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για εμπορικούς λόγους.

Η φιλοδοξία είναι τα παγκόσμια δίκτυα ηλεκτρισμού να γίνουν «έξυπνα», βασισμένα πλέον στο πρωτόκολλο του internet και στην επικοινωνία (εικόνα 4.5). Τα μελλοντικά δίκτυα διανομής θα έχουν ενεργητικό ρόλο και πρέπει να εξασφαλίζουν αμφίδρομη ροή ισχύος. Τα Ευρωπαϊκά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν πλέον σε ένα πλαίσιο μοντέλου αγοράς στο οποίο οι μονάδες παραγωγής διανέμονται σύμφωνα με τις δυνατότητες της κάθε αγοράς και το κέντρο ελέγχου του δικτύου αναλαμβάνει ένα γενικό ρόλο εποπτείας (εξισορρόπηση ροής ενεργού ισχύος, έλεγχος σταθεροποίησης τάσης κλπ). Μία μεγάλη ποσότητα ηλεκτρισμού που τώρα παράγεται από μεγάλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής θα προέρχεται από διεσπαρμένη παραγωγή και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παράλληλα θα πραγματοποιείται και ηλεκτρική αποθήκευση για καλύτερη διαχείριση της ζήτησης ενέργειας. Ίσως είναι οικονομικά αποδοτικότερο να βρεθεί μία λύση για εξομάλυνση των αιχμών του φορτίου σε πανευρωπαϊκό επίπεδο παρά σε εθνικό. Αυτό όμως προϋποθέτει πολλές αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα διανομής και μεταφοράς αφού πολλές διασυνδέσεις μεταξύ των χωρών θα είναι απαραίτητες.



Εικόνα 4.5: Δίκτυο του αύριο

### 4.3.1 Σύγκριση MG με VPP

Μικροδίκτυα (MG) και εργοστάσια εικονικής παραγωγής ενέργειας (VPP) μοιράζονται την ίδια λογική όσον αφορά την διασυνδεδεμένη λειτουργία πολλών μονάδων παραγωγής. Οι δύο όροι λανθασμένα κάποιες φορές χρησιμοποιούνται ως ταυτόσημες έννοιες καθώς υπάρχουν συγκεκριμένες διαφορές ανάμεσά τους. Οι βασικότερες είναι οι εξής:



- Τα MG μπορούν να λειτουργήσουν είτε παράλληλα είτε απομονωμένα από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού. Τα VPP από την άλλη από τον ορισμό τους είναι συνυφασμένα με το δίκτυο.
- Δεδομένη στα MG είναι κάποια μορφή αποθηκευτικών μέσων της παραγόμενης ενέργειας, ενώ κάτι τέτοιο στα VPP δεν είναι υποχρεωτικό μιας και σκοπεύουν περισσότερη στην διαχείριση της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο.
- Τα MG βασίζονται σε ηλεκτρονικά ισχύος και έξυπνους διακόπτες ώστε να μεταβαίνουν ομαλά εντός και εκτός δικτύου, ενώ τα VPP σε έξυπνους μετρητές για τη σωστή επικοινωνία.
- Τα MG περιορίζονται σε μικρότερη γεωγραφική κάλυψη, ενώ τα VPP μπορούν να εξαπλωθούν σε πολύ μεγαλύτερο εύρος.

Η τελευταία είναι και η βασικότερη διαφορά που ξεχωρίζει τις δύο έννοιες μεταξύ του. Θεωρητικά ένα εργοστάσιο εικονικής παραγωγής ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί σε παγκόσμια κλίμακα. Πολύ σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι τα VPP κατά κάποιο τρόπο υπακούν καλύτερα στην υπάρχουσα νομοθετική πολιτική και μπορούν να εφαρμοστούν ευχερέστερα, σε σχέση με τα MG που έχουν να υπερβούν περισσότερα εμπόδια σε αυτό τον τομέα.

## 5. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

### 5.1 Εισαγωγή στο πρόβλημα

Αυτό που θα μελετηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το κατά πόσο μπορεί να βοηθήσει η εγκατάσταση μονάδας CHP σε ένα τυπικό νοικοκυριό στη μείωση του κόστους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του. Για να γίνει πιο κατανοητό το πρόβλημα θα γίνει αναφορά σε τρεις διαφορετικούς τρόπους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ενός νοικοκυριού.

Αρχικά, ας θεωρήσουμε ένα τυπικό νοικοκυριό το οποίο βασίζεται σε γνωστές συμβατικές τεχνολογίες ώστε να μπορέσει να ικανοποιήσει τις ενεργειακές του απαιτήσεις. Αγοράζει ρεύμα για να τροφοδοτήσει όλες τις ηλεκτρικές συσκευές (λαμπτήρες, ψυγείο, κουζίνα, ηλεκτρικός θερμοσίφωνας, air-conditioner κ.α.) και καύσιμο (πετρέλαιο/φυσικό αέριο) για το λέβητα ώστε να λειτουργήσουν τα σώματα καλοριφέρ. Έτσι, βασίζεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης και σε κάποια εταιρία πώλησης καυσίμων. Το τελικό κόστος φυσικά διαμορφώνεται από την τιμή ανά kWh πολλαπλασιαζόμενο επί την ποσότητα των δύο αγαθών που καταναλώθηκε για την κάλυψη των αναγκών.

Ο δεύτερος τρόπος αναφέρεται σε ένα νοικοκυριό με τις ίδιες ενεργειακές απαιτήσεις με τη διαφορά όμως ότι έγινε εγκατάσταση μονάδας CHP για την συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμού νερού. Βασιζόμενοι σε αυτό μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα σχετικά διαφορετικό τρόπο ώστε να κατηγοριοποιήσουμε τις ενεργειακές ανάγκες ενός σπιτιού:

1. **ανάγκη σε ηλεκτρικό ρεύμα** και
2. **ανάγκη σε ζεστό νερό**, όπου η χρήση του αφορά θέρμανση (σώματα καλοριφέρ) καθώς και καθαριότητα και προσωπική υγιεινή.

Σε αυτή την περίπτωση με την προσθήκη του CHP η κατοικία φαίνεται να εξαρτάται σε μικρότερο βαθμό από το δίκτυο ηλεκτροδότησης καθώς με μόνη αρχική πηγή κάποιο καύσιμο καλύπτονται τουλάχιστον μέχρι ενός σημείου και οι δύο τύποι ενεργειακών αναγκών που αναφέραμε. Ταυτόχρονα όμως έχουμε και μείωση του λειτουργικού κόστους χάρη στην καλύτερη αξιοποίηση της αρχικής ενέργειας και την πολύ υψηλή αποδοτικότητα των μονάδων συμπαραγωγής.

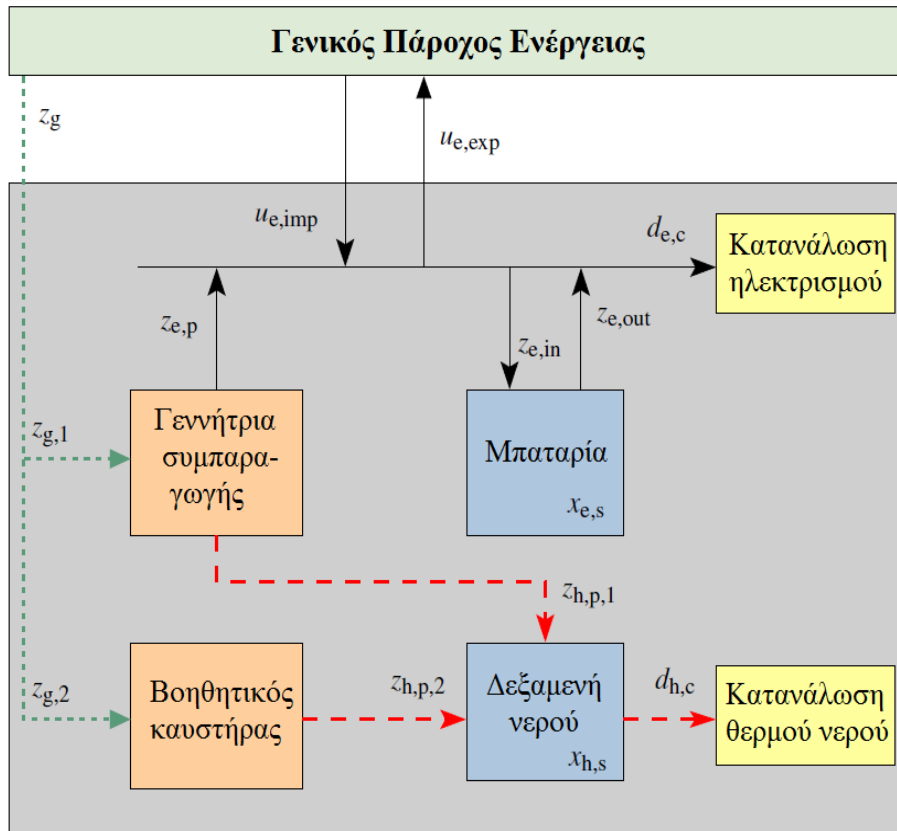
Μπορούμε όμως να προχωρήσουμε ένα βήμα παραπάνω και εκτός από την απλή εγκατάσταση του CHP να λειτουργήσουμε το σύστημα μας με **ρυθμιστή βασιζόμενο σε μοντέλο πρόβλεψης (MPC)**. Η μεθοδολογία MPC χρησιμοποιείται για να έχουμε την πλέον αποδοτική λειτουργία του CHP με αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος. Εκτιμώντας τις μελλοντικές ενεργειακές απαιτήσεις θα

μπορέσουμε να προσαρμόσουμε ανάλογα και τη λειτουργία του CHP. Ακόμη και σε περιπτώσεις που εμφανίζονται απότομες διακυμάνσεις στη ζήτηση εμείς θα έχουμε τη δυνατότητα πρόβλεψης και θα μπορέσουμε να προετοιμαστούμε κατάλληλα. Για παράδειγμα σε περιπτώσεις που η παραγωγή του CHP δεν είναι δυνατόν να καλύψει πλήρως τις ανάγκες μας σε ηλεκτρική ενέργεια, υπάρχει η δυνατότητα αγοράς της πρόσθετης απαιτούμενης ποσότητας ρεύματος από το δίκτυο. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα πώλησης ρεύματος πίσω στο δίκτυο στην περίπτωση που η παραγωγή του υπερβαίνει την κατανάλωση. Η μέθοδος MPC θα αναλυθεί εκτενέστερα στην ενότητα 5.3.1, προς το παρόν αρκεί να τονιστεί ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται από το προβλεπτικό μοντέλο είναι για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων με γνώμονα πάντα την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Έτσι, βασιζόμενοι στο γεγονός της δυνατότητας πρόβλεψης για τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμό νερό στο μέλλον καθώς και για τις τιμές αγοράς και πώλησης του ρεύματος θα μπορέσουμε να μειώσουμε αποτελεσματικά το λειτουργικό κόστος.

## *5.2 Περιγραφή του συστήματος*

Το σύστημα μας αποτελείται από ένα νοικοκυριό με συγκεκριμένες ενεργειακές ανάγκες το οποίο αλληλεπιδρά με το γενικό πάροχο ενέργειας (εικόνα 5.1). Στο νοικοκυριό έχει γίνει εγκατάσταση μονάδας μ-CHP η οποία αποτελείται από:

1. Τη γεννήτρια συμπαραγωγής τύπου Stirling, που μετατρέπει το φυσικό αέριο σε ηλεκτρισμό καθώς και θερμική ενέργεια σε μορφή ζεστού νερού.
2. Ένα βοηθητικό καυστήρα για επιπλέον παραγωγή θερμικής ενέργειας μέσω φυσικού αερίου.
3. Μία μπαταρία για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Μία δεξαμενή νερού για την αποθήκευση του θερμού νερού.



Νοικοκυριό

- = ροή ηλεκτρικού ρεύματος
- - - - - = ροή θερμού νερού
- ..... = ροή φυσικού αερίου

Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος

### Επεξήγηση των μεγεθών του συστήματος

- zg1** → καύσιμο που χρησιμοποιείται στη μηχανή συμπαραγωγής
- zg2** → καύσιμο που χρησιμοποιείται στο βοηθητικό καυστήρα
- zep** → ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη μηχανή συμπαραγωγής
- zhp** → θερμική ενέργεια που παράγεται από τη μηχανή συμπαραγωγής
- zhp2** → θερμική ενέργεια που παράγεται από τον βοηθητικό καυστήρα
- zein** → ηλεκτρική ενέργεια που εισέρχεται στη μπαταρία
- zeout** → ηλεκτρική ενέργεια που εξέρχεται από τη μπαταρία
- ueimp** → ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζουμε από το δίκτυο
- ueexp** → ηλεκτρική ενέργεια που πουλάμε στο δίκτυο
- dec** → δεδομένα κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος
- dhc** → δεδομένα κατανάλωσης θερμού νερού
- xes** → επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας στη μπαταρία

**xhs** → επίπεδο θερμικής ενέργειας στη δεξαμενή

Όλα τα μεγέθη έχουν μονάδα μέτρησης kWh.

Η γεννήτρια συμπαραγωγής καταναλώνει φυσικό αέριο για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμού νερού. Ο βοηθητικός καυστήρας καταναλώνει φυσικό αέριο για την μετατροπή του σε θερμική ενέργεια σε μορφή νερού. Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στη μπαταρία και η δεξαμενή γεμίζει από το θερμό νερό που παράγεται από τις δυο μονάδες μετατροπής. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα αγοράς και πώλησης ρεύματος από και προς το δίκτυο. Σύμφωνα με τις ιδιότητες αυτού του συστήματος θα γίνει η προσομοίωση ώστε να εφαρμοστεί η μέθοδος ελαχιστοποίησης του λειτουργικού κόστους.

### 5.3 Διαμόρφωση προβλήματος

Έχουμε να διαχειριστούμε ένα μαθηματικό πρόβλημα αριστοποίησης (συγκεκριμένα ελαχιστοποίησης) μιας συνάρτησης με ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς.

$$\begin{aligned} \min f(x_1, x_2, x_3 \dots), \text{ με} \\ g(x_1, x_2, x_3 \dots) = 0 \\ h(x_1, x_2, x_3 \dots) \geq 0 \end{aligned}$$

Προγραμματιστικά το πρόβλημά μας χαρακτηρίζεται ως μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (**Mixed Integer Linear Programming - MILP**). Αυτό σημαίνει πως δουλεύουμε τόσο με ακέραιες όσο και συνεχείς μεταβλητές. Επίσης, η αντικειμενική συνάρτηση κόστους και όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις. Για την επίλυση του προβλήματος θα χρησιμοποιήσουμε ως προγραμματιστικό περιβάλλον το Matlab R2008a με τη μέθοδο MPC. Απαραίτητα εργαλεία είναι ο επιλυτής (solver) MILP προβλημάτων ILOG της CPLEX και η YALMIP που είναι γλώσσα για προχωρημένη μορφή μοντελοποίησης συμβατή με τον τρόπο σύνταξης της Matlab. Για την επίλυση του προβλήματος σε κάθε προγραμματιστικό κύκλο διαβάζονται ταυτόχρονα όλοι οι περιορισμοί και υπολογίζονται οι τιμές που ταυτόχρονα ικανοποιούν τους περιορισμούς και ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν τη νέα αρχική κατάσταση για την οποία θα εκτελεστεί η ίδια διαδικασία, η οποία συνεχίζεται για όσο διάστημα βρίσκεται σε λειτουργία το σύστημα MPC.

### 5.3.1 Μέθοδος MPC

Η MPC ή **Model Predictive Control**, δηλαδή ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου, είναι μια προχωρημένη μέθοδος της θεωρίας ελέγχου η οποία υπάρχει και αναπτύσσεται από το 1980. Την τελευταία δεκαετία φαίνεται πως παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια επίλυσης προβλημάτων που εμφανίζουν πολύπλοκη δυναμική. Κάποια από τα πεδία που βρίσκει εφαρμογή έχουν να κάνουν με ρύθμιση διεργασιών σε βιομηχανίες, δίκτυα οδικής κυκλοφορίας, σιδηροδρομικά δίκτυα και ενεργειακά συστήματα.

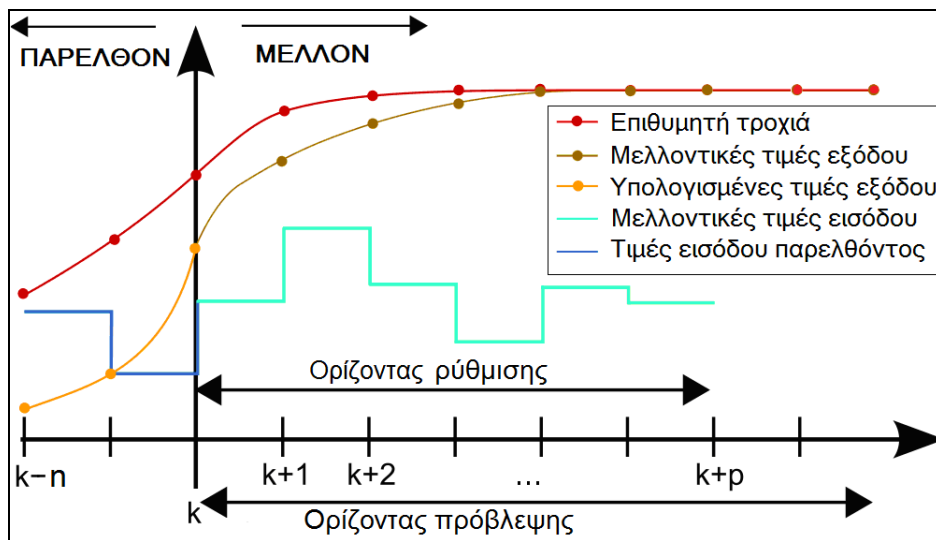
Η MPC χρησιμοποιείται συχνά σε προβλήματα όπου χρειάζονται διαδοχική επίλυση σε διακριτές χρονικές περιόδους. Η κάθε χρονική περίοδος λογίζεται ως ένα ξεχωριστό στάδιο ρύθμισης (control step). Η MPC βασίζεται στο γεγονός ότι παίρνει αποφάσεις για το παρόν βλέποντας το μέλλον. Εκμεταλλεύεται δηλαδή αυτό που λέμε **ορίζοντα πρόβλεψης** (planning/prediction horizon).

Ένα πρόβλημα αριστοποίησης το οποίο θα επιλυθεί με τη βοήθεια της μεθόδου MPC διαμορφώνεται από μία αντικειμενική συνάρτηση καθώς και ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς. Σκοπός είναι η εύρεση λύσης μέσω της αριστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να ικανοποιούνται ταυτόχρονα όλοι οι περιορισμοί. Ο αλγόριθμος επίλυσης συνοπτικά είναι ο εξής:

1. Αναγνώριση των αρχικών συνθηκών.
2. Αριστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης σύμφωνα με τους περιορισμούς για τον δεδομένο ορίζοντα πρόβλεψης και εφαρμογή του αποτελέσματος στο επόμενο στάδιο ρύθμισης.
3. Επιστροφή στο βήμα 1.

Αυτό που διαφοροποιεί αυτή τη μέθοδο από άλλες είναι ότι μπορούμε να επωφεληθούμε από το γεγονός ότι μπορούμε να προβλέψουμε τι θα συμβεί στο μέλλον για να πάρουμε ορθότερη απόφαση για την τωρινή μας δράση. Κοινό σημείο όλων των μεθοδολογιών MPC είναι η χρήση ενός μοντέλου για την πρόβλεψη των μεταβλητών εξόδου μιας διεργασίας, σε πεπερασμένο ορίζοντα πρόβλεψης. Οι αποφάσεις λαμβάνονται σύμφωνα με τις μελλοντικές τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού στον **ορίζοντα ρύθμισης** (μικρότερος ή ίσος του ορίζοντα πρόβλεψης). Εφόσον η βέλτιστη αλληλουχία μελλοντικών ρυθμιστικών κινήσεων προσδιοριστεί, μόνο η πρώτη τιμή των διανυσμάτων των μεταβλητών εφαρμόζεται τελικά στο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε στάδιο ρύθμισης αποφασίζεται μια σειρά από ενέργειες που πρέπει να λάβουν χώρα με σκοπό να υπολογιστεί η βέλτιστη λύση η οποία θα αποτελέσει και την αρχική κατάσταση του επόμενου. Κάθε φορά δηλαδή

λύνουμε ακριβώς το ίδιο πρόβλημα, αλλά με διαφορετικές αρχικές συνθήκες και με ενημερωμένες τις εκτιμήσεις εξέλιξης των στοχαστικών παραμέτρων του προβλήματος. Προχωρώντας ένα στάδιο μπροστά στην επίλυση προχωράμε και ένα στάδιο στον ορίζοντα ρύθμισης και στον ορίζοντα πρόβλεψης. Η βασική ιδέα που χαρακτηρίζει τους ρυθμιστές προβλεπτικού μοντέλου φαίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 5.2).



Διάγραμμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση ρυθμιστή προβλεπτικού μοντέλου

Θεωρητικά όσο μεγαλύτερος είναι ο ορίζοντας ρύθμισης τόσο καλύτερα θα είναι και τα αποτελέσματα που θα λάβουμε. Με άλλα λόγια όσο πιο μακριά μπορούμε να δούμε στο μέλλον τόσο πιο σωστά θα μπορέσουμε να αποφασίσουμε για το παρόν. Στην πράξη όμως αυτό δεν ισχύει ακριβώς έτσι. Ένας πολύ μεγάλος ορίζοντας μπορεί να επηρεάσει τη δυναμική του προβλήματος. Κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό, καθώς ένας από τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση των μεθόδων MPC είναι η ικανότητα του μοντέλου που χρησιμοποιούν (γραμμικό ή όχι) να αποδώσει τη δυναμική της διεργασίας. Επιπροσθέτως, θα αυξήσει κατά πολύ τις μεταβλητές του προβλήματος και κατά συνέπεια τις υπολογιστικές απαιτήσεις του ακόμα και μέχρι του σημείου να μην μπορεί να επιλυθεί. Από την άλλη μεριά, η επιλογή πολύ μικρού ορίζοντα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό του συστήματός μας σε μια κατάσταση όπου δεν θα μπορεί να διαφύγει για να συνεχίσει λόγω περιορισμών. Επομένως, η επιλογή πρέπει να είναι τέτοια ώστε να καλύπτει δυναμικά το πρόβλημα και ταυτόχρονα να μην το επιβαρύνει υπολογιστικά.

Η ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου παρουσιάζει μία σειρά από πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων, με κυριότερα τα εξής:

- Η περίπτωση πολυμεταβλητού συστήματος μπορεί να αντιμετωπισθεί με ευκολία.
- Είναι πολύ χρήσιμη όταν η μελλοντική επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος (π.χ. ρομποτικοί βραχίονες) είναι εκ των προτέρων γνωστή.
- Είναι μία εξ'ολοκλήρου ανοιχτή μεθοδολογία βασισμένη σε συγκεκριμένες βασικές αρχές γεγονός που επιτρέπει μελλοντικές επεκτάσεις.
- Λαμβάνει υπόψη τους νεκρούς χρόνους του συστήματος.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ρύθμιση ενός μεγάλου φάσματος διεργασιών, που παρουσιάζουν είτε σχετικά απλή, είτε ιδιαίτερα πολύπλοκη δυναμική συμπεριφορά, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων με μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις ή αστάθειες.
- Είναι ιδιαίτερα ελκυστική για χρήση από προσωπικό με περιορισμένη γνώση προχωρημένης ρύθμισης διότι οι αρχές της είναι απλές και ταυτόχρονα η βαθμονόμηση του ρυθμιστή είναι σχετικά εύκολη.
- Ο ρυθμιστής που προκύπτει βασίζεται σε έναν εύκολα εφαρμόσιμο, γραμμικό κανόνα ρύθμισης.
- Οι επεκτάσεις που αφορούν την εισαγωγή περιορισμών είναι θεωρητικά απλές και επιτρέπουν την συστηματική εισαγωγή τους κατά την διαδικασία σχεδιασμού.

Ωστόσο υπάρχουν, όπως είναι αναμενόμενο και μερικά μειονεκτήματα που αφορούν κυρίως την εφαρμογή στην βιομηχανία. Καταρχήν, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μοντέλου που να αποδίδει την δυναμική της διεργασίας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο προσδιορισμός θεμελιωδών εξισώσεων, που να βασίζονται στην φυσική του συστήματος, συχνά δεν είναι εύκολος σε μία βιομηχανική μονάδα και επομένως είναι προτιμότερη η ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων, τα οποία ωστόσο πάντα συνοδεύονται από ένα σφάλμα. Επίσης, παρόλη την πρόοδο των υπολογιστικών συστημάτων, το πρόβλημα της υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο είναι υπαρκτό, ιδιαίτερα στην περίπτωση χρήσης μη γραμμικών μοντέλων σε συνδυασμό με περιορισμούς. Εκτός του γεγονότος ότι απαιτείται η εύρεση λύσης που να ικανοποιεί τους περιορισμούς στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εφαρμογών της μεθόδου, ιδιαίτερη σημασία έχει και η ποιότητα της λύσης για την καλή απόκριση του συστήματος.



Η κλασική εφαρμογή της μεθόδου MPC είναι για προβλήματα τετραγωνικού προγραμματισμού (βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης με τετραγωνικούς όρους μέσω γραμμικών περιορισμών) που στόχος είναι η παρακολούθηση μιας συγκεκριμένης τροχιάς αναφοράς. Σε αντίθεση με αυτό, στο πρόβλημα που διαμορφώνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόζεται μέθοδος MPC που χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης λειτουργικού κόστους στο εύρος του ορίζοντα πρόβλεψης, η οποία αναφέρεται και ως Cost MPC.

### *5.4 Μοντελοποίηση*

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί το δυναμικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του συστήματος και τον προσδιορισμό των βέλτιστων αποφάσεων ρύθμισης του συστήματος σύμφωνα με τη μεθοδολογία MPC. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί που απαρτίζουν το μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης MPC με όλες τις μεταβλητές και παραμέτρους και τη σημασία τους. Το πρόβλημα MPC διαμορφώνεται και επιλύεται σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή με ορίζοντα πρόβλεψης **phor** ίσο με τον ορίζοντα ρύθμισης **chor**. Ο δείκτης  $k$  που θα χρησιμοποιηθεί στις παρακάτω εξισώσεις λαμβάνει σε κάθε διαμόρφωση του προβλήματος όλες τις ακέραιες τιμές από το 1 ως τον ορίζοντα ρύθμισης.

#### *5.4.1 Γεννήτρια συμπαραγωγής*

Η μοντελοποίηση στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε συγκεκριμένους λειτουργικούς περιορισμούς των μονάδων, που κάθε ένας έχει το δικό του σκοπό. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να είναι αρκετοί και διαφορετικής φύσεως. Συγκεκριμένα για τη γεννήτρια συμπαραγωγής πρέπει να λάβουμε υπόψη πως δεν είναι δυνατή η συνεχής εναλλαγή από κατάσταση εντός σε κατάσταση εκτός λειτουργίας. Όταν η μονάδα τεθεί σε λειτουργία τότε θα πρέπει να παραμείνει ανοιχτή τουλάχιστον για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτό γίνεται για τον περιορισμό του κόστους συντήρησης και της φθοράς τους στο χρόνο. Το συνεχές άνοιγμα-κλείσιμο με μεσολάβηση μικρού διαστήματος χρόνου είναι αυτό που προκαλεί επιβάρυνση. Στη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος **UT** η οποία συμβολίζει την υποχρέωση του CHP να παραμένει σε λειτουργία για τουλάχιστον **UT** ακέραιες χρονικές περιόδους από τη στιγμή που ενεργοποιείται. Ειδικά για την πρώτη χρονική περίοδο χρησιμοποιείται η παράμετρος **UT0** που

προκύπτει από τα ιστορικά δεδομένα λειτουργίας του συστήματος CHP στο πρόσφατο παρελθόν (αν για παράδειγμα βρίσκεται ήδη σε λειτουργία για 2 συνεχόμενες περιόδους τότε η παράμετρος  $UT_0$  θα προκύψει αν αφαιρέσουμε την τιμή 2 από το  $UT$ ). Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατάστασης λειτουργίας της γεννήτριας σε κάθε χρονική περίοδο  $k$  χρησιμοποιούνται οι δυαδικές μεταβλητές  $W$ ,  $Y$  και  $X$ . Η κάθε μια συνδέεται με μια συγκεκριμένη λειτουργία.

- $W(k) = \begin{cases} 1, & \text{όταν το CHP είναι σε λειτουργία} \\ 0, & \text{όταν το CHP είναι εκτός λειτουργίας} \end{cases}$
- $Y(k) = \begin{cases} 1, & \text{την περίοδο που το CHP τίθεται σε λειτουργία} \\ 0, & \text{οποιαδήποτε άλλη περίοδο} \end{cases}$
- $X(k) = \begin{cases} 1, & \text{την περίοδο που το CHP τίθεται εκτός λειτουργίας} \\ 0, & \text{οποιαδήποτε άλλη περίοδο} \end{cases}$

Οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιούνται στις σχέσεις που ακολουθούν οι οποίες επιβάλλουν τους απαιτούμενους περιορισμούς στη λειτουργία του συστήματος συμπαραγωγής.

$$W(k+1) - W(k) = Y(k+1) - X(k+1) \quad (1)$$

$$Y(k) + X(k) \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^{UT_0} W(l) \geq UT_0 \quad (3)$$

$$\sum_k^{\min(k+UT-1, chor)} W(k) \geq \min(UT, chor - k + 1) \cdot Y(k) \quad (4)$$

Οι σχέσεις εκτός από την (3) περιέχουν τον δείκτη  $k$  και όπως αναφέρθηκε πιο πάνω εφαρμόζονται σε κάθε χρονική στιγμή ως το τέλος του ορίζοντα ρύθμισης. Οι δύο πρώτες σχέσεις αναφέρονται στην ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της γεννήτριας. Η τρίτη υποχρεώνει τη λειτουργία του CHP για τουλάχιστον  $UT_0$  περιόδους από την αρχή του ορίζοντα ρύθμισης. Τέλος, η τέταρτη αναγκάζει τη γεννήτρια να παραμένει ανοιχτή για τουλάχιστον  $UT$  μονάδες χρόνου μετά τη στιγμή ενεργοποίησης της.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τις σχέσεις που εκφράζουν τη μετατροπή του φυσικού αερίου σε ωφέλιμη ενέργεια, οι οποίες στηρίζονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του CHP. Επειδή σε αρκετές

περιπτώσεις γνωρίζουμε μόνο το συνολικό βαθμό απόδοσης **toteff** και την αναλογία **hpr** ενός CHP, για ευκολία χρησιμοποιήθηκαν αυτές οι μεταβλητές. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα **toteff** είναι το άθροισμα ηλεκτρικού και θερμικού βαθμού απόδοσης και το **hpr** δεν είναι τίποτα άλλο από το πηλίκο θερμικού προς ηλεκτρικού. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια όπως είναι λογικό προκύπτει από το γινόμενο του καυσίμου που καταναλώθηκε επί τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης. Ή αλλιώς:

$$z_{ep}(k) = \frac{toteff}{1 + hpr} \cdot z_{g1}(k) \quad (5)$$

Αντίστοιχα, η θερμική ενέργεια που παράγεται υπολογίζεται από το γινόμενο του καυσίμου που καταναλώθηκε επί τον θερμικό βαθμό απόδοσης.

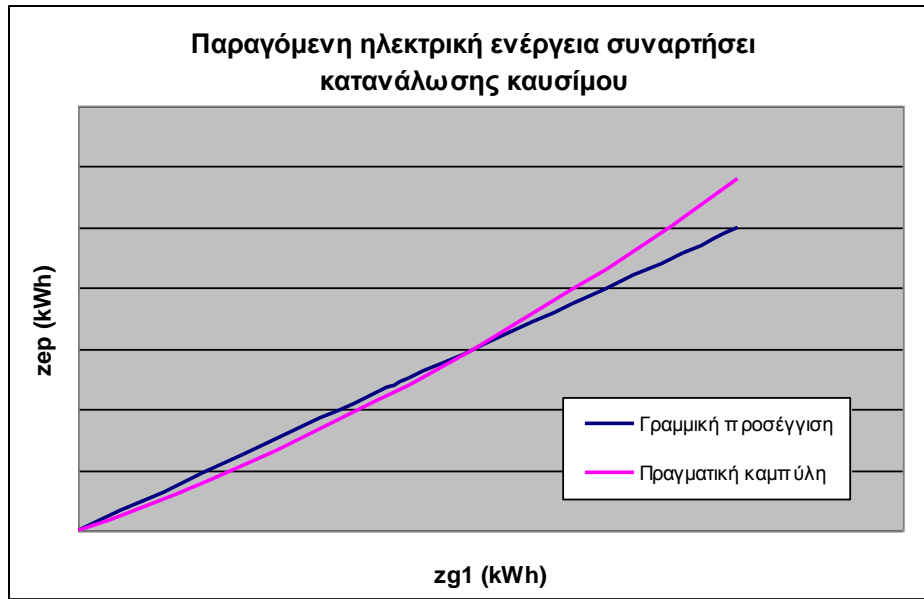
$$z_{hp}(k) = \frac{toteff \cdot hpr}{1 + hpr} \cdot z_{g1}(k) \quad (6)$$

Το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται καθορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$W(k) \cdot E_{min} \leq z_{ep}(k) \leq W(k) \cdot E_{max} \quad (7)$$

όπου  $E_{min}$ ,  $E_{max}$  είναι τα τεχνικά όρια του συστήματος συμπαραγωγής ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρούμε ότι όταν το CHP είναι εκτός λειτουργίας ( $W=0$ ) τότε  $z_{ep}=0$ . Στην αντίθετη περίπτωση ( $W=1$ ) η παραγωγή επιλέγεται μέσα από το εύρος τιμών  $[E_{min}, E_{max}]$ .

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθούμε σε μία σημαντική παραδοχή. Θεωρούμε πως η σχέση που συνδέει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την κατανάλωση καυσίμου είναι γραμμική με κλίση έναν σταθερό συντελεστή (σχέση 5). Αυτό στην πραγματικότητα δεν ισχύει καθώς σε υψηλότερα επίπεδα λειτουργίας εμφανίζονται μεγαλύτεροι συντελεστές μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.3. Η γραμμικότητα της σχέσης εξυπηρετεί προγραμματιστικούς σκοπούς διότι σε περίπτωση μη γραμμικότητας δεν θα μπορούσαμε να διαμορφώσουμε το πρόβλημα ως MILP. Όπως όμως διαπιστώνουμε από το διάγραμμα 5.3 το σφάλμα κινείται σε αποδεκτά όρια, ενώ η παραδοχή της γραμμικότητας αποτελεί συνηθισμένη πρακτική ακόμη και σε προβλήματα σχεδιασμού τέτοιων συστημάτων.



Διάγραμμα 5.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει κατανάλωσης καυσίμου

#### 5.4.2 Βοηθητικός καυστήρας

Αντίστοιχα με τις μεταβλητές που αναφέρθηκαν για το CHP έτσι και ο καυστήρας θα έχει σε κάθε διακριτή χρονική περίοδο κατανάλωση καυσίμου  $z_{g2}(k)$  και παραγωγή θερμικής ενέργειας και μόνον  $z_{hp2}(k)$ . Η δυαδική μεταβλητή  $u_{2tmp}(k)$  είναι αυτή που υποδεικνύει εάν ο καυστήρας λειτουργεί ή όχι. Όταν  $u_{2tmp}(k)=0$  τότε ο καυστήρας είναι απενεργοποιημένος και όταν  $u_{2tmp}(k)=1$  είναι ανοιχτός τη χρονική περίοδο  $k$ . Η μεταβλητή αυτή είναι αντίστοιχη της  $W$  για το CHP. Η κατανάλωση καυσίμου του βοηθητικού καυστήρα δεν είναι μεταβαλλόμενη όπως αυτή της γεννήτριας συμπαραγωγής, αλλά είναι σταθερή και ίση με  $u_{2max}$ , όταν βέβαια αυτός βρίσκεται σε λειτουργία. Ο συντελεστής μετατροπής του φυσικού αερίου σε θερμική ενέργεια είναι  $aux_{eff}$ . Έτσι έχουμε:

$$z_{g2}(k) = u_{2max} \cdot u_{2tmp}(k) \quad (8)$$

$$z_{hp2}(k) = aux_{eff} \cdot z_{g2}(k) \quad (9)$$

Ο δεύτερος βασικός λειτουργικός περιορισμός που λαμβάνουμε υπόψη αφορά τη λειτουργία του βοηθητικού καυστήρα η οποία εξαρτάται άμεσα από αυτή του CHP. Σύμφωνα με αυτόν ο καυστήρας δεν μπορεί να τεθεί σε λειτουργία αν δεν λειτουργεί παράλληλα η γεννήτρια συμπαραγωγής. Υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης

λειτουργίας και των δύο, αλλά όχι μόνο του καυστήρα. Αυτό με τη λογική ότι προτεραιότητα για την κάλυψη των αναγκών μας δίνεται στη γεννήτρια συμπαραγωγής. Για το σκοπό αυτό στο μοντέλο μας χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$u2tmp(k) - W(k) \leq 0 \quad (10)$$

Η σχέση αυτή ικανοποιείται με τα παρακάτω σενάρια:

- $u2tmp=0$  και  $W=0$
- $u2tmp=0$  και  $W=1$
- $u2tmp=1$  και  $W=1$

Η μόνη περίπτωση που δεν ικανοποιείται είναι ο συνδυασμός  $u2tmp=1$  και  $W=0$ . Χάριν όμως στον περιορισμό, αυτός ο συνδυασμός αποτρέπεται και έτσι διασφαλίζεται το ζητούμενο μας.

#### 5.4.3 Αποθηκευτικές μονάδες-ισοζύγια

Έχοντας αναφέρει τις σχέσεις μοντελοποίησης για τη γεννήτρια συμπαραγωγής και τον βοηθητικό καυστήρα πρέπει να κάνουμε το ίδιο για τη μπαταρία και τη δεξαμενή νερού. Οι δύο μονάδες χαρακτηρίζονται από άνω και κάτω όρια. Η χωρητικότητα της δεξαμενής κυμαίνεται από **xhsmin** ως **xhsmax** και τα αντίστοιχα όρια της μπαταρίας είναι **xesmin** και **xesmax**. Για να διασφαλιστεί ότι οι τιμές του περιεχομένου στις δύο μονάδες δεν θα τεθούν εκτός των ορίων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$xhsmin \leq xhs(k) \leq xhsmax \quad (11)$$

$$xesmin \leq xes(k) \leq xesmax \quad (12)$$

Το περιεχόμενο των δύο μονάδων υπολογίζεται κάθε φορά σύμφωνα με τα κατάλληλα ισοζύγια.

$$xes(k+1) = xes(k) + zein(k) - zeout(k) \quad (13)$$

$$xhs(k+1) = xhs(k) + zhp1(k) + zhp2(k) - dhc(k) \quad (14)$$

Το επίπεδο αποθηκευμένης ενέργειας στη μπαταρία αυξάνεται από το ρεύμα που εισέρχεται και μειώνεται από το ρεύμα που εξέρχεται. Όσον αφορά αυτό της δεξαμενής νερού αυξάνεται από την ενέργεια που

παράγουν και οι δύο μονάδες και μειώνεται από την κατανάλωση θερμού νερού.

Το βασικό ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$ze_{p}(k) + ue_{imp}(k) + ze_{out}(k) - ue_{exp}(k) - ze_{in}(k) - dec(k) = 0 \quad (15)$$

Με άλλα λόγια αυτό σημαίνει πως η ενέργεια που απαιτείται για την ικανοποίηση της ανάγκης για ηλεκτρική ενέργεια στο νοικοκυριό ισούται με το άθροισμα της ενέργειας που παράγεται από το CHP συν το ποσό ενέργειας που προέρχεται από την μπαταρία συν το ποσό που αγοράζουμε από το δίκτυο μείον το άθροισμα της ενέργειας που αποθηκεύεται στη μπαταρία και αυτής που πουλάμε πίσω στο δίκτυο.

Η επικοινωνία με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού μοντελοποιήθηκε μέσω της δυαδικής μεταβλητής **switchbuysell**. Όταν αγοράζουμε ρεύμα από το δίκτυο η μεταβλητή παίρνει την τιμή 1, ενώ όταν πουλάμε σε αυτό παίρνει την τιμή 0. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούμε για τη μοντελοποίηση είναι:

$$0 \leq ue_{imp}(k) \leq 10 \cdot switchbuysell(k) \quad (16)$$

$$0 \leq ue_{exp}(k) \leq 10 \cdot (1 - switchbuysell(k)) \quad (17)$$

Οι παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιήθηκαν ώστε να τεθεί ο περιορισμός του ότι μπορούμε να πουλήσουμε ή να αγοράσουμε έως και 10 kWh ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χρονική περίοδο. Τέλος, για να εξασφαλίσουμε πως θα δεν αγοράσουμε περισσότερη ενέργεια απ'όση χρειαζόμαστε, χρησιμοποιήσαμε την:

$$ue_{imp}(k) - dec(k) \leq 0 \quad (18)$$

Η εξίσωση αυτή απαγορεύει την αγορά ενέργειας από το δίκτυο με σκοπό τη μεταπώλησή της σε επόμενη χρονική περίοδο σε υψηλότερη τιμή.

5.4.4 Αντικειμενική συνάρτηση

Σκοπός του προβλεπτικού μοντέλου που περιγράψαμε είναι η αθροιστική ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους στο εύρος του ορίζοντα ρύθμισης ικανοποιώντας όλους τους περιορισμούς σε κάθε διαδοχικό στάδιο. Η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής:

$$ΑΣΚ = \sum_{k=1}^{chor} [pf(k) \cdot [zg1(k) + zg2(k)] + pimpr(k) \cdot ueimpr(k) - rexpr(k) \cdot ueexpr(k)] \quad (19)$$

όπου

$pf$  η τιμή καυσίμου ανά kWh

$pimpr$  η τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ανά kWh

$rexpr$  η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο ανά kWh.

Οι τιμές αγοράς φυσικού αερίου ανά kWh αλλά και οι τιμές  $pimpr$  και  $rexpr$  δεν παραμένουν απαραίτητα σταθερές, αλλά μπορούν να διαφοροποιούνται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Σε κάθε κύκλο ρύθμισης ζητούμενο είναι να καλυφθούν οι δεδομένες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμό νερό με τις κατάλληλες όμως αποφάσεις που θα ελαχιστοποιούν το λειτουργικό κόστος. Έτσι, θα πρέπει να αποφασιστεί αν είναι οικονομικά συμφέρον να λειτουργήσει η γεννήτρια συμπαραγωγής ή αν είναι καλύτερο να αξιοποιηθεί το περιεχόμενο των αποθηκευτικών μονάδων. Στην περίπτωση που κριθεί πως το CHP πρέπει να τεθεί σε λειτουργία πρέπει να καθοριστεί και το ποσό της παραγόμενης ενέργειας καθώς και η πιθανή λειτουργία του βοηθητικού καυστήρα. Επίσης, πρέπει να αποφασιστεί αν η ευθύνη εκπλήρωσης των απαιτήσεων σε ηλεκτρικό ρεύμα συμφέρει να μοιραστεί μεταξύ CHP και δικτύου. Ακόμα ένα πιθανό σενάριο είναι το CHP να παραμείνει σε λειτουργία για μεγάλο χρονικό διάστημα ώστε να παραχθεί και να αποθηκευτεί περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό την πώληση της όταν η τιμή είναι συμφέρουσα. Τέλος, στην περίπτωση περισσότερων της μίας μονάδων μπορεί να είναι ωφέλιμη η μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος από μία σε κάποια άλλη. Ο συνδυασμός των κατάλληλων αποφάσεων είναι αυτός που θα αποφέρει την μεγαλύτερη ελαχιστοποίηση του κόστους.

Για να μπορέσει το μοντέλο να λάβει αυτές τις αποφάσεις θα πρέπει πριν από τη διαμόρφωση και επίλυση του προβλήματος σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή, να γνωρίζει την κατάσταση του συστήματος, η οποία καθορίζεται από το επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας στη μπαταρία  $xes$ , το

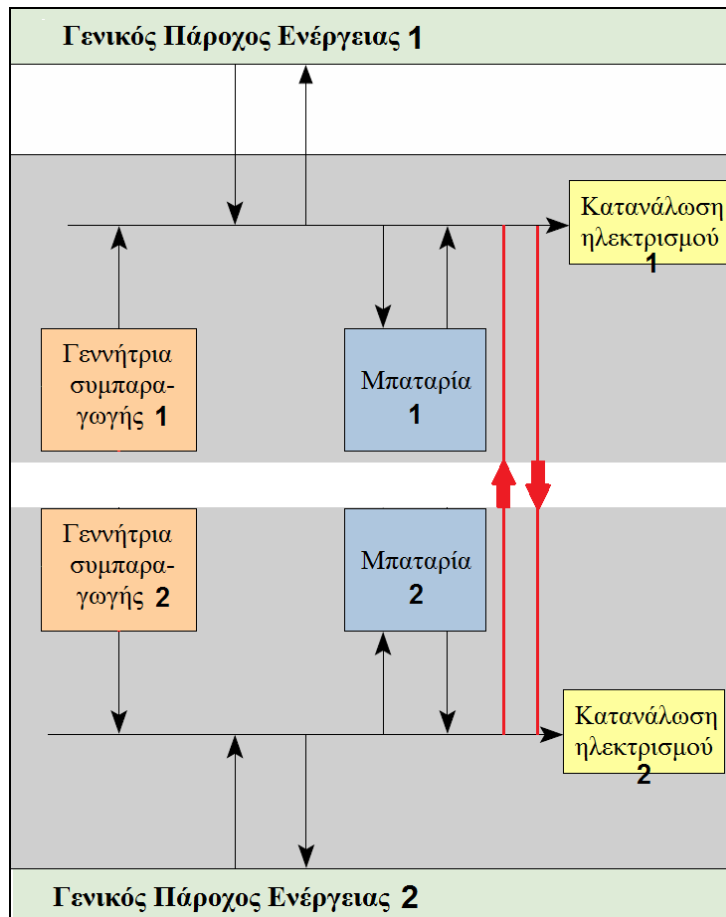
επίπεδο θερμού νερού που βρίσκεται στη δεξαμενή *xhs* και την υποχρέωση της γεννήτριας συμπαραγωγής *UTO*. Στη συνέχεια διαβάζοντας ταυτόχρονα όλους τους ισότιμους περιορισμούς που περιγράψαμε, επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης στον επιλεγμένο ορίζοντα ρύθμισης. Η πρώτη τιμή όλων των διανυσμάτων των μεταβλητών αποτελούν και τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης που εφαρμόζονται για εκείνο τον κύκλο.

#### *5.4.5 Περισσότερες μονάδες συμπαραγωγής*

Οι σχέσεις που αναφέρθηκαν περιγράφουν τους ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς του προβλήματος καθώς και την αντικειμενική συνάρτηση σε επίπεδο μιας μονάδας συμπαραγωγής. Με τον όρο «μονάδα» εννοούμε ότι ακριβώς περιγράψαμε στην ενότητα 5.2, δηλαδή μία γεννήτρια συμπαραγωγής, έναν βοηθητικό καυστήρα και τα αποθηκευτικά στοιχεία. Κάθε μονάδα αλληλεπιδρά με το δικό της γενικό πάροχο ενέργειας και βασική της υποχρέωση είναι να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του νοικοκυριού στο οποίο είναι εγκατεστημένη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η μελέτη της δυνατότητας συνεργασίας πολλών τέτοιων μονάδων που ικανοποιούν διαφορετικούς καταναλωτές σε επίπεδο γειτονιάς διαμορφώνοντας έτσι ένα μικροδίκτυο, με την θεώρηση ότι υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των συστημάτων. Η έρευνα μπορεί να επεκταθεί και στη διαμόρφωση ενός VPP χρησιμοποιώντας τέτοιου τύπου μονάδες που θα μπορούσαν πλέον να είναι και απομακρυσμένες η μία από την άλλη. Σε αυτήν την ενότητα της διπλωματικής εργασίας θα εξεταστεί η περίπτωση διασυνδεδεμένης λειτουργίας πολλών τέτοιων μονάδων. Με αυτό τον τρόπο μπορεί ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε στη μία να αξιοποιηθεί σε κάποια άλλη. Η διασύνδεση αφορά μόνο στην ανταλλαγή ηλεκτρικής και όχι θερμικής ενέργειας και δίνει νέες δυνατότητες για την ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ



*Εικόνα 5.2: Παράδειγμα σύνδεσης δύο μονάδων*

Η εικόνα 5.2 αντιστοιχεί στην περίπτωση διασύνδεσης δύο μονάδων συμπαραγωγής. Για την περιγραφή του συστήματος όλες οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα εκτός της εξίσωσης (15) εφαρμόζονται σε κάθε σύστημα ξεχωριστά. Προστίθενται όμως στο μοντέλο μας δύο ακόμα μεταβλητές. Μία για τη μεταφορά από την πρώτη στη δεύτερη μονάδα και άλλη μια αντίστοιχα για τη μεταφορά από τη δεύτερη στην πρώτη μονάδα. Οι τιμές των μεταβλητών μπορούν να αποθηκευτούν στον παρακάτω πίνακα:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \rightarrow 1 & 1 \rightarrow 2 \\ 2 \rightarrow 1 & 2 \rightarrow 2 \end{bmatrix}$$

Βεβαίως δεν υφίσταται μεταφορά από μία μονάδα στον εαυτό της. Επομένως, τα στοιχεία της διαγωνίου ισούνται με το μηδέν. Παρατηρούμε ότι ο πίνακας είναι τετραγωνικός με τον αριθμό των γραμμών και των στηλών του να είναι ίσος με το πλήθος των μονάδων. Για τρεις μονάδες θα έχουμε:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

$$A = \begin{bmatrix} 1 \rightarrow 1 & 1 \rightarrow 2 & 1 \rightarrow 3 \\ 2 \rightarrow 1 & 2 \rightarrow 2 & 2 \rightarrow 3 \\ 3 \rightarrow 1 & 3 \rightarrow 2 & 3 \rightarrow 3 \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας είναι όπως αναμενόταν 3x3, με τα στοιχεία της διαγωνίου μηδενικά και περιέχει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς της συνδεσμολογίας. Η μονάδα ένα μπορεί να δώσει ρεύμα στις δύο και τρία και αντίστοιχα να πάρει από αυτές. Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που δίνει εμφανίζεται στα στοιχεία της πρώτης γραμμής και η τιμή που λαμβάνει στα στοιχεία της πρώτης στήλης. Κάτι παρόμοιο ισχύει και για τις άλλες δύο μονάδες. Στη γενική περίπτωση n σε πλήθος μονάδων θα είχαμε ένα πίνακα nxn.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \rightarrow 2 & 1 \rightarrow 3 & 1 \rightarrow 4 & 1 \rightarrow 5 & & 1 \rightarrow n \\ 2 \rightarrow 1 & 0 & 2 \rightarrow 3 & 2 \rightarrow 4 & 2 \rightarrow 5 & & 2 \rightarrow n \\ 3 \rightarrow 1 & 3 \rightarrow 2 & 0 & 3 \rightarrow 4 & 3 \rightarrow 5 & \dots & 3 \rightarrow n \\ 4 \rightarrow 1 & 4 \rightarrow 2 & 4 \rightarrow 3 & 0 & 4 \rightarrow 5 & & 4 \rightarrow n \\ 5 \rightarrow 1 & 5 \rightarrow 2 & 5 \rightarrow 3 & 5 \rightarrow 4 & 0 & & 5 \rightarrow n \\ & & \vdots & & & \ddots & \\ n \rightarrow 1 & n \rightarrow 2 & n \rightarrow 3 & n \rightarrow 4 & n \rightarrow 5 & & 0 \end{bmatrix}$$

Κάθε στοιχείο του πίνακα αντιστοιχεί σε μια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρθηκε μεταξύ δύο μονάδων. Στην περίπτωση που δεν υπήρξε μεταφορά από μία μονάδα σε μια άλλη τότε το αντίστοιχο στοιχείο όπως είναι λογικό ισούται με το μηδέν. Αυτό που μας ενδιαφέρει στη μοντελοποίηση είναι το συνολικό ποσό ρεύματος που δίνει και παίρνει μία μονάδα. Η απάντηση σε αυτό το ζήτημα δίνεται αν για κάθε μονάδα αθροίσουμε την αντίστοιχη γραμμή και στήλη. Για παράδειγμα η συνολική ποσότητα που δίνει η μονάδα 4 υπολογίζεται από το άθροισμα της τέταρτης γραμμής, ενώ η ποσότητα ενέργειας που λαμβάνει η μονάδα δίνεται από το άθροισμα της τέταρτης στήλης. Για κάθε μονάδα ισχύει:

$$A(i, 1) + A(i, 2) + A(i, 3) + \dots + A(i, n) = \sum_{\lambda=1}^n A(i, \lambda)$$

$$A(1, i) + A(2, i) + A(3, i) + \dots + A(n, i) = \sum_{\lambda=1}^n A(\lambda, i)$$

όπου με  $i = 1 \dots n$  συμβολίζεται η κάθε μονάδα ξεχωριστά.

Η πληροφορία των αθροισμάτων για κάθε χρονική στιγμή αποθηκεύεται στα διανύσματα **Eltrtaken** και **Eltrgiven** που είναι chor θέσεων όπως όλα

όσα έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής. Πλέον είμαστε σε θέση να γράψουμε το νέο βασικό ισοζύγιο ενέργειας το οποίο αντικαθιστά την εξίσωση (15) και γίνεται:

$$\begin{aligned} zep_i(k) + ueimp_i(k) + zeout_i(k) - ueexp_i(k) - \\ zein_i(k) - dec_i(k) + Eltrtaken_i(k) - Eltrgiven_i(k) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 6.1 Δεδομένα

Για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους χρησιμοποιούμε τις τιμές του φυσικού αερίου και του ρεύματος που ισχύουν στην ελληνική αγορά. Η διαμόρφωση της τιμής χρέωσης ενέργειας του φυσικού αερίου αναθεωρείται σε μηνιαία βάση και προκύπτει από το κόστος προμήθειας φυσικού αερίου της Ε.Π.Α. Αττικής (Επιχείρηση Παροχής Αερίου) από τη Δ.Ε.Π.Α. (Δημόσια Επιχείρηση Αερίου). Στον οικιακό τομέα για το έτος 2012 οι τιμές διαμορφώθηκαν όπως φαίνονται στον πίνακα 6.1.

Μήνας	Χρέωση (€/kWh)
Ιανουάριος	0,07822
Φεβρουάριος	0,07684
Μάρτιος	0,07506
Απρίλιος	0,07676
Μάιος	0,07382
Ιούνιος	0,07469
Ιούλιος	0,08038
Αύγουστος	0,08082
Σεπτέμβριος	0,08009
Οκτώβριος	0,07859
Νοέμβριος	0,07814
Δεκέμβριος	-

Πίνακας 6.1: Τιμές φυσικού αερίου ανά μήνα του 2012

Με την υπάρχουσα τιμολογιακή πολιτική που παρέχει η Δ.Ε.Η. στον οικιακό τομέα, η τιμή πώλησης μιας κιλοβατώρας καθορίζεται από το συνολικό ποσό κατανάλωσης σε διάστημα 4 μηνών και από την ώρα της ημέρας που καταναλώνεται. Σύμφωνα με αυτό από τον πίνακα 6.2 έχουμε:

Σύνολο κατανάλωσης (kWh)	Χρέωση (€/kWh)
0 – 800	0,05625

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

801 – 1000	0,07850
1001 – 2000	0,08150
> 2000	0,09155

*Πίνακας 6.2: Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας το 2012*

Η τιμή της κιλοβατώρας βάση του νυχτερινού τιμολογίου είναι 0,05400 €.

Από την άλλη η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας πίσω στο δίκτυο διαμορφώνεται από αρκετούς παράγοντες και διαφέρει αισθητά κυρίως ανάλογα από την πηγή που προέρχεται. Οι τιμές που χρησιμοποιήσαμε για το φυσικό αέριο και για την αγορά ρεύματος προέκυψαν από το μέσο όρο των δεδομένων που είχαμε στη διάθεση μας, που είναι 0,07758 €/kWh και 0,07695 €/kWh αντίστοιχα. Για την πώληση ρεύματος χρησιμοποιείται η χρέωση 0,08785 €/kWh. Αυτές και όλες οι τιμές των υπόλοιπων σταθερών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στο βασικό σενάριο του μοντέλου μας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 6.3):

<b>Μεταβλητή</b>	<b>Περιγραφή μεταβλητής</b>	<b>Τιμή</b>
xesmin	<i>Ελάχιστο επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας στην μπαταρία</i>	0
xesmax	<i>Μέγιστο επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας στην μπαταρία</i>	2
xhsmin	<i>Ελάχιστο επίπεδο θερμικής ενέργειας στη δεξαμενή νερού</i>	0
xhsmax	<i>Μέγιστο επίπεδο θερμικής ενέργειας στη δεξαμενή νερού</i>	9
Emin	<i>Ελάχιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το CHP</i>	0,15
Emax	<i>Μέγιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το CHP</i>	0,5
hpr	<i>Heat to power ratio</i>	2
toteff	<i>Συνολική αποδοτικότητα του CHP</i>	0,90
u2max	<i>Παραγωγή θερμικής ενέργειας από τον βοηθητικό καυστήρα</i>	0,9383
auxeff	<i>Συνολική αποδοτικότητα του βοηθητικού καυστήρα</i>	0,95
pf	<i>Τιμή αγοράς φυσικού αερίου ανά kWh</i>	0,07758

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

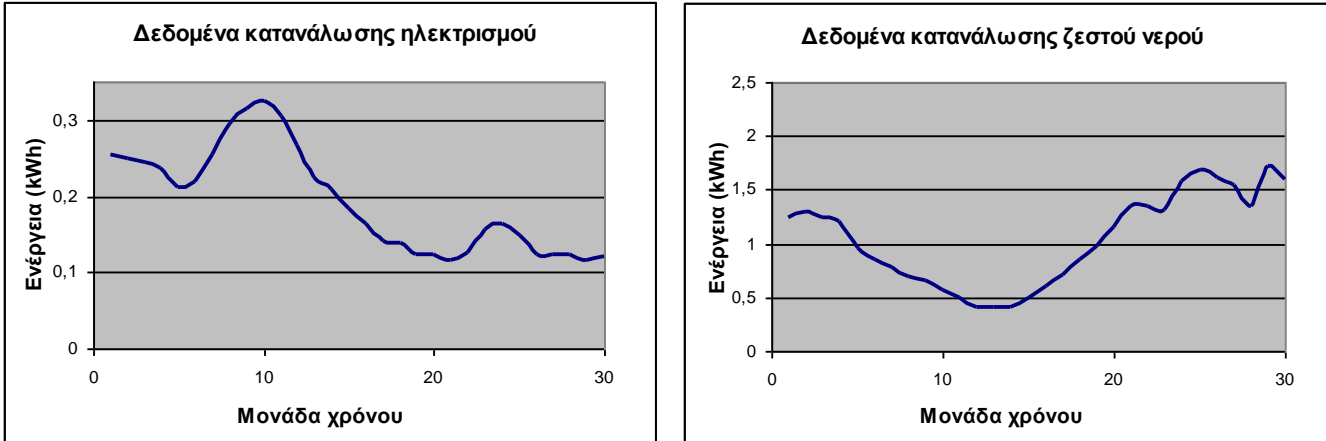
pimp	<i>Τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανά kWh</i>	0,07695
rexp	<i>Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας ανά kWh</i>	0,08785
UT	<i>Υποχρέωση CHP (σταθερό)</i>	4
<b>Αρχικές συνθήκες</b>		
xhs	<i>Επίπεδο θερμικής ενέργειας στη δεξαμενή νερού</i>	0
xes	<i>Επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας στην μπαταρία</i>	0
W	<i>Κατάσταση λειτουργίας του CHP</i>	0
UT0	<i>Υποχρέωση του CHP για κάθε χρονική στιγμή</i>	0
u2tmp	<i>Κατάσταση λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα</i>	0

*Πίνακας 6.3: Τιμές και σημασία των σταθερών μεταβλητών του συστήματος και αρχικές συνθήκες στην προσομοίωση*

Όπως φαίνεται οι αρχικές συνθήκες του συστήματος βρίσκουν εκτός λειτουργίας τόσο τη γεννήτρια συμπαραγωγής όσο και τον καυστήρα και άδειες τις αποθηκευτικές μονάδες. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήσαμε 11 περιόδους των 15 λεπτών για τον ορίζοντα ρύθμισης, ενώ οι προσομοιώσεις θα αφορούν 18 συνεχόμενες περιόδους της ίδιας διάρκειας. Ως μονάδα χρόνου (περίοδο) ορίζουμε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, που σε μια πραγματική εφαρμογή μετά το πέρας του θα έπρεπε να αναλυθεί ξανά το πρόβλημα βελτιστοποίησης ώστε να καταστρωθεί το κατάλληλο ενεργειακό πλάνο.

Τέλος, για τη λειτουργία του μοντέλου χρειαζόμαστε και κάποια δεδομένα κατανάλωσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα προφίλ τιμών που φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα (διαγράμματα 6.1 και 6.2):

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



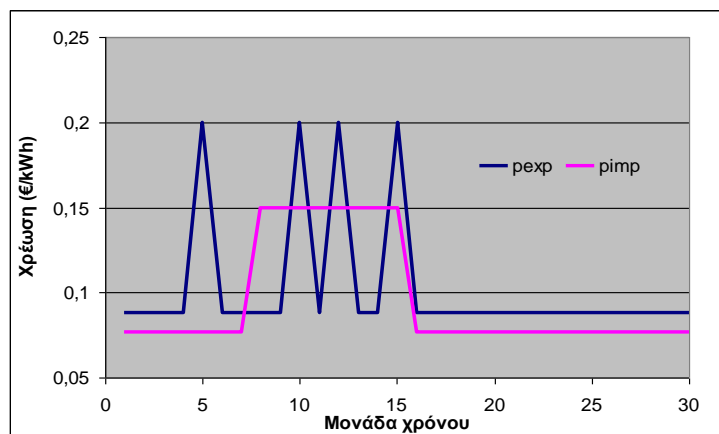
Διαγράμματα 6.1 και 6.2: Δεδομένα κατανάλωσης

Οι τιμές κατανάλωσης που προκύπτουν θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν αυτές ενός ρεαλιστικού παραδείγματος τυπικού νοικοκυριού.

Τα δεδομένα που περιγράψαμε αποτελούν τα δεδομένα αναφοράς του μοντέλου μας, αλλά φυσικά στο κομμάτι των αποτελεσμάτων που ακολουθεί θα χρησιμοποιηθούν και άλλες τιμές ώστε να διερευνηθούν όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις που θα είχαν τα χαρακτηριστικά μιας πραγματικής εφαρμογής.

### 6.2 Λειτουργία μοντέλου

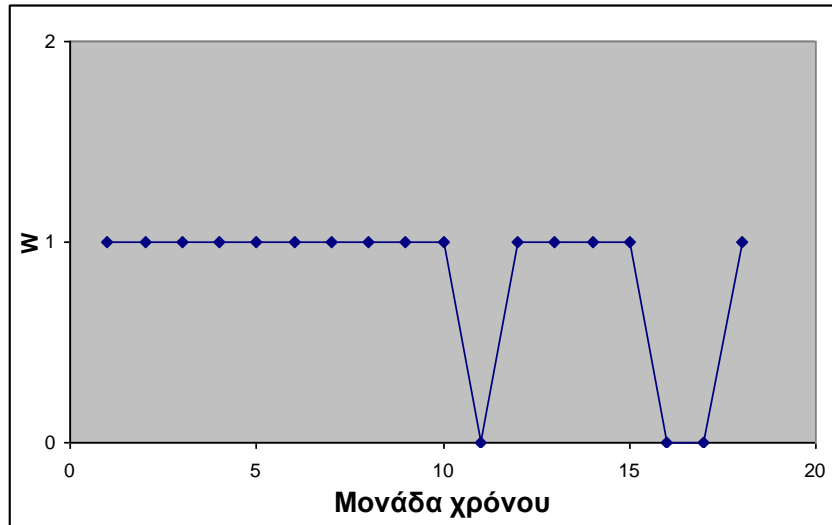
Σε αυτή την ενότητα θα γίνει εκτενής παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ώστε να κατανοηθεί πλήρως η συμπεριφορά του μοντέλου. Θα τρέξουμε τον κώδικα σύμφωνα με τις τιμές που αναφέραμε στον [πίνακα 6.3](#), θεωρώντας διαφορετικές χρεώσεις πώλησης ρεύματος στους χρόνους 5, 10, 12, 15 και αγοράς από 8 έως 15, δηλαδή μια δυναμική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και σε επίπεδο κατοικίας, όπως αυτή πρόκειται να διαμορφωθεί στο μέλλον. Στο διάγραμμα 6.3 φαίνονται οι χρεώσεις ανάλογα με τη χρονική στιγμή.



Διάγραμμα 6.3: Τιμές αγοράς και πώλησης ρεύματος

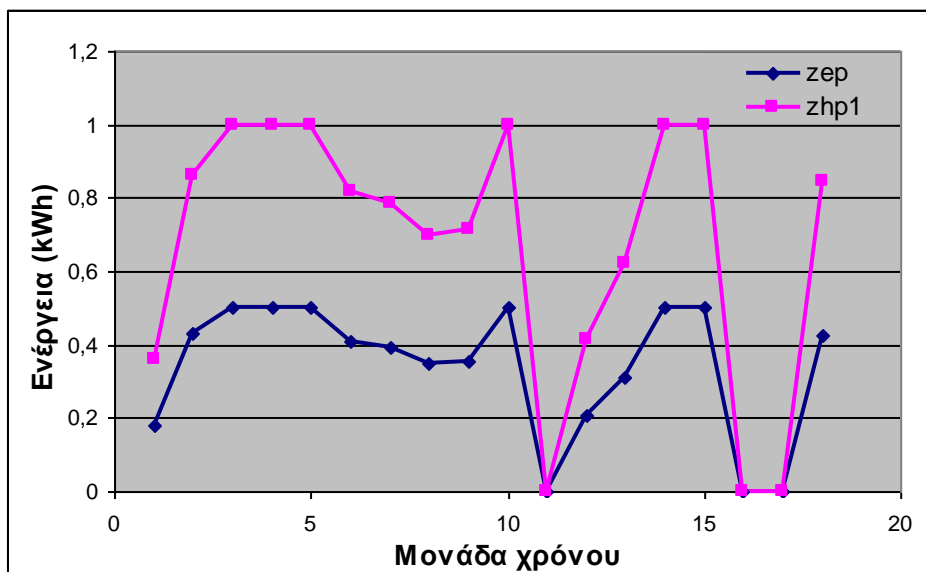
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα λοιπόν, παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που διαμορφώθηκαν από την βέλτιστη λειτουργία του μοντέλου με μια σειρά διαγραμμάτων.



Διάγραμμα 6.4: Λειτουργία του CHP

Στο παραπάνω διάγραμμα 6.4 φαίνεται η εξέλιξη της δυαδικής μεταβλητής  $W$  που καθορίζει τη λειτουργία του CHP. Παρατηρούμε πως το CHP ενεργοποιήθηκε συνολικά 3 φορές και τέθηκε εκτός λειτουργίας 2. Η ενεργοποίηση στον τελικό χρόνο δεν αντιβαίνει τον περιορισμό τουλάχιστον τεσσάρων χρόνων λειτουργίας ( $UT = 4$ ) καθώς στην περίπτωση που θα είχαμε περισσότερους χρόνους ρύθμισης θα ήταν υποχρεωμένο να παραμείνει ανοιχτό. Η ενέργεια που παράγεται στους χρόνους που το CHP είναι ανοιχτό φαίνεται παρακάτω (διάγραμμα 6.5).

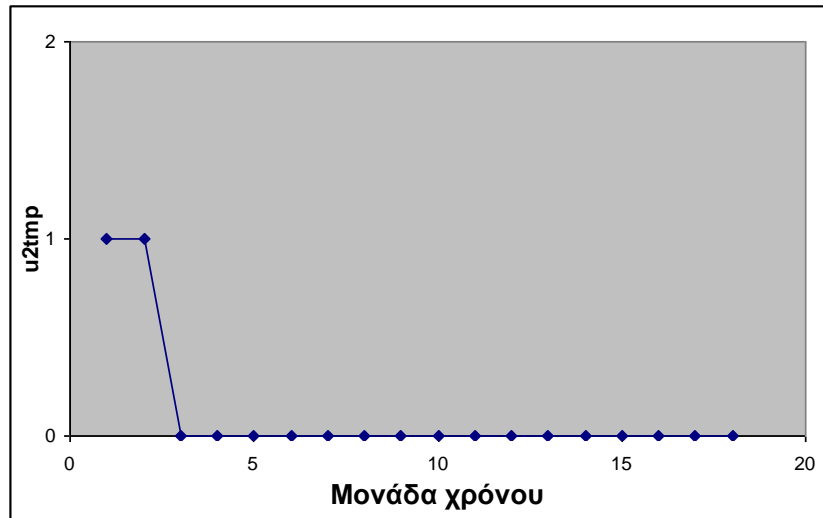


Διάγραμμα 6.5: Ηλεκτρική και θερμική ενέργεια που παράχθηκε από το CHP



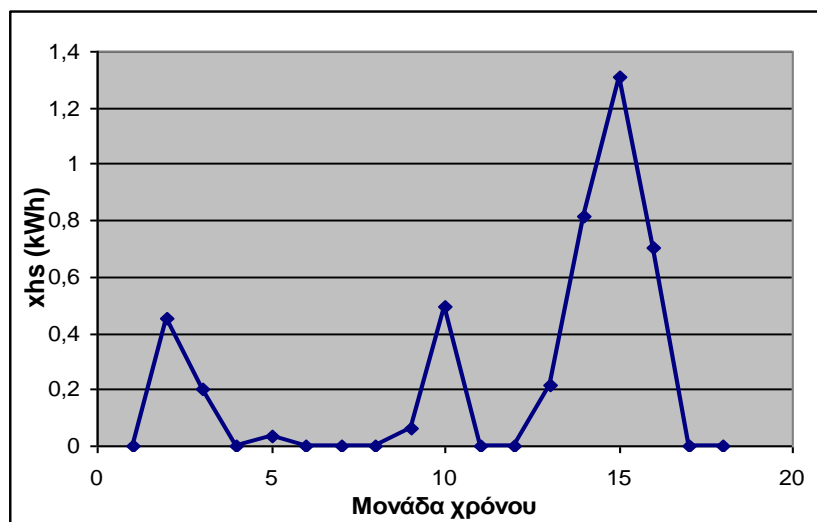
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά το βοηθητικό καυστήρα (διάγραμμα 6.6) χρειάστηκε να λειτουργήσει μόνο τους δύο πρώτους χρόνους, σε κάθε ένα από τους οποίους παράγαγε  $z_{hp2} = 0,89$  kWh.



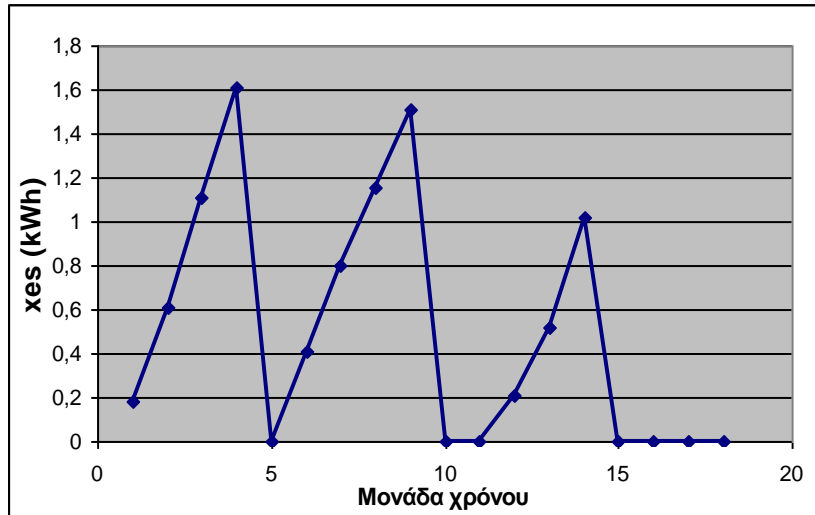
Διάγραμμα 6.6: Λειτουργία βοηθητικού καυστήρα

Στα τρία επόμενα διαγράμματα (διαγράμματα 6.7, 6.8 και 6.9) φαίνεται η λειτουργία των αποθηκευτικών μονάδων.

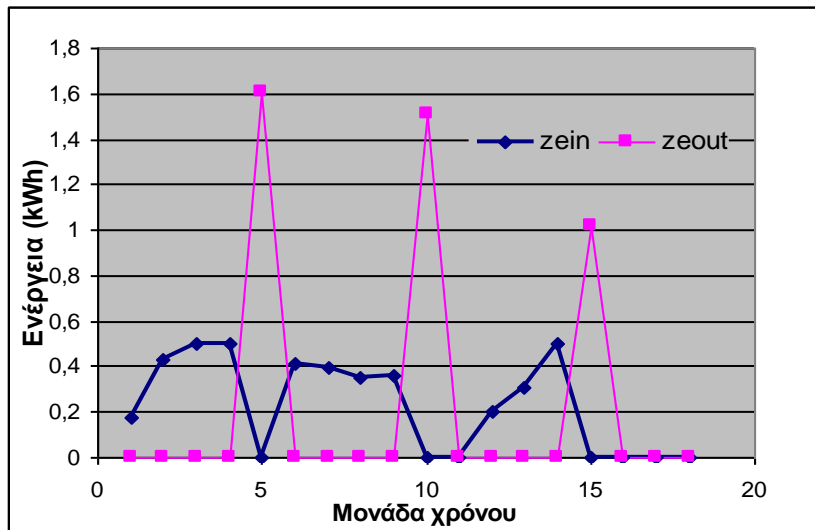


Διάγραμμα 6.7: Επίπεδο θερμικής ενέργειας στη δεξαμενή νερού

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



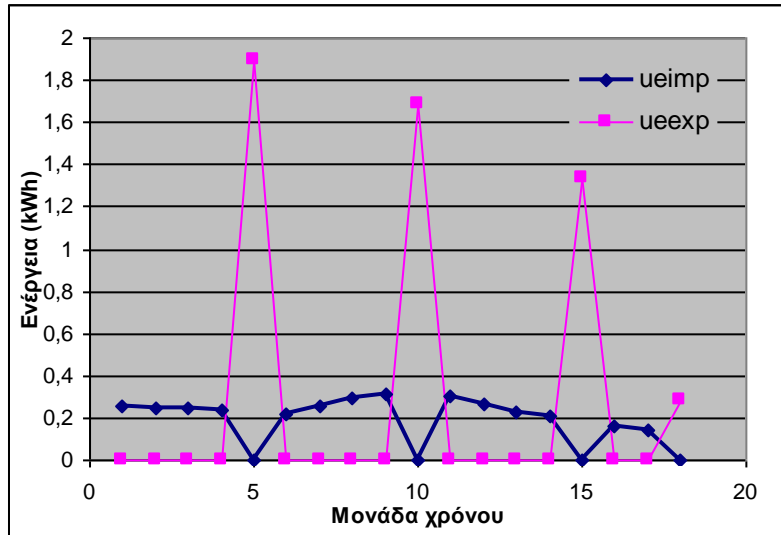
Διάγραμμα 6.8: Επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας στη μπαταρία



Διάγραμμα 6.9: Είσοδος και έξοδος ενέργειας στην μπαταρία

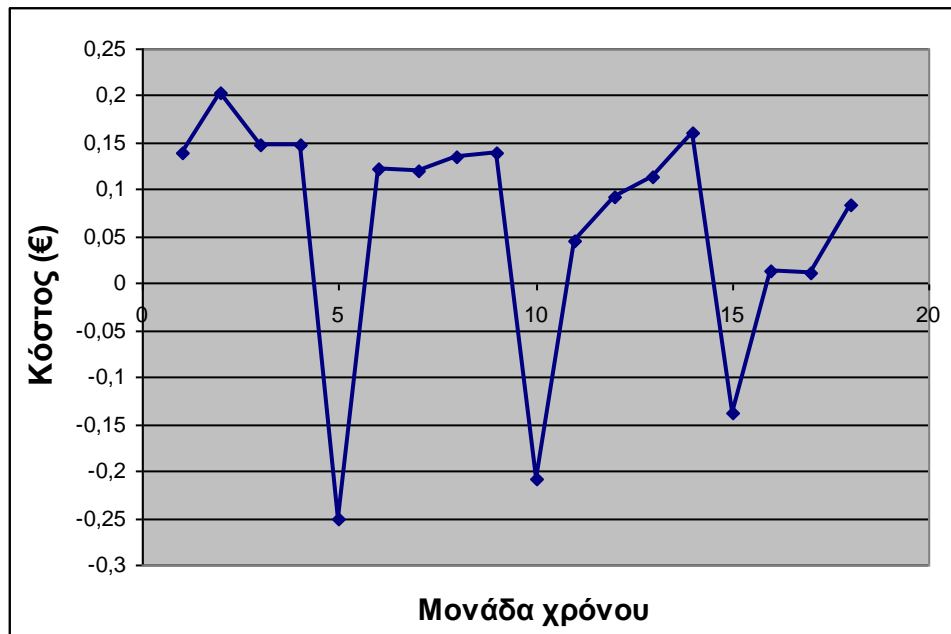
Στο επόμενο γράφημα (διάγραμμα 6.10) φαίνονται οι δυνατότητες που δημιουργούνται με την πώληση ρεύματος από τον καταναλωτή, χάρη στη διασυνδεδεμένη λειτουργία του CHP με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Διάγραμμα 6.10: Αγορά και πώληση ρεύματος

Στους περισσότερους χρόνους παρατηρούμε το φαινόμενο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του νοικοκυριού. Στους χρόνους 5, 10 και 15 όμως, έχουμε πώληση και μάλιστα μεγάλου ποσού ενέργειας. Αυτό οφείλεται στη συμφέρουσα τιμή της κιλοβατώρας που ίσχυε εκείνες τις περιόδους. Μπορούμε εύκολα να φανταστούμε πως αυτό θα επηρεάσει στη διαμόρφωση του τελικού κόστους που φαίνεται στο διάγραμμα 6.11.



Διάγραμμα 6.11: Διαμόρφωση λειτουργικού κόστους

Από το διάγραμμα κόστους σημειώνεται πως στις αντίστοιχες περιόδους έχουμε σημαντικό οικονομικό όφελος για τον καταναλωτή. Το συνολικό λειτουργικό κόστος που μετρήθηκε στους 18 χρόνους είναι **1,08 €**.

Για να γίνει κατανοητή ποια ακριβώς είναι η σημασία αυτής της τιμής θα ακολουθήσει μια σειρά συγκρίσεων με διαφορετικούς τρόπους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του νοικοκυριού. Για αρχή ας θεωρήσουμε ένα νοικοκυριό στο οποίο υπάρχει εγκατεστημένος μόνο ο καυστήρας. Έχει ακριβώς τις ίδιες ενεργειακές ανάγκες απλά λόγω της απουσίας μονάδας συμπαραγωγής είναι αναγκασμένο να αγοράζει όλη την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Ο καυστήρας είναι υπεύθυνος για την πλήρη κάλυψη των απαιτήσεων σε ζεστό νερό, είτε αυτές αφορούν καθαριότητα είτε θέρμανση. Το αντίστοιχο λειτουργικό κόστος σε 18 χρόνους θα ήταν **1,56 €**, δηλαδή **44%** μεγαλύτερο. Στην περίπτωση που ο καυστήρας λειτουργεί με πετρέλαιο, με μια ενδεικτική χρέωση 0,11€/kWh, τότε το κόστος θα ήταν **2,01 €**. Παρατηρείται δηλαδή αύξηση περίπου κατά **86%**. Τέλος, θα αναφερθούμε στο πιο ρεαλιστικό σενάριο ενός τυπικού σημερινού νοικοκυριού, όπου ο καυστήρας χρησιμοποιείται μόνο για τη θέρμανση νερού που προορίζεται για τα σώματα καλοριφέρ. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να αφαιρεθεί από τα δεδομένα κατανάλωσης θερμού νερού το ποσό ενέργειας που αντιστοιχεί στη χρήση του θερμοσίφωνα και να προστεθεί σε αυτά του ηλεκτρισμού. Θεωρώντας ότι αυτό αντιστοιχεί στο 1/3 της αρχικής κατανάλωσης, προκύπτει τελικό κόστος **1,66 €** και **1,96 €** για λειτουργία με φυσικό αέριο και πετρέλαιο αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε αύξηση κατά **53%** και στη δεύτερη κατά **81%**.

### *6.3 Ανάλυση ευαισθησίας*

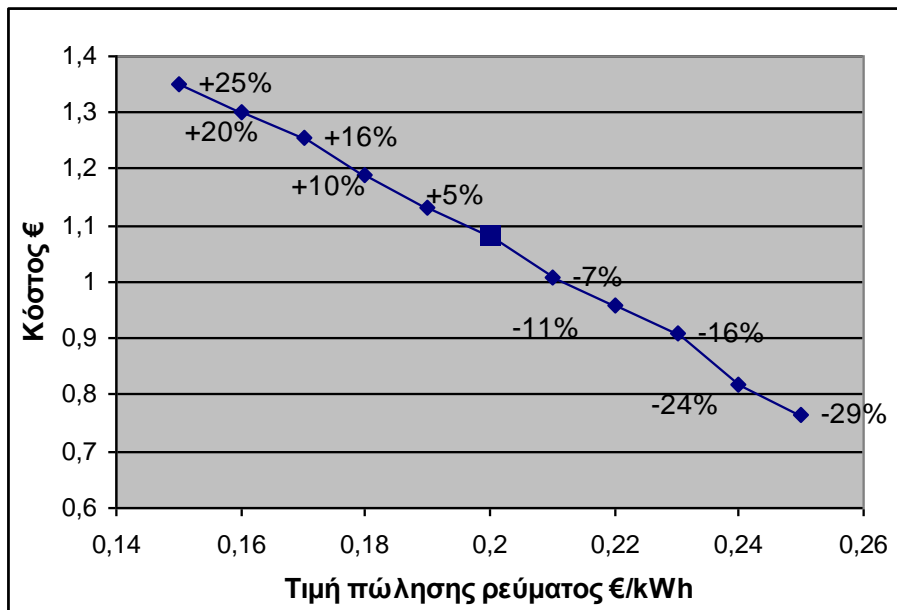
Σε αυτή την ενότητα θα προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε το ρόλο που διαδραματίζουν ορισμένοι παράγοντες στη διαμόρφωση του τελικού κόστους. Αυτό θα γίνει μεταβάλλοντας την τιμή της μεταβλητής που θέλουμε να εξετάσουμε και φυσικά παράλληλα διατηρώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες. Ως αναφορά θα έχουμε το πρώτο αποτέλεσμα του 1,08 €.

#### *6.3.1 Τιμές ρεύματος-καυσίμου*

Τα συστήματα αυτά θα μπορούν να ελαχιστοποιούν στο μέγιστο το λειτουργικό κόστος σε μια απελευθερωμένη οικονομική πολιτική της αγοράς, όπου η τιμή αγοράς/πώλησης του ρεύματος θα μεταβάλλεται συνεχώς σύμφωνα με τις ανάγκες του δικτύου. Για παράδειγμα τις ώρες αιχμής που η τιμή της κιλοβατώρας είναι πολύ υψηλή, ο καταναλωτής με τη δυνατότητα που θα έχει να το πληροφορείται σε πραγματικό χρόνο να επιλέγει να λειτουργήσει λιγότερες συσκευές. Ήδη παρατηρήσαμε πως είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούμε την κυμαινόμενη χρέωση προς όφελος του καταναλωτή. Στην περίπτωση που οι τιμές θα ήταν συνεχώς

σταθερές στα επίπεδα που φαίνονται στον [πίνακα 6.3](#) τότε το κόστος θα ανέβαινε στο **1,51 €**, αύξηση της τάξης του **40%**. Παρόμοιο αποτέλεσμα έχουμε και όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα πώλησης πίσω στο δίκτυο (**1,53 €**), περιπτώσεις που ενισχύουν ακόμα περισσότερο την ανάγκη απελευθέρωσης της αγοράς.

Στο διάγραμμα 6.12 φαίνεται η διαμόρφωση του τελικού κόστους όταν αλλάζει η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας του ρεύματος. Συγκεκριμένα, ερευνήθηκε ένα εύρος τιμών έως 5 λεπτά του ευρώ μικρότερο και μεγαλύτερο από την αρχική τιμή των 0,20 για τις ίδιες χρονικές στιγμές.

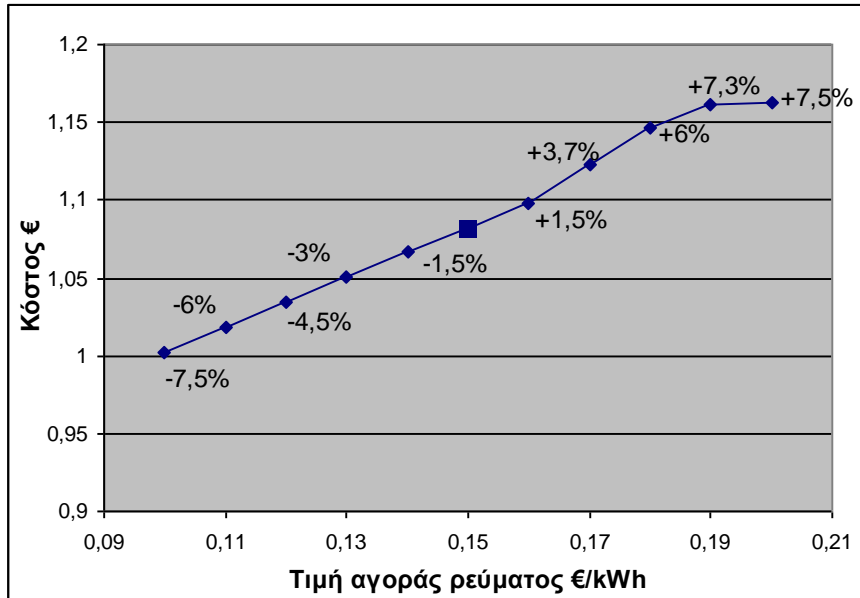


Διάγραμμα 6.12: Τελικό κόστος με μεταβολή της τιμής πώλησης ρεύματος

Είναι εμφανές ότι ακόμα και μια πολύ μικρή αλλαγή στην τιμή παίζει καθοριστικό ρόλο στο κόστος. Στα 0,15 €/kWh το κόστος εμφανίστηκε αυξημένο κατά **25%** (**1,35 €**), ενώ στα 0,25 €/kWh σημειώθηκε μείωση **29%** (**0,77 €**). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι αυτή η χρέωση ισχύει μόνο τις 4 από τις συνολικά 18 περιόδους ρύθμισης.

Αντίστοιχα, παρακάτω (διάγραμμα 6.13) βλέπουμε τη συμπεριφορά του κόστους όταν μεταβάλλουμε την τιμή αγοράς του ρεύματος από 0,10 - 0,20 €/kWh στους χρόνους 8 έως 15.

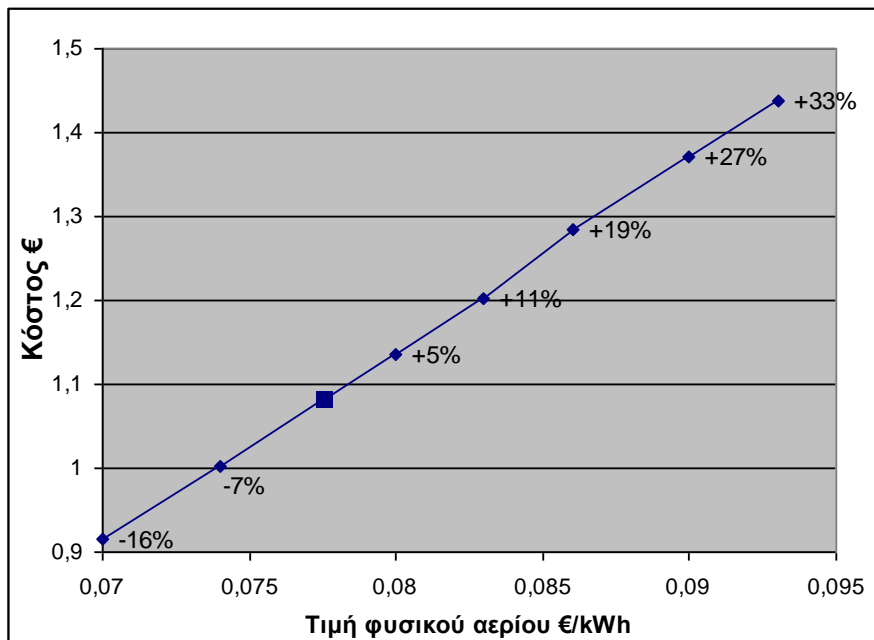
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Διάγραμμα 6.13: Τελικό κόστος με μεταβολή της τιμής αγοράς ρεύματος

Τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα με το κόστος να ακολουθεί τη συμπεριφορά της τιμής χρέωσης.

Σημαντικότερος παράγοντας στη διαμόρφωση του κόστους είναι η τιμή του φυσικού αερίου, καθώς τόσο το CHP όσο και ο καυστήρας στηρίζουν τη λειτουργία του σε αυτό.



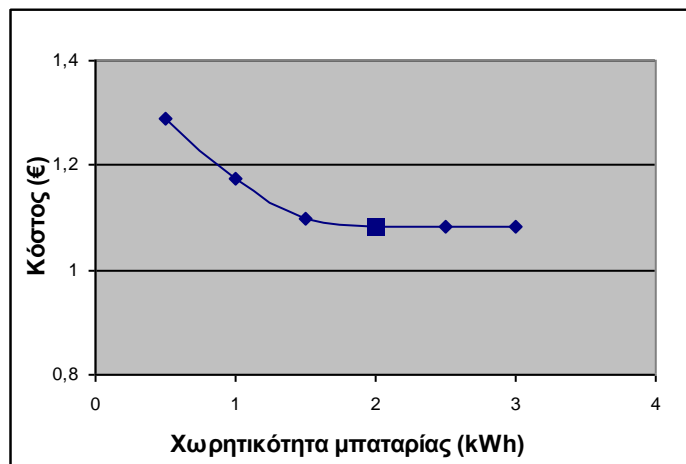
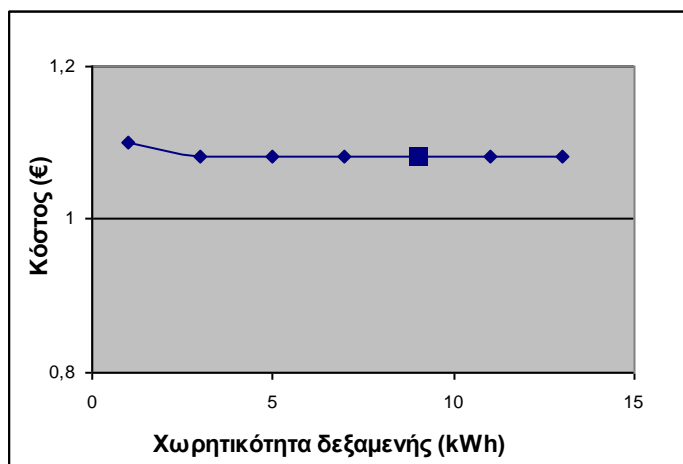
Διάγραμμα 6.14: Τελικό κόστος με μεταβολή της τιμής αγοράς φυσικού αερίου

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 6.14 δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στην αύξηση της τιμής του φυσικού αερίου παρά στη μείωση καθότι το πρώτο φαντάζει ως πιθανότερο σενάριο. Παρατηρείται πως στο ενδεχόμενο

αύξησης της τιμής της κιλοβατώρας του φυσικού αερίου κατά 20% θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του λειτουργικού κόστους κατά **33%**.

### 6.3.2 Αποθηκευτικές μονάδες

Η μπαταρία και η δεξαμενή νερού είναι απαραίτητα στοιχεία στην διαμόρφωση του συστήματος και ο σκοπός τους είναι η αποθήκευση της ενέργειας που δεν καταναλώνεται άμεσα. Στα δύο επόμενα διαγράμματα (διαγράμματα 6.15 και 6.16) φαίνεται το τελικό κόστος για διάφορες χωρητικότητες των δύο στοιχείων.

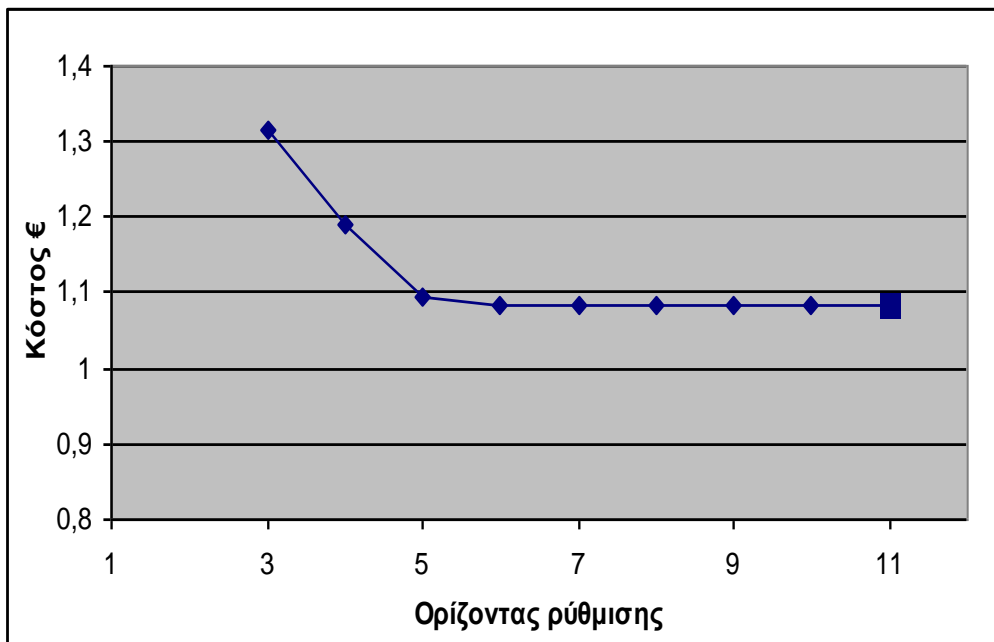


Διαγράμματα 6.15 και 6.16: Τελικό κόστος για διάφορες χωρητικότητες στην δεξαμενή νερού και στη μπαταρία

Από τα διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μπαταρία επηρεάζει περισσότερο το τελικό κόστος σε σχέση με τη δεξαμενή νερού. Στην τελευταία μια μείωση της χωρητικότητας της τάξης του 90% είχε σαν αποτέλεσμα αύξηση του κόστους λιγότερο από **2%**. Αντίθετα όταν μειώσαμε την αποθηκευτική ικανότητα της μπαταρίας κατά 75% αυτό απέφερε αύξηση του κόστους κατά **20%**. Για μεγαλύτερες χωρητικότητες και στις δύο περιπτώσεις το κόστος φαίνεται να μην μικραίνει άλλο και να παραμένει σταθερό στην τιμή που είχαμε αρχικά υπολογίσει (1,08 €). Τι θα γινόταν όμως αν δεν υπήρχε καθόλου η μια από τις δύο μονάδες αποθήκευσης, ή ακόμα και οι δύο; Αν δεν είχαμε τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας το κόστος θα ήταν **1,27 €** και **1,45 €** στην περίπτωση που δεν διαθέταμε μπαταρία. Αύξηση του κόστους κατά **17%** και **34%** αντίστοιχα. Παρατηρείται ακριβώς διπλάσια αύξηση στο δεύτερο σενάριο, γεγονός που αποδεικνύει άλλη μια φορά τη μεγαλύτερη βαρύτητα αποθήκευσης ηλεκτρισμού έναντι θερμού νερού. Η μεγαλύτερη αύξηση του κόστους όπως είναι λογικό παρουσιάζεται με τη έλλειψη και των δύο αποθηκευτικών μονάδων και συγκεκριμένα φτάνει το **40%**.

6.3.3 Ορίζοντας ρύθμισης

Στις προηγούμενες ενότητες ερευνήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος στην αλλαγή μεταβλητών που συνδέονται άμεσα με τη διαμόρφωση του κόστους. Σε αυτή θα αναφερθούμε στον ορίζοντα ρύθμισης, ο οποίος καθορίζει εν πολλοίς τις υπολογιστικές απαιτήσεις του προβλήματος και αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της μεθοδολογίας MPC.



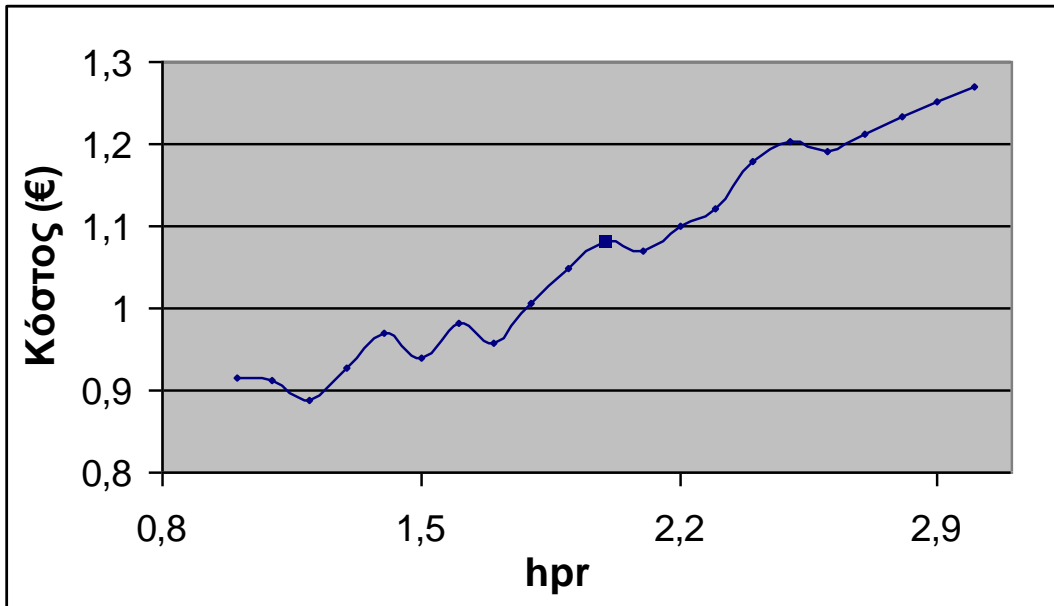
Διάγραμμα 6.17: Τελικό κόστος με μεταβολή του ορίζοντα ρύθμισης

Από το διάγραμμα 6.17 μπορούν να βγουν πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Παρατηρούμε πως όταν ο ορίζοντας πρόβλεψης είναι ίσος ή μεγαλύτερος των 6 χρόνων τότε το αποτέλεσμα του κόστους είναι ακριβώς το ίδιο. Διαφορά αρχίζει να φαίνεται στην τιμή 5, ενώ όταν ο ορίζοντας είναι 4 και 3 έχουμε αύξηση στο τελικό κόστος κατά **10** και **21** τοις εκατό αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση που ο ορίζοντας δεν είναι ικανοποιητικά μεγάλος, δεν έχουμε επαρκή γνώση για τις ενεργειακές απαιτήσεις που ακολουθούν και ταυτόχρονα και ίσως σημαντικότερο για τις επερχόμενες τιμές του ρεύματος. Είναι εμφανές πια ότι οι αποφάσεις που θα οδηγήσουν στο σωστό προγραμματισμό για την ελαχιστοποίηση του κόστους είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την ποσότητα πληροφοριών που είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε. Οι βέλτιστες αποφάσεις λειτουργίας του συστήματος για μικρότερους ορίζοντες ρύθμισης είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος.



6.3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά CHP

Η σημαντικότερη ίσως παράμετρος σε εφαρμογές συμπαραγωγής είναι η εύρεση της σωστής ισορροπίας ανάμεσα στην παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Στο παρακάτω διάγραμμα 6.18 φαίνεται πως διαμορφώνεται το τελικό κόστος για διαφορετικές τιμές HPR. Σε αρκετές από τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν συναντάμε ένα μεγάλο εύρος HPR, γι' αυτό θα εξετάσουμε από 1:1 έως 3:1.



Διάγραμμα 6.18: Τελικό κόστος με μεταβολή του heat to power ratio

Η γενική παρατήρηση που προκύπτει από το γράφημα είναι ότι για HPR μεγαλύτερο της αρχικής τιμής που ήταν 2:1 το κόστος αυξάνεται και αντίστοιχα για  $HPR < 2:1$  μειώνεται. Για να εξηγήσουμε το λόγο που γίνεται αυτό θα πρέπει να αναλογιστούμε τι συμβαίνει όταν μεταβάλλεται το HPR. Όταν η τιμή αυξάνεται, με τη συνολική αποδοτικότητα φυσικά να παραμένει σταθερή, αυξάνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης και μειώνεται ο ηλεκτρικός. Όταν η τιμή του μειώνεται συμβαίνει ακριβώς το αντίστροφο (πάντα με το συνολικό βαθμό απόδοσης σταθερό). Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών απόδοσης που διαμορφώνουν διάφορες τιμές HPR.

	<b>HPR = 1:1</b>	<b>HPR = 2:1</b>	<b>HPR = 3:1</b>
$\eta_{\text{thermal}}$	0,45	0,6	0,675
$\eta_{\text{electr}}$	0,45	0,3	0,225

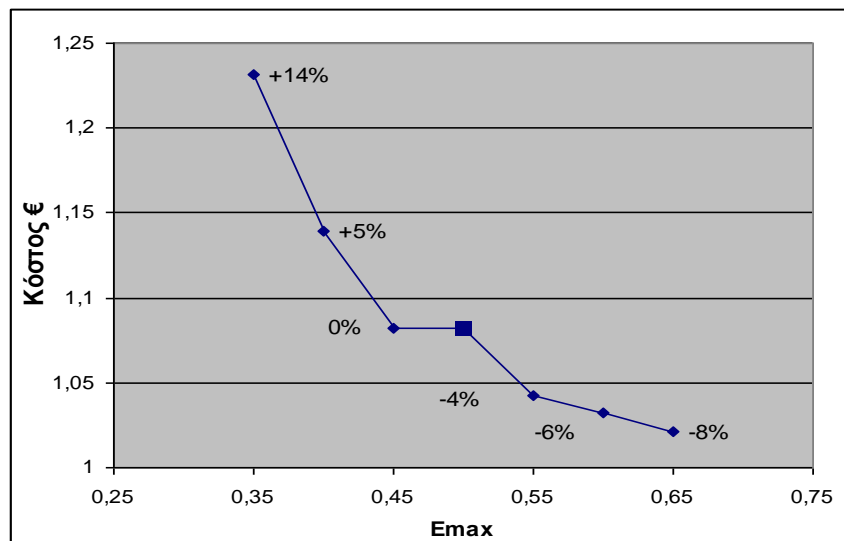
Πίνακας 6.4: Θερμική και ηλεκτρική αποδοτικότητα για διαφορετικό heat to power ratio

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως είναι λογικό το κατάλληλο HPR καθορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή, εννοώντας τις ενεργειακές απαιτήσεις και τον τύπο των εγκατεστημένων μονάδων. Τα δεδομένα κατανάλωσης που χρησιμοποιούμε αντιστοιχούν σε μία μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 0,19 kWh και θερμικής 1,04 kWh. Παρατηρούμε αυξημένη ζήτηση σε θερμό νερό και αναμένουμε ότι η μια ενδεχόμενη αύξηση του θερμικού βαθμού ίσως να είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του λειτουργικού κόστους. Από την άλλη όμως η ανάγκη θερμού νερού ικανοποιείται τόσο από το CHP όσο και από τον βοηθητικό καυστήρα, ενώ η ανάγκη ηλεκτρισμού εκπληρώνεται από το CHP και το δίκτυο. Επομένως, δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για το τι θα συμβεί. Αυτό που φάνηκε από το μοντέλο είναι ότι η αλλαγή του HPR έχει σαν αποτέλεσμα ένα διαφορετικό τρόπο λειτουργίας του συστήματός μας. Στην περίπτωση που το HPR αυξάνεται οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια ικανοποιούνται δυσκολότερα από το CHP εξαιτίας του μικρότερου ηλεκτρικού συντελεστή. Έτσι η απαιτούμενη ενέργεια πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο και τελικά το τελικό κόστος μεγαλώνει. Στην αντίθετη περίπτωση όπου ο ηλεκτρικός συντελεστής αυξάνεται, το κόστος μειώνεται. Άρα σημαντικό ρόλο παίζουν και οι χρεώσεις του ρεύματος και του φυσικού αερίου.

Πάντως από το διάγραμμα δεν παρατηρείται μια συνεχής αναλογική μεταβολή του κόστους σε σχέση με τις διάφορες τιμές του HPR. Αντιθέτως φαίνεται μια διακύμανση γεγονός που ίσως επιβεβαιώνει ότι εμπλέκονται αρκετοί παράγοντες στην τελική διαμόρφωση του αποτελέσματος.

Φυσικά μεταβολή του κόστους θα έχουμε και στην περίπτωση που μεταβληθεί η μέγιστη δυνατή παραγωγή του CHP (διάγραμμα 6.19).

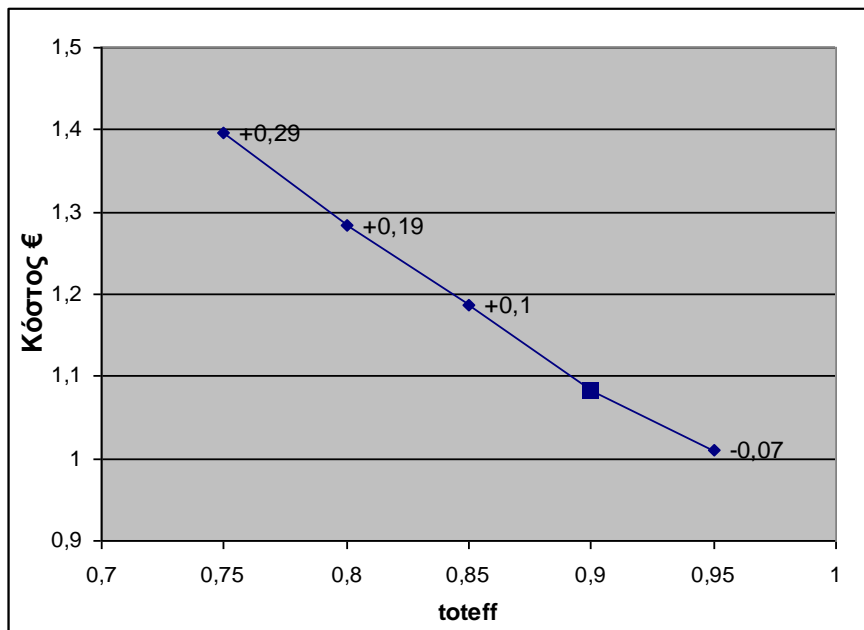


Διάγραμμα 6.19: Τελικό κόστος με μεταβολή της μέγιστης παραγωγής του CHP

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε μια απότομη αύξηση του κόστους για τιμές Emax μικρότερες της αρχικής, ενώ για μεγαλύτερες τιμές έχουμε την αναμενόμενη μείωση αλλά με πιο ήπια κλίση.

Τέλος, στο επόμενο γράφημα (διάγραμμα 6.20) φαίνεται το λειτουργικό κόστος για διάφορες τιμές συνολικής αποδοτικότητας (toteff) του CHP.



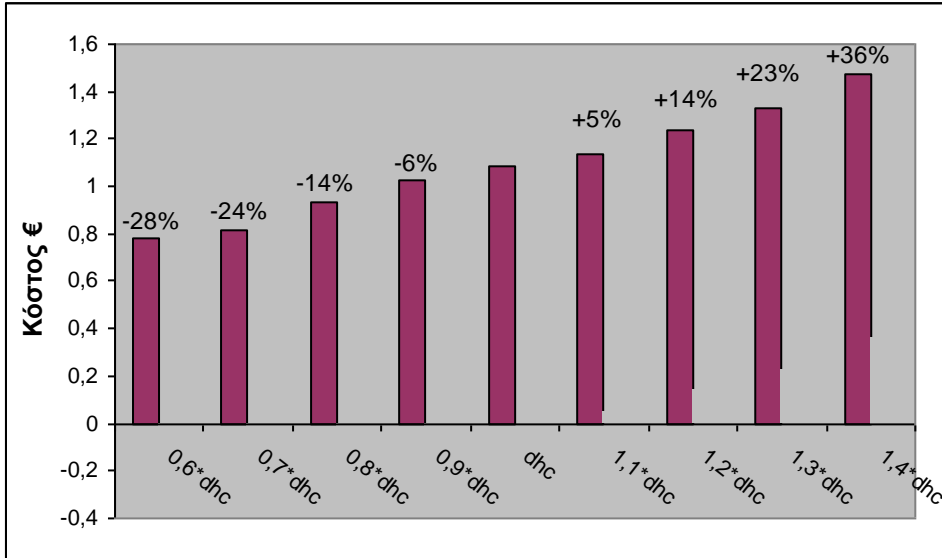
Διάγραμμα 6.20: Τελικό κόστος με μεταβολή της ολικής αποδοτικότητας του CHP

Εξετάστηκε το εύρος συντελεστών απόδοσης 0,75-0,95 όπου αντιστοιχεί σε τέτοιες μονάδες συμπαραγωγής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρα πως υψηλές αποδοτικότητες βοηθούν στη μείωση του λειτουργικού κόστους. Μείωση του βαθμού απόδοσης κατά 17% έδωσε αύξηση του κόστους κατά **29%**.

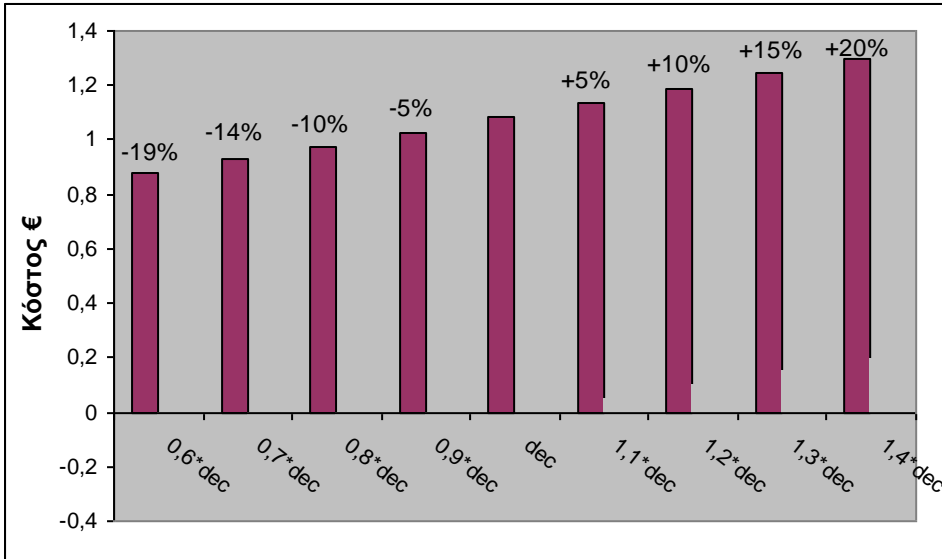
### 6.3.5 Ενεργειακές απαιτήσεις

Οι ενεργειακές απαιτήσεις μπορεί να διαφέρουν αρκετά από εφαρμογή σε εφαρμογή. Γι'αυτό το λόγο σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί πως η διαφοροποίηση τους επηρεάζει το τελικό κόστος. Θα ερευνήσουμε τις περιπτώσεις όπου οι ανάγκες ηλεκτρισμού ή θερμού νερού παρουσιάζονται αυξημένες ή μειωμένες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα 6.21 και 6.22:

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Διάγραμμα 6.21: Τελικό κόστος με μεταβολή της κατανάλωσης θερμού νερού



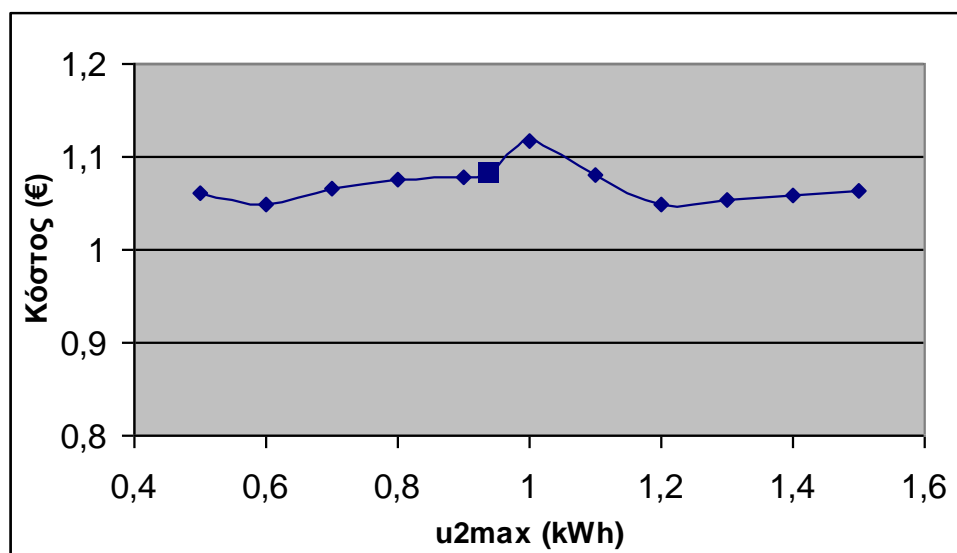
Διάγραμμα 6.22: Τελικό κόστος με μεταβολή της κατανάλωσης ηλεκτρισμού

Όπως είναι λογικό η αύξηση των απαιτήσεων αυξάνει και το τελικό κόστος. Αυτό που συμπεραίνουμε βλέποντας τα αντίστοιχα ποσοστά μεταβολής επί του αρχικού κόστους είναι πως οι διακυμάνσεις στις απαιτήσεις θερμού νερού ασκούν μεγαλύτερη επιρροή. Σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερα σε σχέση μ'αυτά των δεδομένων κατανάλωσης ηλεκτρισμού, εξ'αιτίας της αρχικής επιλογής για περισσότερο επιβαρυσμένη ζήτηση θερμικής έναντι ηλεκτρικής ενέργειας.

### 6.3.6 Βοηθητικός καυστήρας

Στη μοντελοποίηση επιλέχθηκε το ποσό παραγόμενης ενέργειας που προέρχεται από το βοηθητικό καυστήρα να είναι σταθερό και ίσο με

0,8914 kWh, έχοντας πάντα σταθερή ροή καυσίμου 0,9383 kWh. Τι θα γινόταν όμως αν υπήρχε η δυνατότητα προσαρμογής της παραγωγής ανάλογα με την κατανάλωση όπως και στο CHP; Σε αυτή την περίπτωση από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι αλλάζει ο τρόπος λειτουργίας του καυστήρα και το τελικό κόστος ανέρχεται στο 1,04 €. Δηλαδή μειώνεται κατά **4%**. Επιπλέον, ελέγξαμε το μοντέλο για διάφορες τιμές δυναμικότητας του καυστήρα (διάγραμμα 6.23).



Διάγραμμα 6.23: Τελικό κόστος με μεταβολή της δυναμικότητας του καυστήρα

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε πως οι διαφορετικές δυναμικότητες του καυστήρα δεν επηρεάζουν κατά πολύ το τελικό κόστος. Η μεγαλύτερη διαφορά είναι για  $u_{2max} = 1$  kWh όπου έχουμε αύξηση του κόστους κατά μόλις **3%**.

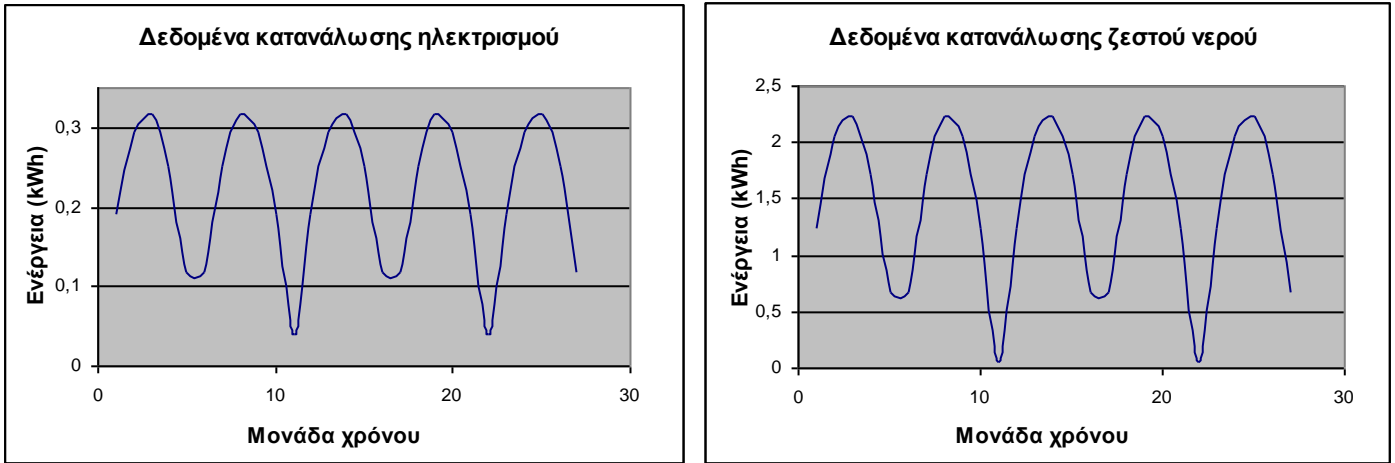
#### 6.4 Σύνδεση περισσότερων μονάδων

##### 6.4.1 Δύο μονάδες

Σε αυτό το κομμάτι θα εξετάσουμε την περίπτωση λειτουργίας δύο μονάδων και θα απαντήσουμε στο ερώτημα αν είναι οικονομικά συμφέρον να λειτουργούν σαν ένα ενιαίο σύστημα ή η κάθε μια αυτόνομα.

Ας θεωρήσουμε το σενάριο όπου έχουμε εγκατεστημένες δύο μονάδες σε δύο διαφορετικά νοικοκυριά. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ακριβώς τα ίδια, με μόνη διαφορά ότι έχουμε διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις στο κάθε ένα. Έτσι το πρώτο νοικοκυριό πρέπει να ικανοποιήσει τις ανάγκες που φαίνονται στα διαγράμματα 6.24 και 6.25

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

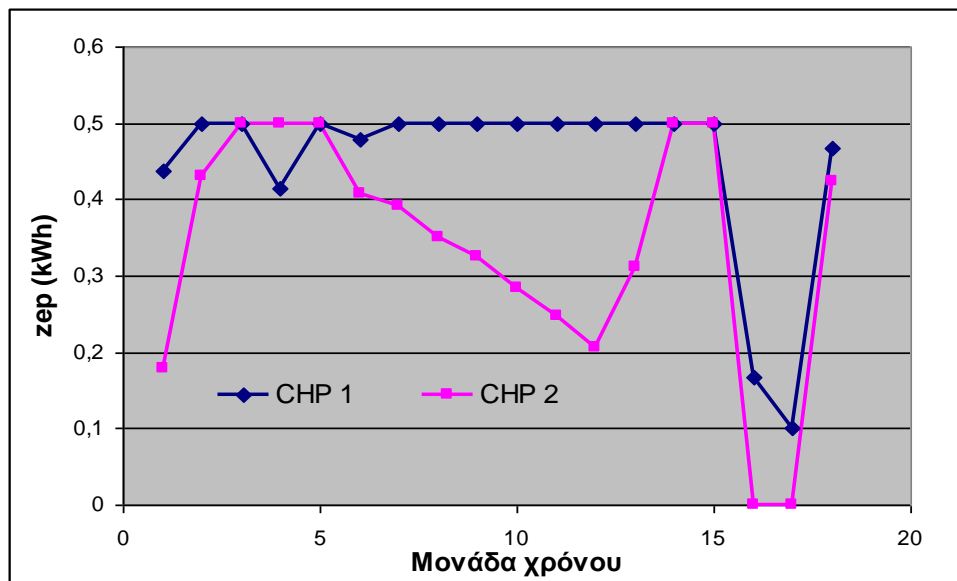


Διαγράμματα 6.24 και 6.25: Δεδομένα κατανάλωσης

,ενώ το δεύτερο έχει την κατανάλωση που ήδη έχουμε αναφέρει και που φαίνεται στα [διαγράμματα 6.1 και 6.2](#).

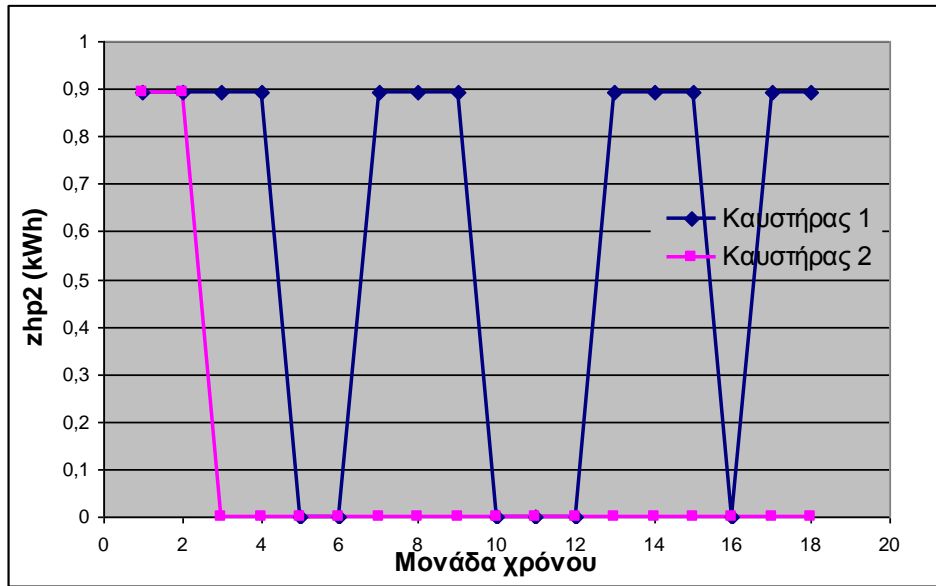
Όταν οι δύο μονάδες λειτουργούν ανεξάρτητα η μία από την άλλη η μοναδική υποχρέωση που έχουν είναι να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του αντίστοιχου νοικοκυριού που είναι εγκατεστημένες. Σε αυτό το σενάριο το κόστος του πρώτου ανέρχεται στο **1,92 €** και του δεύτερου όπως ήδη γνωρίζουμε στο **1,08 €**. Συνολικά επομένως χρειάστηκαν **3,00 €**.

Παρακάτω θα εξετάσουμε αναλυτικά την περίπτωση που οι δύο μονάδες λειτουργούν παράλληλα, δηλαδή έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας και θα την συγκρίνουμε με το πρώτο σενάριο. Η συμπεριφορά των μονάδων συμπαραγωγής και των καυστήρων περιγράφεται από τα δύο παρακάτω γραφήματα (διαγράμματα 6.26 και 6.27):



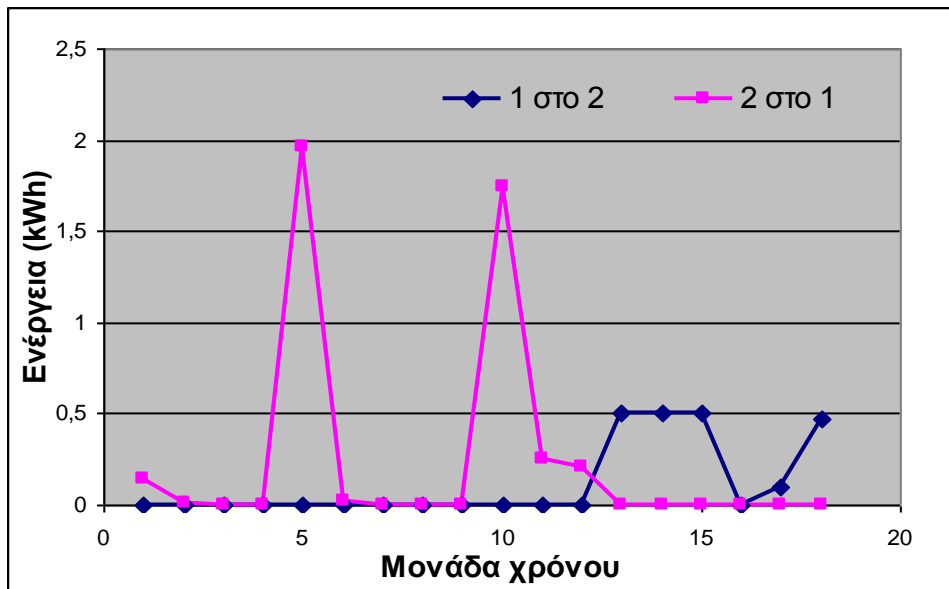
Διάγραμμα 6.26: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα δύο CHP

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Διαγράμματα 6.27: Παραγωγή από τους δύο καυστήρες

Η λειτουργία των μονάδων παραγωγής εξαρτάται από τη δεδομένη κατανάλωση του κάθε νοικοκυριού και όπως ήταν αναμενόμενο αυτό αποτυπώθηκε στα διαγράμματα. Το πρώτο νοικοκυριό είναι ενεργειακά περισσότερο επιβαρυνόμενο, επομένως ο καυστήρας ενεργοποιήθηκε περισσότερες φορές και επιπλέον το CHP λειτουργούσε σε υψηλότερα επίπεδα παραγωγής ηλεκτρισμού. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της παράλληλης λειτουργίας είναι η δυνατότητα ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των συνδεδεμένων μονάδων (διάγραμμα 6.28).

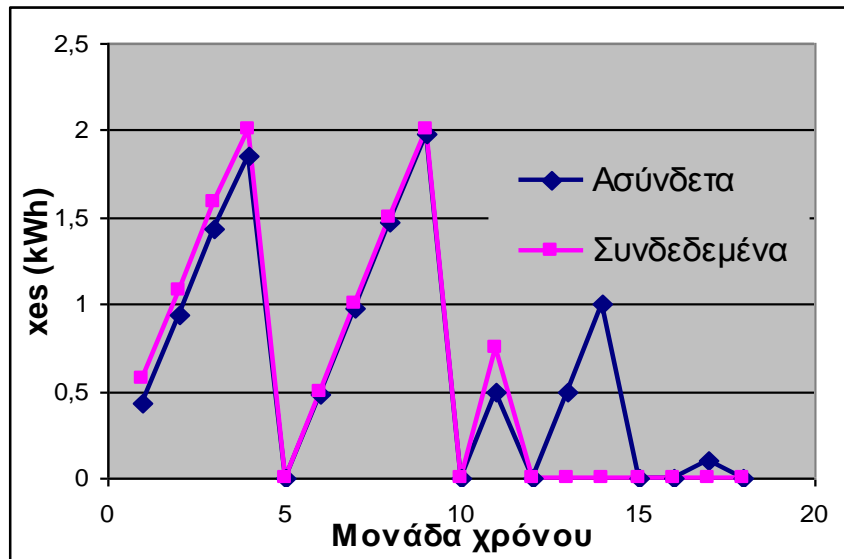


Διαγράμματα 6.28: Ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των δύο μονάδων

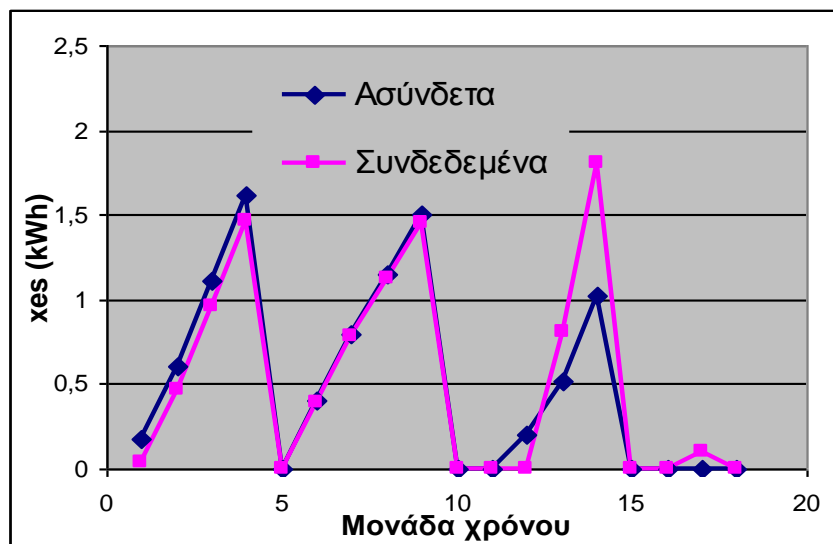
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε ότι στο σενάριο που καταστρώσαμε ότι έχουμε αξιοποίηση αυτής της δυνατότητας. Μεταφορά ενέργειας έγινε τόσο από το πρώτο νοικοκυριό στο δεύτερο, όσο και το αντίστροφο.

Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά των μπαταριών στην πρώτη και στη δεύτερη περίπτωση αντιλαμβανόμαστε τη διαφοροποιημένη συμπεριφορά όταν υπάρχει η δυνατότητα της επικοινωνίας (διαγράμματα 6.29 και 6.30).



Διάγραμμα 6.29: Επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας στη μπαταρία του πρώτου νοικοκυριού

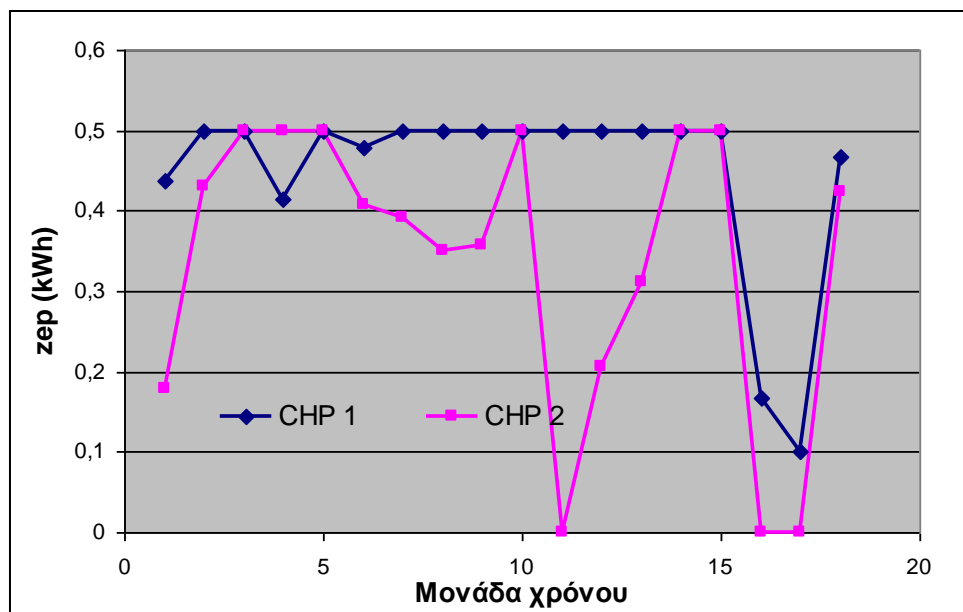


Διάγραμμα 6.30: Επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας στη μπαταρία του δεύτερου νοικοκυριού

Παρατηρείται πως η πορεία του περιεχομένου των μπαταριών στις δύο περιπτώσεις είναι διαφορετική, γεγονός που επισημαίνει ότι οι αποφάσεις που πήρε το μοντέλο οδήγησε σε διαφοροποιημένη λειτουργία. Αυτό ίσως φαίνεται ακόμα καλύτερα στο επόμενο γράφημα (διάγραμμα 6.31)



όπου απεικονίζεται η συμπεριφορά των δύο CHP στην περίπτωση που λειτουργούν ανεξάρτητα.



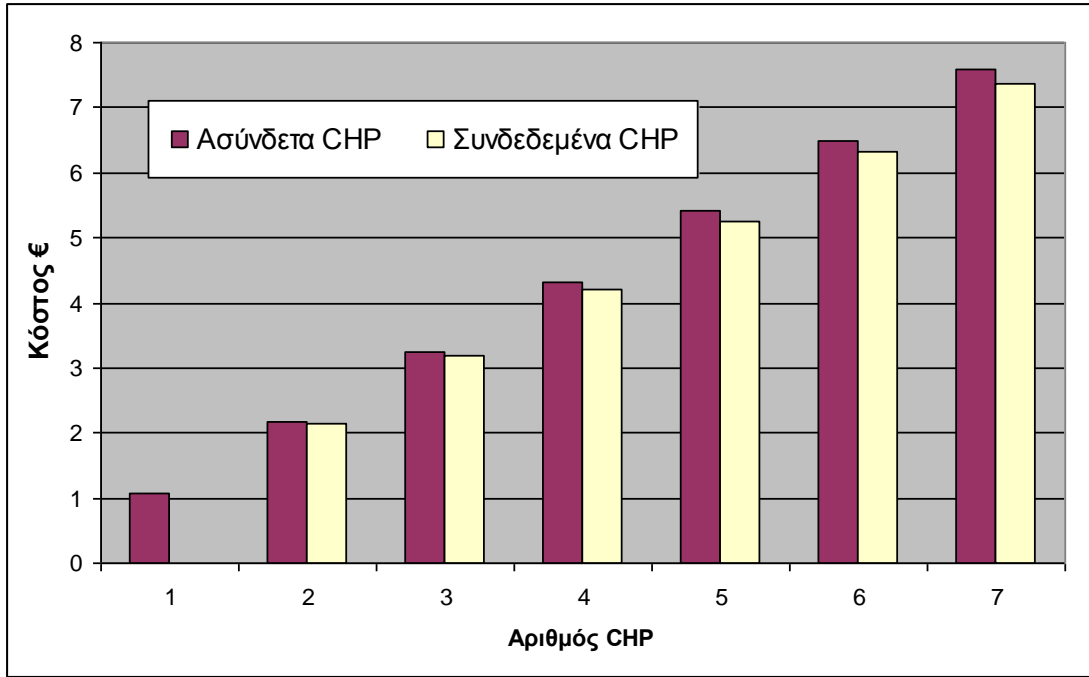
Διάγραμμα 6.31: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα δύο ανεξάρτητα CHP

Το παραπάνω διάγραμμα είναι σαφώς διαφοροποιημένο από το αντίστοιχο για τη διασυνδεδεμένη λειτουργία ([διάγραμμα 6.26](#)). Γίνεται ξεκάθαρο το γεγονός ότι έγινε διαφορετικός προγραμματισμός για μεγαλύτερη ελαχιστοποίηση του κόστους. Το συνολικό κόστος που υπολογίστηκε είναι **2,96 €**, μικρότερο από αυτό της ανεξάρτητης λειτουργίας.

#### 6.4.2 Περισσότερες από δύο μονάδες

Τι θα γινόταν όμως στην περίπτωση που είχαμε κι' άλλες μονάδες συμπαραγωγής συνδεδεμένες; Την απάντηση σε αυτό το ερώτημα δίνει το διάγραμμα 6.32 που φαίνεται παρακάτω στο οποίο γίνεται σύγκριση του κόστους που απαιτείται για τη λειτουργία μονάδων ανεξάρτητα και παράλληλα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



*Διάγραμμα 6.32: Λειτουργικό κόστος με πολλά CHP*

Σε όλες τις περιπτώσεις το κόστος παράλληλης λειτουργίας είναι μικρότερο. Στον πίνακα 6.5 που ακολουθεί φαίνεται η επί τοις εκατό μείωση του κόστους στην περίπτωση που οι μονάδες είναι συνδεδεμένες σε σχέση με την περίπτωση που λειτουργούν ανεξάρτητα.

Αριθμός CHP	Μείωση κόστους
2	1,32 %
3	2,15 %
4	2,57 %
5	2,83 %
6	2,66 %
7	2,65 %

*Πίνακας 6.5: Μείωση κόστους για διασυνδεδεμένη λειτουργία*

Η ποσοστιαία μείωση μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερη σε άλλα διαφορετικά σενάρια. Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε περιπτώσεις όπου η μείωση του κόστους είναι πολύ σημαντικότερη. Ας θεωρήσουμε ένα μικροδίκτυο που αποτελείται από τέσσερις μονάδες συμπαραγωγής. Το βασικό προφίλ των ενεργειακών απαιτήσεων που αντιστοιχεί στην κάθε μονάδα δίνεται από τα [γραφήματα 6.1 και 6.2](#). Οι συνθήκες λειτουργίας του μικροδικτύου είναι παρόμοιες με αυτές που έχουν ήδη αναφερθεί. Για την όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση ενός πραγματικού σεναρίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

σε κάθε μονάδα επιλέχθησαν διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις και διαφορετική δυναμικότητα στη γεννήτρια συμπαραγωγής. Κάποια από τα σενάρια που δημιουργήσαμε και η μείωση του κόστους σε σχέση με την ανεξάρτητη λειτουργία παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6.

<b>CHP1</b>	<b>CHP2</b>	<b>CHP3</b>	<b>CHP4</b>	<b>Μείωση κόστους</b>
$dec = 2*dec$	$dec = 0.5*dec$	$dec = dec$	$dec = 3*dec$	<b>7,29%</b>
$dhc = 0,7*dhc$	$dhc = dhc$	$dhc = 1,2*dhc$	$dhc = 2*dhc$	
$E_{max}=E_{max}$	$E_{max}=E_{max}$	$E_{max}=E_{max}$	$E_{max}=2*E_{max}$	
$dec = 2*dec$	$dec = 0.5*dec$	$dec = dec$	$dec = 3*dec$	<b>7,61%</b>
$dhc = dhc$	$dhc = dhc$	$dhc = dhc$	$dhc = 2*dhc$	
$E_{max}=1,1*E_{max}$	$E_{max}=0,8*E_{max}$	$E_{max}= E_{max}$	$E_{max}=2*E_{max}$	
$dec = 2*dec$	$dec = 0.5*dec$	$dec = dec$	$dec = 3*dec$	<b>7,71%</b>
$dhc = dhc$	$dhc = dhc$	$dhc = dhc$	$dhc = 2*dhc$	
$E_{max}= E_{max}$	$E_{max}= E_{max}$	$E_{max}= E_{max}$	$E_{max}=2*E_{max}$	

*Πίνακας 6.6: Μείωση κόστους σε διάφορα σενάρια λειτουργίας μικροδικτύου*

## 7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η εφαρμογή μιας μεθοδολογίας MPC για τη ρύθμιση μονάδων συμπαραγωγής. Η προσομοίωση έδειξε ότι η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος στον οικιακό τομέα μπορεί να αποφέρει σημαντικές μειώσεις του λειτουργικού κόστους συγκρινόμενο με τις υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες στα νοικοκυριά. Τα βασικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν συνοψίζονται παρακάτω:

- Αποτελεσματικότερη οικονομικά λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα πώλησης ρεύματος πίσω στο δίκτυο με την εφαρμογή πολιτικής χρονομεταβλητών τιμολογίων (dynamic pricing), όπου οι τιμές συνεχώς μεταβάλλονται.
- Τα αποθηκευτικά μέσα κατέχουν σημαντική θέση στη διαμόρφωση του συστήματος καθώς η παρουσία τους καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη σωστή ρύθμιση του, δίνοντας μεγαλύτερη ευελιξία. Το σπουδαιότερο ρόλο διαδραματίζει η μπαταρία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνεται πως η χρήση ενός μεγαλύτερου ορίζοντα ρύθμισης θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη μείωση του λειτουργικού κόστους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της άρτιας πρόβλεψης για τις μελλοντικές τιμολογιακές και ενεργειακές συνθήκες.
- Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας συμπαραγωγής πρέπει να γίνεται σύμφωνα με το εύρος τιμών heat to power ratio που διαθέτει για την σωστή προσαρμογή στις διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.
- Η διασυνδεδεμένη λειτουργία πολλών μονάδων συμπαραγωγής που διαμορφώνουν ένα μικροδίκτυο, αποφέρει περαιτέρω μείωση στο λειτουργικό κόστος συγκρινόμενη με την περίπτωση ανεξάρτητης λειτουργίας τους.

Το συνολικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι η εφαρμογή της συμπαραγωγής ως μορφή διεσπαρμένης παραγωγής στον οικιακό τομέα χρησιμοποιώντας ένα αποτελεσματικό σύστημα ελέγχου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικότερα οικονομικά οφέλη του καταναλωτή. Η εφαρμογή CHP φαίνεται να ταιριάζει περισσότερο σε περιοχές με περισσότερο ψυχρό κλίμα, καθώς στην περίπτωση πιο θερμού κλίματος καλύτερη ίσως θα ήταν η εφαρμογή CCHP ώστε να καλύπτονται και οι ανάγκες κλιματισμού των χώρων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ➤ *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1*

<http://www.lagie.gr/>

<http://www.desmie.gr/>

[www.dei.gr/](http://www.dei.gr/)

<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=277>

<http://energyforumonline.com/tag/global-electricity/>

<http://panthersgetnuclear.wikispaces.com/Nuclear+Power+Around+the+World>

<http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm>

<http://www.marketsize.com/blog/index.php/category/energy/>

Report on Distributed Generation Penetration Study, N. Miller GE Power Systems Schenectady, New York, Z. Ye GE Global Research Center Niskayuna, New York

[http://www.rae.gr/site/categories\\_new/consumers/know\\_about/electricity/production.csp](http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/production.csp)

<http://www.econews.gr/2012/07/20/egatestimeni-isxus-ape/>

Towards a future with large penetration of distributed generation: Is the current regulation of electricity distribution ready? Regulatory recommendations under a European perspective, Rafael Cossent, Tomás Gómez, Pablo Frías

### ➤ *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2*

Distributed generation: a definition, Thomas Ackermann, Göran Andersson, Lennart Söder

Distributed generation technologies, definitions and benefits, W. El-Khattam , M.M.A. Salama

Η Επίδραση των Διαφορετικών Πολιτικών Λειτουργίας στα Μεγέθη ενός Μικροδικτύου με Αυξημένη Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, Γεωργία Θ. Πιερή

[http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm)

### ➤ **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

Residential cogeneration systems: review of the current technology, H.I. Ononwiona, V.I. Ugursal

Catalog of CHP Technologies, U.S. Environmental Protection Agency  
Combined Heat and Power Partnership

[http://www.epa.gov/chp/documents/catalog\\_of\\_%20chp\\_tech\\_entire.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_of_%20chp_tech_entire.pdf)

Distributed microtrigeneration systems, G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso

Τριπαραγωγή Ηλεκτρισμού – Θερμότητας – Ψύξης

[http://www.3genergy.gr/pdfs/Introduction\\_to\\_CHP.pdf](http://www.3genergy.gr/pdfs/Introduction_to_CHP.pdf)

Analysis of innovative micro-CHP systems to meet household energy demands, Enrico Saverio Barbieri, Pier Ruggero Spina, Mauro Venturini

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΙΩΑΝΝΗΣ ΧΑΣΙΚΟΣ

A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines, Bancha Kongtragool, Somchai Wongwises

ΕΦΗΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ, Ν.Γ. ΚΟΥΜΟΥΤΣΟΥ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΑΛΓΕΒΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΚΕΛΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (PAFC), ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΒΑΤΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΙΚΡΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΗΧΑΝΗΣ STIRLING ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, Ακριβόπουλος Σωτήριος

Μηχανές Stirling <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi3328.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine)

Η Μηχανή του Stirling. Παλαιά αλλά και πολύ σύγχρονη!  
[http://users.sch.gr/nborbil/STIRLING\\_ENGINE\\_FYSIKOS\\_KOSMOS.pdf](http://users.sch.gr/nborbil/STIRLING_ENGINE_FYSIKOS_KOSMOS.pdf)

#### ➤ **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

Survey on Microgrid Control Strategies, Wei Huang, Miao Lu, Li Zhang

A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid, Prasenjit Basak, S.Chowdhury, S.HalderneeDey, S.P.Chowdhury

Οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη των Μικροδικτύων με αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Διπλωματική εργασία, Έλλη Ντάκου

Control Strategies for MicroGrids Emergency Operation, J. A. Peças Lopes, Senior Member, IEEE, C. L. Moreira, A. G. Madureira, F. O. Resende, X. Wu, N. Jayawarna, Y. Zhang, N. Jenkins, F. Kanellos, N. Hatziargyriou

Οικονομικά οφέλη Μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής – Στοχαστική προσέγγιση, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΒΙΟΛΕΤΑ Μ. ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΥ

<http://www.eng.ucy.ac.cy/elias/Courses/ECE445/presentations/Lectures2010/Distributed%20Generation1.pdf>

Microgrids, Virtual Power Plants and Our Distributed Energy Future, Peter Asmus, 2010

A survey of communication/networking in Smart Grids, Jingcheng Gao, Yang Xiao, Jing Liu, Wei Liang, C.L. Philip Chen

<http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/virtual-power-plants-real-power>

<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/podcast/2011/03/virtual-power-plants-arent-just-virtual-theyre-real>

➤ **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

Multi-Agent Model Predictive Control with Applications to Power Networks, R.R. Negenborn

Economic Advantages of Applying Model Predictive Control to Distributed Energy Resources: The Case of Micro-CHP Systems, Michiel Houwing, Rudy R. Negenborn, and Bart De Schutter

Demand Response With Micro-CHP Systems, Michiel Houwing, Rudy R. Negenborn, and Bart De Schutter

[http://www.chemeng.ntua.gr/labs/control\\_lab/zipfiles/MPC%20Notes2.pdf](http://www.chemeng.ntua.gr/labs/control_lab/zipfiles/MPC%20Notes2.pdf)

<http://www.aerioattikis.gr/default.aspx?pid=34&la=1&artid=135>

<http://www.dei.gr/Documents2/%CE%A4%CE%99%CE%9C%CE%9F%CE%9B%2010%202012/%CE%9F%CE%B9%CE%BA%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AC%20-%20%CE%A7%CF%89%CF%81%CE%AF%CF%82%20%CF%87%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CF%87%CF%81%CE%AD%CF%89%CF%83%CE%B7%202012.pdf>