



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Αριστοποίηση Συστήματος Συμπαγωγής
Ηλεκτρισμού Θερμότητας Ψύξης**

Διδακτορική Διατριβή

του

ΚΑΒΒΑΔΙΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων : Ζ. Μαρούλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....

Κωνσταντίνος Καββαδίας, 2012

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε με συγχρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο-ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους, στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» μέσω του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).

Περίληψη

Η τεχνολογία της συνδυασμένης παραγωγής πολλών μορφών ενέργειας από μία αρχική πηγή ενέργειας, γνωστή και ως συμπαραγωγή, αποτελεί την αποδοτικότερη μέθοδο παραγωγής ενέργειας τελικής χρήσης από συμβατικές πηγές πρωτογενούς ενέργειας. Με τη τεχνολογία αυτή, σημαντικό μέρος της θερμότητας που υπό άλλες συνθήκες θα απορριπτόταν στο περιβάλλον, ανακτάται και χρησιμοποιείται ωφέλιμα είτε απευθείας είτε μέσω άλλων διεργασιών. Η διάδοση των τεχνολογιών συμπαραγωγής έχει κάνει εφικτή την εγκατάσταση μονάδων συμπαραγωγής και στον κτιριακό τομέα, όπου παγκοσμίως αντιπροσωπεύει την κατανάλωση του 32% της ενέργειας τελικής χρήσης.

Το επιστημονικό αντικείμενο της διατριβής αφορά στην ανάλυση ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας ψύξης (σύστημα τριπαραγωγής), τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων και την αριστοποίησή τους. Η διατριβή επικεντρώθηκε στην μαθηματική προτυποποίηση του συστήματος, την πολυστοχική αριστοποίηση, την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας και την ανάπτυξη εμπειρικών κανόνων, προτύπων και παραμέτρων ελέγχου, που βοηθούν στην κατανόηση αυτών των συστημάτων.

Πιο συγκεκριμένα διευθετήθηκε το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού ενός συστήματος τριπαραγωγής για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών εμπορικών κτηρίων και αφού παρουσιάστηκε το κατάλληλο σύστημα συζητήθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία και βιωσιμότητα της επένδυσης. Γι' αυτό το σκοπό δημιουργήθηκε ένα μαθηματικό πρότυπο που αναπαριστά το ενεργειακό σύστημα ως υπερδομή και προσομοιώνει τη λειτουργία σε ωριαία βάση. Αναπτύχθηκε ένας νέος τύπος στρατηγικής λειτουργίας και αναλύθηκε η επίδραση της διακύμανσης των ενεργειακών φορτίων (ηλεκτρισμού, θερμικών, ψυκτικών) και της τιμολόγησης των ενεργειακών παροχών (ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου) στην λειτουργική επίδοση και οικονομική απόδοση του συστήματος.

Μετά την κατανόηση του συστήματος, διατυπώθηκε το πρόβλημα της πολυστοχικής αριστοποίησης το οποίο επιλύθηκε με τη χρήση εξελκτικών αλγορίθμων. Η αριστοποίηση βασίστηκε σε οικονομικούς, ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς δείκτες επίδοσης για την εύ-

ρση του συνόλου μη κυρίαρχων λύσεων. Αντικείμενο αριστοποίησης ήταν οι μεταβλητές διαστασιολόγησης και λειτουργικές παράμετροι ως διακριτές μεταβλητές.

Λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων αυτών η αβεβαιότητα που υπάρχει δεν μπορεί να αγνοηθεί. Για αυτό το λόγο ποσοτικοποιήθηκε τόσο η αβεβαιότητα της ζήτησης ενέργειας με στοχαστικά πρότυπα όσο και το ρυθμιστικό και γεωπολιτικό ρίσκο εισαγόντας κατανομές στις τιμές πρωτογενούς ενέργειας. Με την χρήση της μεθόδου Monte Carlo συγκρίθηκαν οι βέλτιστες λύσεις και δημιουργήθηκε ένα κριτήριο επιλογής με βάση το επιθυμητό αναλαμβανόμενο ρίσκο ή την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων ακραίων ενδεχομένων.

Οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόστηκαν για την περίπτωση μιας εμπορικής νοσοκομειακής μονάδας. Τα επιλεγμένα συστήματα τριπαραγωγής μπόρεσαν να ικανοποιήσουν κάθε στόχο που τέθηκε με σημαντικά οικονομικά και ενεργειακά οφέλη. Το βέλτιστο μέγεθος του εξοπλισμού που αντιστοιχούσε στη λύση του ενεργειακού άριστου ήταν μεγαλύτερο από αυτή του οικονομικού αλλά μικρότερο από αυτή του περιβαλλοντικού. Η επιλογή του τιμολογίου συσχετίστηκε με έναν δείκτη που περιγράφει τα ηλεκτρικά φορτία.

Με βάση την περιγραφόμενη μεθοδολογία αναπτύχθηκαν παρένθετα πρότυπα για τον γενίκευση του σχεδιασμού των συστημάτων τριπαραγωγής για καταναλωτές με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για αυτό το σκοπό, αναπτύχθηκε εμπειρικό πρότυπο περιγραφής των ποιοτικών χαρακτηριστικών των φορτίων βασισμένο στην καμπύλη διάρκειας φορτίου και τον συγχρονισμό τους. Με την χρήση του προτύπου βρέθηκαν οι άριστες λύσεις και προσαρμόστηκαν για την ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων.

Τέλος, αναπτύχθηκαν θεωρητικοί δείκτες για την σύγκριση της ενεργειακής εξοικονόμησης και της βιωσιμότητας ως συνάρτηση των τιμών ενέργειας, για την σύγκριση των συστημάτων συ- και τριπαραγωγής και εξάχθηκαν εμπειρικοί κανόνες για την βιώσιμη λειτουργία τους και την αποτελεσματικότητα των πολιτικών στήριξης τέτοιων επενδύσεων. Βρέθηκε ότι το συγκριτικό πλεονέκτημα της ΣΗΘ έναντι της ΣΗΘΨ δεν οφείλεται στην εγγενής τεχνολογική υπεροχή και μεγαλύτερη απόδοση της δεύτερης έναντι της πρώτης αλλά στη μεγαλύτερη ευελιξία και ευρύτερο πεδίο εφαρμογής της. Με τη βοήθεια των παραπάνω αξιολογήθηκε η πρόσφατη νομοθετική ρύθμιση που επιδοτεί την πώληση συμπαραγόμενου ηλεκτρισμού στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τεχνολογίες συνδυασμένης παραγωγής ωφελούν τον καταναλωτή, ο οποίος εκτός από την ενεργειακή του αυτονομία απολαμβάνει και σημαντικό λειτουργικό όφελος. Με αυτό το τρόπο οι τεχνολογίες αυτές συμβάλλουν στη δημιουργία ενός ανοιχτότερου συστήματος αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας.

Abstract

Combined energy generation technologies also known as cogeneration, are the most efficient methods for the production of end use energy from conventional sources. With this technology, a big amount of heat that would have been dissipated to the environment is recovered and utilized either directly or via other processes. The development of these technologies has allowed the penetration to the building sector, which consumes 32% of the global end use energy.

The scientific objective of this thesis refers to the analysis of a combined heat cooling power generation system, the identification its critical parameters and its optimization. This thesis focused on the mathematical formulation of the system, on multi-objective optimization, on the quantification of uncertainties and on the development of experience-based rules, models and screening parameters that facilitate the understanding of these systems.

More specifically, the problem of optimal design of trigeneration plants was addressed for the coverage of energy needs of commercial buildings. After the presentation of the system, all critical factors that affect the operation and viability of the system were discussed. For that reason, a mathematical model was developed that represented the integrated energy system as a superstructure and simulated its operation on an hourly basis. A new operation strategy is being introduced and the effect of the variance of energy loads (heating, cooling, electricity) and the pricing of energy (electricity, natural gas) was studied on the economic and energetic performance of the plant.

After the understanding of the system, the problem of multi-objective optimization was formulated, and solved by using evolutionary algorithms. The optimization was based on economic, energetic and environmental criteria for the identification of the non-dominated solution set. The sizing and discrete operational variables were chosen as the optimization variables.

Due to the complexity of these systems the uncertainty involved cannot be ignored.

For that reason, the uncertainty of both energy demand via stochastic models and regulatory geopolitical risk was modeled, by using distribution in the primary energy prices. By using Monte Carlo methods all optimal solutions were compared and a criteria was developed based on the desires risk level or the minimization of extreme events.

All above methods were applied for the case of a commercial hospital unit. The selected trigeneration systems could satisfy all goals that were selected with very important economic and energetic benefits. The optimum equipment size that corresponds to the energy optimum solution was bigger than the one that corresponds to the economic optimum but smaller than environmental optimum solution. The selection of optimum tariffs was correlated with an index that describes the behavior of the electric loads.

Based on the developed methodology, surrogate models were developed for the generalization of trigeneration system design for consumers with different characteristics. For that reason, an empirical model that describes the quality load characteristics was developed based on the load duration curve and their correlation. By using this model, the optimum solutions were identified and fitted for the development of empirical relationships.

Finally, theoretical indices were developed for the comparison of energy savings and viability as a function of energy prices, for the comparison of cogeneration and trigeneration system. Empirical rules were extracted for the viable operation and the effectiveness of policy incentives for such investments was evaluated. It was found that the competitive advantage of cogeneration versus trigeneration is not based on the native technological excellence and bigger efficiency of the latter but on the biggest flexibility and wider range of its application. With the use of the above, the recent policy, that subsidizes the electrical energy produced by cogeneration, was evaluated. The results showed that cogeneration technologies can benefit the consumers, not only by increasing their energy autonomy but also by gaining operational profit. With that way, these technologies can assist in the development of a more open system of distributed generation of energy.

Πρόλογος

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών, στον Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ζαχαρία Μαρούλη και υποστηρίχθηκε οικονομικά από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον Καθηγητή μου Ζαχαρία Μαρούλη για την ανάθεση του θέματος, την αμέριστη βοήθεια και την εμπιστοσύνη του. Η εκπόνηση αυτής της διατριβής οφείλεται στην καθοδήγησή του, στις συμβουλές του αλλά και στην συνεχή του παρότρυνση σε ερευνητικό και προσωπικό επίπεδο. Εγκάρδιες ευχαριστίες οφείλω και στα υπόλοιπα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, στον ομότιμο καθηγητή Δημήτριο Μαρίνο-Κουρή και την επίκουρη καθηγήτρια Μάγδαληνη Κροκίδα που με τη μακρόχρονη εμπειρία τους αλλά και την επιστημονική τους κατάρτιση με βοήθησαν σημαντικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στους αγαπητούς συναδέλφους της εταιρίας ΗΛΙΟ-ΣΤΑΤΗ ΕΠΕ, και ειδικότερα τον Δρ. Χρήστο Κορρέ και την Αρετή Τζαβέλλα για τις πολύτιμες πληροφορίες και τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους και υποψήφιους διδάκτορες στο εργαστήριο ΕΣΑΔ που χωρίς το ευχάριστο κλίμα και την υποστήριξη σε οποιοδήποτε πρόβλημα, αυτά τα χρόνια θα περνούσαν αρκετά πιο δύσκολα. Ακόμη όλους τους φίλους για την υποστήριξη και την κατανόηση όλα αυτά τα χρόνια και την ανοχή τους στα περίεργα ωράρια μου. Τέλος, θέλω να δώσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, που υποστήριξαν με χαρά την απόφαση να συνεχίσω τις σπουδές μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Διατύπωση του προβλήματος	1
1.2	Αντικείμενο και συνεισφορά της διατριβής	3
1.3	Δομή της Διατριβής	4
2	Συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας	7
2.1	Εισαγωγή	7
2.1.1	Πλεονεκτήματα	8
2.1.2	Είδη μονάδων συμπαραγωγής	11
2.2	Υφιστάμενη κατάσταση και νομοθετικό πλαίσιο	13
2.2.1	Ευρώπη	13
2.2.2	Ελλάδα	15
3	Περιγραφή συστήματος και κρίσιμων παραμέτρων	21
3.1	Εισαγωγή	21
3.2	Εξοπλισμός	22
3.2.1	Κινητήρας – Μηχανή Εσωτερικής Καύσης	22
3.2.2	Ψύκτης απορρόφησης	27
3.3	Περιγραφή συστήματος	30
3.4	Κρίσιμες παράμετροι	33
3.4.1	Ενεργειακά φορτία	33
3.4.2	Τιμολόγηση ενεργειακών παροχών	41
3.4.3	Στρατηγικές λειτουργίας	48
4	Μεθοδολογική προσέγγιση	55
4.1	Εισαγωγή	55
4.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	56
4.2.1	Υπολογιστικά εργαλεία	58
4.3	Περιγραφή προτύπου	60
4.3.1	Οικονομικό πρότυπο	64
4.3.2	Κριτήριο ενεργειακής εξοικονόμησης	67
4.3.3	Περιβαλλοντικό κριτήριο	67
4.4	Αριστοποίηση προτύπου	70
4.4.1	Πολυστοχική αριστοποίηση	70
4.4.2	Τεχνική αριστοποίησης – Γενετικοί αλγόριθμοι	71
4.5	Ανάλυση αβεβαιότητας	74
4.5.1	Ανάλυση Monte Carlo και Μέσης Διακύμανσης Χαρτοφυλακίου	75
4.5.2	Στοχαστική περιγραφή τιμών ενέργειας	76
4.5.3	Στοχαστική περιγραφή των ενεργειακών φορτίων	77

5 Μελέτη περίπτωσης	79
5.1 Εισαγωγή	79
5.2 Περιγραφή του εξεταζόμενου συστήματος	80
5.3 Αποτελέσματα	83
5.3.1 Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης	83
5.3.2 Πολυστοχική αριστοποίηση	88
5.3.3 Σχεδιασμός με θεώρηση αβεβαιοτήτων στις βασικές παραμέτρους	100
6 Απλοποιημένος σχεδιασμός και αξιολόγηση λειτουργικής βιωσιμότητας	109
6.1 Εισαγωγή	109
6.2 Απλοποιημένος σχεδιασμός	110
6.2.1 Προτυποποίηση των φορτίων	110
6.2.2 Δημιουργία παρένθετου προτύπου	116
6.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων	121
6.3 Λειτουργική βιωσιμότητα	124
6.3.1 Περιγραφή προτύπου	125
6.3.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων	129
6.3.3 Ρυθμιστικό πλαίσιο στην Ελλάδα	135
7 Συμπεράσματα	139
7.1 Σύνοψη της συνεισφοράς	140
7.2 Ειδικά συμπεράσματα	141
7.3 Γενικά συμπεράσματα	142
7.4 Προτάσεις χάραξης πολιτικής για τη διάδοση τεχνολογιών συμπαραγωγής	143
Α΄ Προσαρμογή παρένθετου προτύπου	145
Ονοματολογία	157
Βιβλιογραφία	159

Κατάλογος σχημάτων

2.1 Σύγκριση συμπαραγωγής με συμβατική παραγωγή ενέργειας	9
2.2 Τυπικό μέγεθος τεχνολογιών συμπαραγωγής	13
2.3 Άδειες παραγωγής για ΣΗΘ στην Ελλάδα	19
3.1 Διάγραμμα ροής ενός τυπικού συστήματος τριπαραγωγής	31
3.2 Ημερήσια προφίλ δύο βιομηχανικών καταναλωτών	35
3.3 Ημερήσιο ενεργειακό προφίλ μιας κατοικίας που απασχολείται και μιας που δεν απασχολείται κατά τη διάρκεια της ημέρας	37
3.4 Ημερήσιο προφίλ 4 εμπορικών καταναλωτών (Σχολείο, Ξενοδοχείο, Γραφεία, Νοσοκομείο)	38
3.5 Ενεργειακός χάρτης (θερμότητας)	39
3.6 Box-plot	39
3.7 Συσχέτιση συντελεστή χρησιμοποίησης με συνολική χρέωση	43
3.8 Επίδραση δυσλειτουργίας του συστήματος στο συντελεστή χρησιμοποίησης και στο κόστος ενέργειας	44
3.9 Τιμή ηλεκτρισμού σε διάφορες χώρες της ΕΕ για βιομηχανικούς καταναλωτές	44
3.10 Μέση ετήσια τιμή ηλεκτρισμού	45
3.11 Διαχρονική εξέλιξη εγγυημένης τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΣΗΘΥΑ	46
3.12 Στρατηγικές λειτουργίας	50
3.13 Παράδειγμα στρατηγικής κάλυψης ισοδύναμων ηλεκτρικών φορτίων	53
4.1 Διάγραμμα ενεργειακών ροών	60
4.2 Τυπική καμπύλη απόδοσης μιας μηχανής εσωτερικής καύσης	63
4.3 Τυπικές καμπύλες κόστους μια ΜΕΚ και ενός ψύκτη απορρόφησης	66
4.4 Ροές πληροφοριών του προβλήματος πολυστοχικής αριστοποίησης	72
4.5 Σύνορο βέλτιστων τιμών	77
5.1 Μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας (kWh/m ²) και ανά κλίση (MWh/κλίση) για διάφορες χώρες	80
5.2 Εποχιακά και ημερήσια ενεργειακά προφίλ	81
5.3 Πρότυπα φορτία για μια τυπική χειμερινή και καλοκαιρινή μέρα	82
5.4 Επίδραση του μεγέθους του κινητήρα στην συνολική ισοδύναμη ζήτηση ηλεκτρισμού	84
5.5 Κάλυψη % των ενεργειακών φορτίων από την εγκατάσταση συμπαραγωγής για διάφορες στρατηγικές και παραμέτρους λειτουργίας	86
5.6 Συντελεστής εξοικονόμησης ενέργειας για διάφορες στρατηγικές και μεγέθη επένδυσης	87
5.7 Επίδραση του μεγέθους του κινητήρα στο συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου	87

5.8	Επίδραση της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα στο ετήσιο λειτουργικό κέρδος για διάφορες στρατηγικές και τιμολόγια	89
5.9	Επίδραση του μεγέθους της επένδυσης στην επιστροφή της επένδυσης για διάφορες στρατηγικές και τιμολόγια	90
5.10	Επίδραση του δοχείου αδρανείας στο συνολικό ετήσιο κέρδος με τη στρατηγική συνεχούς λειτουργίας	91
5.11	Βέλτιστες isoϋφείς για την καθαρά παρούσα αξία (NPV) (k€)	92
5.12	Βέλτιστες isoϋφείς για το λόγο εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας (PESR)	93
5.13	Βέλτιστες isoϋφείς για τη σχετική μείωση εκπομπών (ERR)	93
5.14	Βέλτιστη στρατηγική λειτουργίας ανά μέγεθος για τους καλοκαιρινούς μήνες	94
5.15	Άριστες λύσεις κατά Pareto μεταξύ NPV και PESR στο χώρο μεταβλητών απόφασης	95
5.16	Άριστες λύσεις κατά Pareto μεταξύ NPV και PESR στο χώρο αντικειμενικών συναρτήσεων	95
5.17	Καμπύλες διάρκειας φορτίου για δύο άριστες λύσεις	96
5.18	Διάγραμμα Sankey για οικονομική άριστη λύση	97
5.19	Διάγραμμα Sankey για ενεργειακή άριστη λύση	97
5.20	Σύγκριση του συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου του κτηρίου πριν και μετά την εγκατάσταση, για διαφορετικές άριστες λύσεις	98
5.21	Επίδραση της τιμής του φυσικού αερίου στη βιωσιμότητα της επένδυσης	100
5.22	Βέλτιστες λύσεις για διάφορες τιμές του φυσικού αερίου	101
5.23	Καμπύλες διάρκειας φορτίων για προσομοιωμένα φορτία για διαφορετικά επίπεδα αβεβαιότητας	102
5.24	Κατανομή τιμών φυσικού αερίου	102
5.25	Κατανομή οικονομικής αποδοτικότητας NPV	103
5.26	Βέλτιστοι συνδυασμοί μεγέθους εξοπλισμού	103
5.27	Σύνоро βέλτιστων επιλογών	105
5.28	Σύνоро βέλτιστων επιλογών για ακραίες (θετικά ή αρνητικά) τιμές της NPV	106
5.29	Στοχαστική επικράτηση της λύσης της τριπαραγωγής έναντι της απλής συμπαραγωγής	107
6.1	Πρότυπες κανονικοποιημένες καμπύλες διάρκειας φορτίου	113
6.2	Προσαρμογή της εξίσωσης (6.4) σε πραγματικά φορτία	114
6.3	Παράδειγμα προσομοιωμένων φορτίων	120
6.4	Σύστημα αναφοράς για την κάλυψη δεδομένων ενεργειακών απαιτήσεων με ΣΗΘΨ ή ξεχωριστή παραγωγή	126
6.5	Σύστημα αναφοράς για την κάλυψη δεδομένων ενεργειακών απαιτήσεων εκμεταλλευόμενο τη διαφορά τιμών ηλεκτρισμού στην αγορά	128
6.6	Επίδραση του κλάσματος ψύξης από ανακτώμενη θερμότητα στον ελάχιστο λόγο τιμών <i>CostRatio</i>	130
6.7	Επίδραση χαρακτηριστικών κινητήρα ΣΗΘ στον ελάχιστο λόγο τιμών <i>CostRatio</i>	131
6.8	Επίδραση συντελεστή λειτουργίας των ψυκτών στον ελάχιστο λόγο τιμών <i>CostRatio</i>	131
6.9	Επίδραση απόδοσης υποκαθιστούμενου συμβατικού λέβητα στον ελάχιστο λόγο τιμών <i>CostRatio</i>	132
6.10	Επίδραση λόγου τιμών αγοράς προς πώληση ηλεκτρισμού στον ελάχιστο λόγο τιμών <i>CostRatio</i>	132
6.11	Επίδραση του κλάσματος ψύξης από ανακτώμενη θερμότητα στο λόγο εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας	133
6.12	Επίδραση των χαρακτηριστικών του νέου και υφιστάμενου εξοπλισμού στο λόγο εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας	134
6.13	Ιστορική εξέλιξη του <i>CostRatio</i> για την ελληνική αγορά	135

6.14	Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου λόγου τιμών για βιώσιμη λειτουργία στην ελληνική αγορά	137
6.15	Επιλογή τρόπου λειτουργίας μονάδων ΣΗΘ στην ελληνική αγορά	137
A'.1	Κριτήριο επιλογής αριθμού παραμέτρων	152
A'.2	Προσαρμογή καμπύλης επιφάνειας απόκρισης	153
A'.3	Αλληλεπιδράσεις μεταβλητών στην απόκριση της P	154
A'.4	Αλληλεπιδράσεις μεταβλητών στην απόκριση της A	155
A'.5	Αλληλεπιδράσεις μεταβλητών στην απόκριση της P_0	156

Κατάλογος πινάκων

2.1 Ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε και ρύποι που εκπέμφθηκαν από το ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής (2008)	10
2.2 Ενέργεια (καύσιμο) που καταναλώθηκε για τις ανάγκες θέρμανσης (Δεδομένα 2008)	10
2.3 Χαρακτηριστικά τεχνολογιών συμπαραγωγής	13
2.4 Συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη (<i>MWe</i>)	15
3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά διαφορετικών ψυκτών απορρόφησης	28
3.2 Σύγκριση ψυκτών απορρόφησης και συμβατικών ψυκτών με συμπίεση ατμών	29
3.3 Ενεργειακές Ανάγκες για θέρμανση και ψύξη σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης (<i>kWh/m²</i>)	37
3.4 Ιδιότητες ΦΑ στην Ελλάδα	47
4.1 Συντελεστές εκπομπών στο ελληνικό σύστημα (<i>gr/kWh</i> καταναλωθείσας ενέργειας)	69
5.1 Τιμολογία ηλεκτρισμού στην Ελλάδα (μέχρι Ιανουάριο 2012)	82
5.2 Προδιαγραφές συστήματος	83
5.3 Άριστες λύσεις κατά Pareto για 3 αντικειμενικές συναρτήσεις	99
5.4 Παράμετροι στατιστικών κατανομών για διάφορες άριστες λύσεις	105
6.1 Παράμετροι προσαρμογής	113
6.2 Συσχετισμός ενεργειακών φορτίων	115
6.3 Πειραματικός σχεδιασμός	117
6.4 Μεταβλητές αριστοποίησης	119
6.5 Σύγκριση άριστων λύσεων προσομοιωμένων και πρότυπων φορτίων	119
6.6 Σύνοψη χαρακτηριστικών προσαρμογής	122
6.7 Παράμετροι της εξίσωσης (6.19)	130
Α'.1 Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής <i>OpCost</i>	146
Α'.2 Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής <i>P0</i>	147
Α'.3 Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής <i>P</i>	148
Α'.4 Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής <i>A</i>	149
Α'.5 Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής <i>NPV</i>	150
Α'.6 Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής <i>NPV0</i>	151

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Διατύπωση του προβλήματος

Η ενέργεια ανέκαθεν κατείχε σημαντική θέση στη ζωή των ανθρώπων, κυρίως λόγω της δυνατότητας που τους προσφέρει να ικανοποιήσουν βασικές βιοτικές τους ανάγκες. Έχει συνδεθεί άμεσα με την ανάπτυξη και θεωρείται ως ο σημαντικότερος παράγοντας που θα μπορούσε να την επιβραδύνει, σε περίπτωση που δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Η παγκόσμια ενεργειακή κρίση, που σηματοδοτείται από την αύξηση των τιμών και τη μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, επιβάλλει την ορθολογικότερη χρήση της πρωτογενούς ενέργειας. Τα προβλήματα που αφορούν στο περιβάλλον και την ενέργεια επανέρχονται στην παγκόσμια ατζέντα. Μετά από δεκαετίες υπεραξιοποίησης των φυσικών πόρων, τα αποθέματα των συμβατικών πηγών ενέργειας μειώνονται, γεγονός που επισκιάζει την ενεργειακή διαθεσιμότητα. Ειδικά τον τελευταίο αιώνα, η ανθρώπινη συμπεριφορά προς τον πλανήτη και τη φύση οδήγησε σε καταστροφή και μόλυνση πολλών φυσικών οικοσυστημάτων. Η εκβιομηχάνιση των αναπτυσσόμενων χωρών αφενός και αφετέρου η αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με την υπερκαταναλωτική φύση των ανθρώπων δεν αναμένεται να αντιστρέψουν αυτή τη πορεία. Τα βασικά ζητήματα στα οποία πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή είναι η διαθεσιμότητα, η ενεργειακή ασφάλεια και οι φιλικές με το περιβάλλον τεχνολογίες.

Βασικό αξίωμα το οποίο οφείλει να μην παραγνωρίζεται σε κάθε απόπειρα εκπόνησης μιας αντίστοιχης μελέτης είναι ότι η πολυτιμότερη ενέργεια είναι αυτή η οποία δεν καταναλώνεται και ως εκ τούτου δεν χρειάζεται να παραχθεί. Στις περιπτώσεις που αυτό δεν καθίσταται εφικτό, θα πρέπει να αναπτυχθούν οι μέθοδοι εκείνες που θα αξιοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερη πρωτογενή ενέργεια. Αυτή η αντίληψη έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών παραγωγής και εξοικονόμησης ενέργειας. Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πράγματι αποτελούν έναν τρόπο βελτίωσης της ενεργειακής εξοικονόμησης, δεν μπορούμε να βασιστούμε μόνο σε ανανεώσιμες πηγές λόγω της διαλλείπουσας στοχαστικής παραγωγ-

γής ενέργειας. Από την άλλη, ο τρόπος που παραγόταν η ενέργεια μέχρι τώρα ήταν κυρίως μέσω της χρήσης ορυκτών καυσίμων (80% της πρωτογενούς ενέργειας). Οι συμβατικές μέθοδοι ηλεκτροπαραγωγής όμως δε θεωρούνται πλέον αποδοτικές καθώς μετατρέπουν μόνο το ένα τρίτο της ενέργειας του καυσίμου σε ωφέλιμη ενέργεια. Κατά συνέπεια τα δύο τρίτα της πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή θερμότητας. Με τη μέθοδο της συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας σημαντικό μέρος της παραγόμενης θερμότητας ανακτάται και χρησιμοποιείται ωφέλιμα είτε απευθείας είτε μέσω άλλων διεργασιών.

Ένας από τους σημαντικότερους τομείς όπου μπορούν να ενσωματωθούν αυτόνομα ενεργειακά συστήματα είναι ο τομέας των κτηρίων. Τα κτήρια αντιπροσωπεύουν το 32% της ενέργειας για τελική χρήση. Σε όρους κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, τα κτήρια αντιπροσωπεύουν περίπου το 40% στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες [1].

Η επένδυση σε συστήματα συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας, ως μέτρα ενεργειακής εξοικονόμησης, βασίζεται κυρίως στην ιδιωτική πρωτοβουλία γι' αυτό η ενεργειακή εξοικονόμηση αυτή πρέπει να συνοδεύεται και από οικονομικό όφελος για τον καταναλωτή.

Τα ενσωματωμένα αυτόνομα ενεργειακά συστήματα για τα κτήρια μπορούν να εφαρμοστούν με καύσιμο το φυσικό αέριο. Σύμφωνα με την ΙΕΑ εισερχόμαστε στη χρυσή εποχή για το φυσικό αέριο, όπου προβλέπεται να γίνει το κυρίαρχο καύσιμο μέχρι το 2030 [2]. Βασικοί λόγοι που το θέτουν σε αυτή τη θέση είναι η ανακάλυψη πολλών αποδεδειγμένων—συμβατικών και μη—κοιτασμάτων σε συνδυασμό με τις νέες αποδοτικές φτηνές τεχνολογίες εξόρυξης του αλλά και οι καθαρότερες εκπομπές του σε σύγκριση με άλλα ανταγωνιστικά προς αυτό καύσιμα.

Παρόλο που τα πλεονεκτήματα της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας (ΣΗΘ) είναι προφανή, υπάρχουν κάποιες παράμετροι που λειτουργούν ανασταλτικά και πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εφαρμογή της, όπως η αύξηση των τιμών του πετρελαίου και κατά συνέπεια του φυσικού αερίου που λειτουργούν εις βάρος της ΣΗΘ, η δυσκολία στον προσδιορισμό των βασικών μεγεθών για οικονομοτεχνικές αναλύσεις στον ενεργειακό τομέα, η έλλειψη ανταγωνιστικής τιμολογιακής πολιτικής για συμπαραγωγή στον τριτογενή τομέα και βιομηχανικό τομέα και η έλλειψη εμπειρίας στην ενεργειακή διαχείριση και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων.

Μέσω της μελέτης αυτών των παραμέτρων, αναδύεται η ανάγκη συγκρότησης μεθόδων που θα καθορίζουν με ακρίβεια το πεδίο εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών καθώς και το βέλτιστο τρόπο για την ενσωμάτωση αυτόνομων ενεργειακών συστημάτων πολλών προϊόντων.

Στην παρούσα διατριβή θα μελετηθούν επίσης η επίδραση των αυτόνομων ενεργειακών συστημάτων ΣΗΘ στην ενεργειακή αποδοτικότητα, οι πολιτικές που μπορούν να εφαρμοστούν για να γίνουν οι επενδύσεις ενεργειακής εξοικονόμησης βιώσιμες με τη σύμπτωση οικονομικού και ενεργειακού αρίστου αλλά και οι τρόποι με τους οποίους η ενσωμάτωση ολοκληρωμένων ενεργειακών συστημάτων θα συμβάλει στην ενεργειακή εξοικονόμηση και στην αυτάρκεια του συστήματος στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης και της περιβαλλοντικής συνείδησης.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η παρούσα διατριβή θα επιχειρήσει να απαντήσει στο εξής ερώτημα:

Ποιο είναι το άριστο σύστημα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτηρίων, ποιές είναι οι κρίσιμες παράμετροι, πώς επηρεάζουν το σχεδιασμό, τη λειτουργία, την οικονομική και ενεργειακή αποδοτικότητα

1.2 Αντικείμενο και συνεισφορά της διατριβής

Ο γενικός σκοπός αυτής της διατριβής είναι να παράσχει νέα γνώση στην προτυποποίηση και προσομοίωση των συστημάτων συνδυασμένης παραγωγής με σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας τους, των αλληλεπιδράσεων των κρίσιμων μεταβλητών και τη χρήση των παραπάνω μεθόδων σε μελέτες σκοπιμότητας. Επιπλέον, η διατριβή εστιάζει στην εφαρμογή της μεθοδολογίας για την ανάπτυξη γενικευμένων συμπερασμάτων. Για την επίτευξη του σκοπού τέθηκαν οι εξής στόχοι:

- Ανασκόπηση της έρευνας που έχει γίνει στη χρήση τεχνικών αριστοποίησης για συστήματα συνδυασμένης παραγωγής.
- Προσδιορισμός βέλτιστου συστήματος κατάλληλου για την εφαρμογή σε κτήρια.
- Ανάπτυξη υπολογιστικού προτύπου για την αριστοποίηση του σχεδιασμού συστημάτων συνδυασμένης παραγωγής βασισμένο σε διαφορετικά κριτήρια (στόχους) και συμπεριλαμβάνοντας τη θεώρηση αβεβαιοτήτων.
- Θεώρηση αβεβαιοτήτων για τον υπολογισμό της κατανομής αποτελεσμάτων και όχι μόνο για την αναμενόμενη τιμή.
- Επίδειξη του υπολογιστικού προτύπου για την ανάλυση μιας μελέτης περίπτωσης.
- Προτυποποίηση των ενεργειακών αναγκών για την ομαδοποίηση και γενίκευση των συμπερασμάτων.

- Συγκριτική αξιολόγηση των μονάδων συνδυασμένης παραγωγής.

Σκοπός αυτής της διατριβής είναι η παρουσίαση μια ολοκληρωμένης μεθόδου σχεδιασμού ενός συστήματος συνδυασμένης παραγωγής μελετώντας την επίδραση όλων των κρίσιμων παραμέτρων και παρουσιάζοντας συγκριτικά τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών διατάξεων. Χρησιμοποιήθηκε ένα λεπτομερές ωριαίο πρότυπο και μελετήθηκε η διακύμανση διάφορων οικονομικών (καθαρά παρούσα αξία, λειτουργικό κέρδος, επιστροφή στην επένδυση) και λειτουργικών παραμέτρων (κάλυψη φορτίων, πρωτογενής εξοικονόμηση ενέργειας, συντελεστής χρησιμοποίησης φορτίου) ως συνάρτηση του μεγέθους του κινητήρα για διαφορετικές διατάξεις και λειτουργικές παραμέτρους (στρατηγική λειτουργίας, επιλογή τιμολογίου). Η μέθοδος επεκτείνεται και στην αριστοποίηση του συστήματος που βασίζεται σε πολλαπλά κριτήρια (οικονομικά, ενεργειακά και περιβαλλοντικά). Το σύνολο των άριστων λύσεων αξιολογείται και η επίδραση των μεταβλητών αριστοποίησης στα χαρακτηριστικά του συστήματος μελετάται στα πλαίσια μιας τυπικής νοσοκομειακής μονάδας. Τα πιθανά πλεονεκτήματα και η ευαισθησία των εναλλακτικών λύσεων παρουσιάζονται συγκριτικά με σκοπό να καταδειχτεί το εύρος της διακύμανσης των μεταβλητών.

1.3 Δομή της Διατριβής

Η διατριβή αποτελείται συνολικά από επτά κεφάλαια, τη βιβλιογραφία και ένα παράρτημα. Η διάρθρωσή της έχει ως εξής:

Το *Κεφάλαιο 1* ολοκληρώνεται με τη παρούσα ενότητα.

Στο *Κεφάλαιο 2* αναλύονται οι τεχνολογίες συμπαραγωγής, γίνεται μια συνοπτική ανασκόπηση στο συγκριτικό πλεονέκτημα και το πεδίο εφαρμογής κάθε τεχνολογίας, και παρουσιάζεται το θεσμικό πλαίσιο αλλά και η υφιστάμενη κατάσταση σε Ελλάδα και Ευρώπη.

Στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία του εξεταζόμενου συστήματος και οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό του.

Στο *Κεφάλαιο 4* περιγράφεται το μαθηματικό πρότυπο που περιγράφει το φυσικό σύστημα καθώς και οι κατάλληλες μεθοδολογίες για την επίλυση του προβλήματος αριστοποίησης μιας μεταβλητής, πολλών μεταβλητών και αριστοποίησης με τη θεώρηση αβεβαιοτήτων.

Το *Κεφάλαιο 5* εξετάζει μια μελέτη περίπτωσης εφαρμόζοντας την περιγραφόμενη μεθοδολογία του περιγραφόμενου συστήματος τριπαραγωγής σε εμπορικό κτήριο. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η επίδραση των μεταβλητών σχεδιασμού στην άριστη λύση και προτείνονται οι βέλτιστες λειτουργικές παράμετροι. Τα αποτελέσματα αφορούν στη διαστασιολόγηση, την παραμετρική ανάλυση διάφορων κρίσιμων μεταβλητών, τη βέλτιστη επιλογή λειτουργι-

κών παραμέτρων, την πολυστοχική αριστοποίηση για την εύρεση της άριστης οικονομικής, ενεργειακής και περιβαλλοντικής λύσης. Έπειτα από την επίλυση των αιτιοκρατικών προτύπων ακολουθεί η στοχαστική επίλυσή τους λαμβάνοντας υπόψιν τους κύριους παράγοντες αβεβαιότητας.

Στο *Κεφάλαιο 6* παρουσιάζεται μια μέθοδος για έναν απλοποιημένο σχεδιασμό εγκαταστάσεων τριπαραγωγής. Γι' αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο βασισμένο στην καμπύλη διάρκειας φορτίου. Μελετάται η επίδραση αυτών των χαρακτηριστικών στο άριστο μέγεθος και στις βέλτιστες λειτουργικές παραμέτρους με τη χρήση παρένθετου προτύπου. Επίσης, αναπτύσσονται θεωρητικοί δείκτες για τη σύγκριση της ενεργειακής εξοικονόμησης και της βιωσιμότητας ως συνάρτηση των τιμών ενέργειας, για τη σύγκριση των συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής και ακολούθως εξάγονται εμπειρικοί κανόνες.

Στο *Κεφάλαιο 7* γίνεται μια ανακεφαλαίωση των ερωτημάτων που τέθηκαν στην αρχή της διατριβής και μια σύντομη ανακεφαλαίωση της μεθοδολογικής προσέγγισης. Αναλύονται τα γενικότερα συμπεράσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Παράλληλα γίνεται αναφορά σε πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας

Τεχνολογίες συμπαραγωγής, περιγραφή και συγκριτικό πλεονέκτημα, το πεδίο εφαρμογής και ο ρόλος τους στο ενεργειακό σύστημα, το θεσμικό πλαίσιο και η υφιστάμενη κατάσταση και οι προοπτικές ανάπτυξης σε Ελλάδα και Ευρώπη.

2.1 Εισαγωγή

Η Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας ή αλλιώς ΣΗΘ είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας συνήθως κοντά στο χώρο της τελικής χρήσης. Με τη μέθοδο της συμπαραγωγής, σημαντικό μέρος της θερμότητας αυτής ανακτάται και χρησιμοποιείται ωφέλιμα. Με το συμβατικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεγάλες ποσότητες θερμότητας απορρίπτονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωτές, πύργοι ψύξης κλπ) είτε μέσω των καυσαερίων (αεροστρόβιλοι κλπ). Η συμπαραγωγή βασίζεται στη θερμοδυναμικά αποδοτική χρήση του καυσίμου, αξιοποιώντας μέρος της περίσσειας θερμότητας που θα απορριπτόταν στο περιβάλλον.

Η συμπαραγωγή συνεπώς δεν είναι μία συγκεκριμένη τεχνολογία αλλά συνέργεια διαφόρων τεχνολογιών που σε συνδυασμό καλύπτουν ηλεκτρικές και θερμικές ανάγκες βελτιώνοντας έτσι το συνολικό βαθμό απόδοσης. Για παράδειγμα, ως σύστημα συμπαραγωγής θα μπορούσε να θεωρηθεί το σύστημα θέρμανσης των αυτοκινήτων το οποίο ζεσταίνει το χώρο από την απορριπτόμενη θερμότητα του κινητήρα. Τα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να θεωρηθούν ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα, με την έννοια ότι μπορούν να καλύψουν όλες τις τελικές ενεργειακές χρήσεις (ηλεκτρισμό, θερμό νερό, ατμό, θερμό αέρα, ψύξη). Η συμπαραγωγή συμπεριλαμβάνεται στις αποδοτικές τεχνολογίες παραγωγής θερμότητας, ψύξης και ηλεκτρισμού που μπορούν να μειώσουν τις συνολικές εκπομπές CO₂ μέχρι και 2 γιγατόνους και να εξοικονομήσουν 710 εκατομύρια ισοδύναμους τόνους πετρελαίου μέχρι το 2050. Εκτιμάται ότι χρειάζεται να διατεθούν για έρευνα και ανάπτυξη επιπλέον 3,5

δισεκατομύρια δολάρια το χρόνο μέχρι το 2030 για τέτοιες τεχνολογίες, εστιάζοντας κυρίως στη μείωση του κόστους, στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την ολοκλήρωση των επιμέρους στοιχείων τους [1].

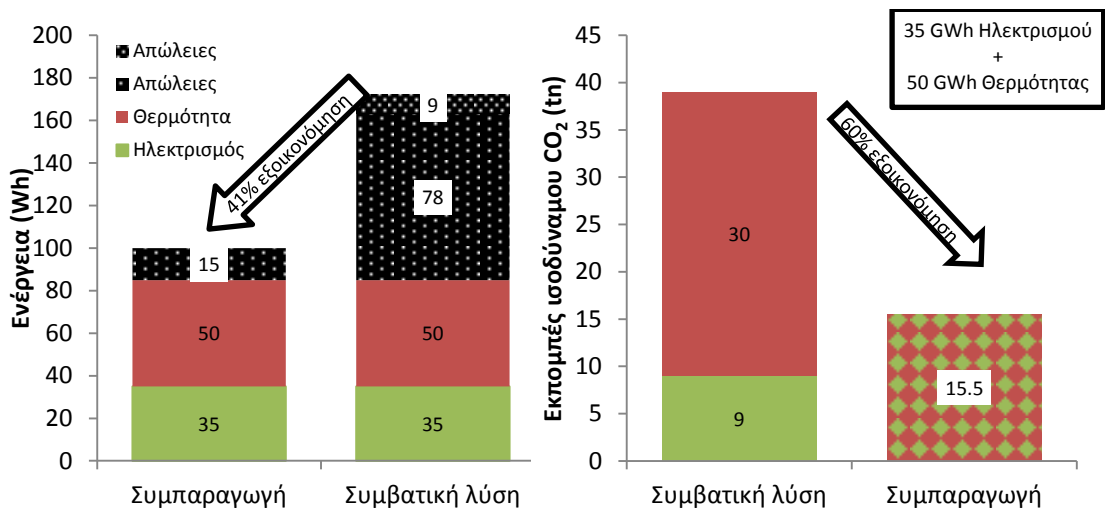
Είναι προφανές ότι οι προοπτικές διείσδυσης αυτής της τεχνολογίας είναι μεγάλες. Παρόλο που η λογική της συμπαραγωγής έρχεται περισσότερο στο προσκήνιο την τελευταία δεκαετία, οι απαρχές της βρίσκονται στις αρχές του 20ου αιώνα. Η απελευθέρωση της ενεργειακής αγοράς αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον και για τους ιδιώτες που μπορούν να χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία είτε για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες (αυτοπαραγωγή) είτε ως ευκαιρία επένδυσης με την πώληση του παραγόμενου ηλεκτρισμού στο δίκτυο (παραγωγή). Αρχικά ενδιαφέρθηκαν οι βιομηχανίες για να τροφοδοτούν τις διεργασίες τους με «φτηνό» ηλεκτρισμό και θερμότητα διαθέτοντας τις υποδομές για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος. Ακολούθησαν πελάτες του εμπορικού τομέα με μεγάλες εγκαταστάσεις και πολλές ώρες λειτουργίας, όπως νοσοκομεία, ξενοδοχεία, εμπορικά κέντρα κ.ο.κ. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ικανότητα κατασκευής μονάδων σε πολύ μικρή κλίμακα (10kW) τα τελευταία χρόνια η συμπαραγωγή έχει αρχίσει να διεισδύει και στον οικιακό τομέα (micro-CHP) [3].

Ακόμα πιο πρόσφατες εξελίξεις επέτρεψαν τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων όπως υδρογόνο (μέσω κυψελών καυσίμου), βιομάζα, ή μετατροπή της περίσσειας θερμότητας σε ψύξη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον κλιματισμό των κτηρίων και άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Αυτή η τεχνολογία είναι γνωστή και ως τριπαραγωγή ή αλλιώς *συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού θερμότητας και ψύξης* (ΣΗΘΨ), ανήκει και μοιράζεται όλα τα πλεονεκτήματα και τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών συμπαραγωγής. Έγινε πρόσφατα οικονομικά βιώσιμη λόγω της εμπορικής εξάπλωσης των ψυκτών απορρόφησης [4] ή άλλων τεχνολογιών που ενεργοποιούνται με θερμότητα, δηλαδή τεχνολογιών που χρησιμοποιούν θερμότητα χαμηλής ενθαλπίας ως καύσιμο για παραγωγή ψύξης αντικαθιστώντας τον ηλεκτρικό κλιματισμό ή εξοπλισμό αφύγρανσης. Η βασική αρχή λειτουργίας πίσω από τα συστήματα τριπαραγωγής είναι ότι μετατρέπουν τη μηχανική ισχύ του κινητήρα σε ηλεκτρική ισχύ. Η περίσσεια θερμότητας που ανακτάται καλύπτει τη θερμική και ψυκτική ισχύ μέσω ενός ψυκτικού απορρόφησης.

2.1.1 Πλεονεκτήματα

Το σημαντικότερο όφελος της τεχνολογίας ΣΗΘ, ως παραγωγικής διαδικασίας, είναι—όπως αναφέρθηκε—η αποδοτικότερη αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω του μεγαλύτερου συνολικού βαθμού απόδοσης, αφού παράγει

ταυτόχρονα θερμική και ηλεκτρική (ή μηχανική) ενέργεια στο πλαίσιο μιας μόνο διεργασίας. Από ένα τυπικό σύστημα ΣΗΘ, 100 μονάδες καυσίμου μπορούν να δώσουν 35 μονάδες ηλεκτρισμού και 50 μονάδες θερμότητας, δηλαδή 85% συνολική απόδοση (Σχήμα 2.1). Αν οι ίδιες ποσότητες ενέργειας παράγονταν ξεχωριστά, θα χρειαζόνταν 113 μονάδες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρισμού και 59 μονάδες για την παραγωγή θερμότητας, μειώνοντας το συνολικό βαθμό απόδοσης στο 50%. Το ακριβές ποσοστό της εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται είναι συνάρτηση των ενεργειακών αναγκών του κάθε καταναλωτή και των ειδικών χαρακτηριστικών των φορτίων που θα καλυφθούν από τη μονάδα ΣΗΘ. Σύμφωνα με τη νομοθεσία, αν η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας είναι πάνω από 10% για εξοπλισμό πάνω από 1MWe ή απλά θετική για μικρότερο εξοπλισμό, τότε η εγκατάσταση θεωρείται ΣΗΘ Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ). Η εξοικονόμηση ενέργειας αντικατοπτρίζεται και στην οικονομική απόδοση μιας τέτοιας μονάδας αφού για την κάλυψη των ίδιων αναγκών μειώνονται τα λειτουργικά κόστη. Παράλληλα, μειώνονται οι εκπομπές ρύπων συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην επίτευξη εθνικών στόχων.



Σχήμα 2.1: Σύγκριση συμπααραγωγής με συμβατική παραγωγή ενέργειας

Προκειμένου να γίνει κατανοητό το συγκριτικό πλεονέκτημα της συμπααραγωγής, παρουσιάζεται η υφιστάμενη κατάσταση του ελληνικού ενεργειακού συστήματος [5]. Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε καθώς και οι συνολικές εκπομπές εκφρασμένες σε ισοδύναμο διοξείδιο του άνθρακα. Στον Πίνακα 2.2 συνοψίζεται η ενέργεια που καταναλώθηκε για ανάγκες θέρμανσης και οι αντίστοιχες εκπομπές. Φαίνεται λοιπόν ότι για κάθε μια γιγαβατώρα ηλεκτρισμού που παράγεται από το ελληνικό ενεργειακό σύστημα εκλύονται 843 kg CO₂eq (= ισοδύναμες εκπομπές αέριων θερμοκηπίου). Αντίστοιχα

για να παραχθεί 1GWh θερμότητας από την καύση φυσικού αερίου, που θεωρείται σήμερα το πιο φιλικό στο περιβάλλον καύσιμο ($1GWh \rightarrow 155kgCO_{2eq}$), εκλύονται περίπου 180 kg CO_{2eq}. Για το παράδειγμα του Σχήματος 2.1 αν υποθέσουμε ότι χρειάζονται 35 GWh ηλεκτρισμού και 50 GWh θερμότητας θα εκλύονται συνολικά 39 τόνοι CO_{2eq}. Αν εφαρμοζόταν συμπαραγωγή με καύσιμο φυσικό αέριο, θα εκλύονταν μόλις 15,5 τόνοι CO_{2eq}, μειώνοντας δηλαδή τις συνολικές εκπομπές κατά 60% (Σχήμα 2.1). Η μείωση αυτή προέρχεται τόσο από την μείωση της απαιτούμενης ενέργειας, λόγω του μεγαλύτερου συνολικού βαθμού απόδοσης, όσο και από την 'καθαρότερη' τεχνολογία συγκριτικά με το κεντρικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής.

Πίνακας 2.1: Ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε και ρύποι που εκπέμφθηκαν από το ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής (2008)

	Σύνολο καυσίμων	Φυσικό Αέριο
Εκπομπές CO _{2eq} (kt)	53.308	5.575
Συνολική παραγωγή (GWh)	63.239	13.797
CO _{2eq} (kt / GWh) (gross)	0,843	0,404

Πίνακας 2.2: Ενέργεια (καύσιμο) που καταναλώθηκε για τις ανάγκες θέρμανσης (Δεδομένα 2008)

	Τριτογενής	Οικιακός	Σύνολο
Κατανάλωση Υγρά (GWh)	4.603	29.937	34.541
Κατανάλωση ΦΑ (GWh)	1.498	2.413	3.911
Εκπομπές CO _{2eq} (kt)	1.600	9.661	11.261
CO _{2eq} (kt / GWh) (μικτό)	0,262	0,299	0,293

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό των τεχνολογιών συμπαραγωγής είναι το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρότερη κλίμακα στο χώρο που καταναλώνεται η ενέργεια και όχι σε ένα μεγάλο κεντρικό σταθμό. Η «Διανεμημένη Παραγωγή», όπως ονομάζεται το παραπάνω χαρακτηριστικό, συμβάλλει στην αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αποφεύγοντας τις απώλειες μεταφοράς και αυξάνοντας την ευελιξία του συστήματος που χρησιμοποιείται [6].

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα της συμπαραγωγής εντάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- *Οικονομία:* Μειώνει τα κόστη καυσίμου και ηλεκτρισμού. Επιπλέον, συμβάλλοντας στην απελευθέρωση της ηλεκτροπαραγωγής, βελτιώνει την ανταγωνιστικότητα.
- *Ενέργεια:* Συνεισφέρει στην εξοικονόμηση πρωτογενούς καυσίμου μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα.

- *Αξιοπιστία*: Μειώνει την επίδραση των φαινομένων συμφόρησης ή διακοπής του δικτύου. Συνεισφέρει στην εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμιακής ζήτησης, μειώνοντας τον κίνδυνο πτώσης του δικτύου.
- *Περιβάλλον*: Μειώνει το ποσό του καυσίμου που καίγεται ανα μονάδα ενέργειας, συνεισφέροντας έτσι στον περιορισμό των εκπομπών αερίων που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- *Αποκέντρωση*: Αποκεντρώνει το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής συμβάλλοντας στην ευστάθειά του και στη μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού.

Συνεπώς, τα συστήματα συμπαραγωγής ή τριπαραγωγής παράγουν ηλεκτρισμό, θερμότητα και ψύξη χρησιμοποιώντας την πρωτογενή ενέργεια του καυσίμου πιο αποδοτικά, οικονομικά, αξιόπιστα και με λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον από την κεντρική ξεχωριστή παραγωγή [7–9].

2.1.2 Είδη μονάδων συμπαραγωγής

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου κινητήρα επηρεάζεται από το μέγεθος και την ποιότητα των απαιτούμενων ενεργειακών φορτίων, το διαθέσιμο τύπο και ποιότητα καυσίμου, και την τιμή αγοράς και πώλησης ηλεκτρισμού [10]. Συνήθως οι κινητήρες κατανέμονται με βάση τις προτεραιότητες κάλυψης των φορτίων ως εξής:

- Συστήματα κορυφής: Ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η θερμότητα, που αποβάλλεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες για την παροχή ζεστού νερού, τη θέρμανση χώρων ή ακόμα και στην παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Συστήματα βάσης: Σε αυτά τα συστήματα η παραγωγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας είναι η πρώτη προτεραιότητα. Αυτά υπάρχουν συνήθως σε βαριές βιομηχανίες, όπου είναι απαραίτητη η χρήση υψηλής θερμοκρασίας για διάφορες διεργασίες, όπως π.χ. σε φούρνους χαλυβουργείων, υαλουργείων, κλιβάνους τσιμεντοβιομηχανιών κλπ. Τα θερμά αέρια διοχετεύονται στη συνέχεια είτε σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπου παράγεται ατμός που κινεί ατμοστρόβιλο-γεννήτρια είτε σε αεριοστρόβιλο, ο οποίος κινεί μια ηλεκτρογεννήτρια.

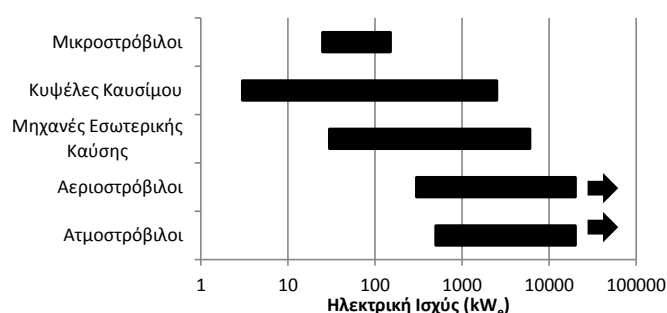
Οι πιο δημοφιλείς τύποι κινητήρων είναι οι εξής [7]:

- *Μικροστρόβιλοι*: Αυτού του είδους η τεχνολογία αποτελείται από μικρούς ηλεκτροκινητήρες που καίνε υγρά ή αέρια καύσιμα με σκοπό τη δημιουργία μηχανικής ενέργειας

που κινεί μια ηλεκτρογεννήτρια. Έχουν μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του καυσίμου, είναι διαθέσιμοι σε πολύ μικρές δυναμικότητες και παρέχουν ζεστό νερό. Αυτή η τεχνολογία έχει σχετικά χαμηλή απόδοση αλλά υψηλό λόγο θερμότητας προς ηλεκτρισμό. Είναι η προτιμώμενη τεχνολογία για εφαρμογές μικρο-συμπαγωγής, δηλαδή για φορτία μικρότερα από $35kW_e$.

- *Μηχανές Εσωτερικής Καύσης*: Αυτή η τεχνολογία είναι διαθέσιμη για εφαρμογές μεσαίας κλίμακας με συνολική απόδοση 85-90% και συνήθως χαμηλό λόγο θερμότητας προς ηλεκτρισμό. Συνήθως, μέρος της περίσσειας θερμότητας ανακτάται από τα καυσαέρια (υψηλή ποιότητα), από το μανδύα του κινητήρα, τα λάδια και τη ψύξη του intercooler (χαμηλή ποιότητα). Γι' αυτό το λόγο είναι ευέλικτες, κατάλληλες για μεσαίους καταναλωτές που δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε θερμότητα καθώς δίνουν ζεστό νερό ή ατμό χαμηλής πίεσης. Χαρακτηριστικό των κινητήρων αυτών είναι ο υψηλός λόγος συμπίεσης που μπορεί να λειτουργεί ικανοποιητικά σε μερικά φορτία, αλλά με μια μικρή μείωση στη συνολική απόδοση [11]. Συνήθως πωλούνται ως τυποποιημένα πακέτα ΣΗΘ και προτιμώνται από μεγάλους εμπορικούς καταναλωτές.
- *Ατμοστρόβιλοι*: Οι ατμοστρόβιλοι είναι από τις παλαιότερες και πιο δοκιμασμένες τεχνολογίες. Έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε χώρο αλλά δίνουν ατμό πολύ υψηλής πίεσης. Οι βασικότεροι δύο τύποι λειτουργίας είναι με αύξηση της πίεσης αντίθλιψης (backpressure) και με εξαγωγή/συμπύκνωση (extraction/ condensing). Απευθύνονται συνήθως σε μεγάλους καταναλωτές με απαιτήσεις για μεγάλη πτώση πίεσης.
- *Αεροστρόβιλοι*: Είναι ευέλικτες και απλές στη λειτουργία τεχνολογίες και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, ειδικά όπου χρειάζονται πολλά θερμικά φορτία σε σχέση με τα ηλεκτρικά. Μπορούν να παράγουν θερμότητα υψηλής ποιότητας.
- *Συνδυασμένου Κύκλου*: Σε αυτά τα συστήματα τα καυσαέρια περνάνε από έναν εναλλάκτη θερμότητας και παράγουν ατμό που εκτονώνεται σε έναν ατμοστρόβιλο. Παράγουν θερμότητα μέτριας ποιότητας και έχουν πολύ χαμηλό λόγο θερμότητας προς ηλεκτρισμό σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, καθώς μεγάλο μέρος της θερμότητας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού στον ατμοστρόβιλο. Συνήθως λόγω της πολυπλοκότητας αυτή η τεχνολογία είναι κατάλληλη για μεγαλύτερα συστήματα, δηλαδή για πάνω από 40-50 MW_e)

Ο Πίνακας 2.3 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των πιο συνηθισμένων τεχνολογιών όπως συζητώνται παραπάνω. Άλλες νεότερες και καθαρότερες τεχνολογίες κερδίζουν συνεχώς έδαφος στην αγορά συμπαγωγής, όπως οι τεχνολογίες που αξιοποιούν βιομάζα ή οι κυψέλες καυσίμου [12]. Παρόλο που οι τελευταίες είναι εξαιρετικά καθαρή τεχνολογία, εί-



Σχήμα 2.2: Τυπικό μέγεθος τεχνολογιών συμπαραγωγής

ναι ακόμα πάρα πολύ ακριβές για την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους. Λύσεις τέτοιου τύπου δεν έχουν την απαιτούμενη ωριμότητα για να χρησιμοποιηθούν εμπορικά σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών. Η επιλογή του κατάλληλου κινητήρα εξαρτάται κυρίως από τη απαιτούμενη δυναμικότητα (Σχήμα 2.2) και το προφίλ του καταναλωτή.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά τεχνολογιών συμπαραγωγής

Τύπος	Θ/Η	Ηλεκτρική Απόδοση (%)	Κόστος Λειτουργίας (€/kWh)
Ατμοστρόβιλοι	3-10	10 - 20	0,002
Αεριοστρόβιλοι	0,5 - 1,1	20 - 40	0,007
Μηχανές εσωτερικής καύσης	1,3 - 2	30-35	0,01
Μικροστρόβιλοι	0,5	20 - 25	0,005
Κυψ. Καυσίμου	1 - 2	35 - 60	>0,02

2.2 Υφιστάμενη κατάσταση και νομοθετικό πλαίσιο

2.2.1 Ευρώπη

Η Ε.Ε την αντιμετωπίζει ως την πλέον αποτελεσματική και αποδοτική μορφή ηλεκτροπαραγωγής και προστασίας του περιβάλλοντος και την προωθεί ως μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες, κυρίως μέσα από το νέο προτεινόμενο νομοθετικό πλαίσιο για την κλιματική αλλαγή, με την εφαρμογή σημαντικών κινήτρων για τους επενδυτές. Οι δύο βασικές κοινωνικές οδηγίες που αφορούν στη συμπαραγωγή είναι οι εξής:

- 2004/8/EC: «Προώθηση της συμπαραγωγής ενέργειας βάσει της ζήτησης για χρηστή θερμότητα στην εσωτερική αγορά ενέργειας και για την τροποποίηση της οδηγίας 92/42/ΕΟΚ» [13]. Δημιουργεί το πλαίσιο για την προώθηση συμπαραγωγής ενέργειας

με βάση τη ζήτηση για χρήσιμη θερμότητα. Εισάγει την έννοια της Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Αποδοτικότητας (ΣΗΘΥΑ), κατηγοριοποιώντας τα συστήματα ΣΗΘ ανάλογα με την ισχύ τους σε πολύ μικρή ΣΗΘ (έως 50 kWe), μικρή ΣΗΘ (έως 1 MWe) και ΣΗΘ (>1 MWe).

- 2006/32/EC: «Οικολογικός σχεδιασμός προϊόντων που καταναλώνουν ενέργεια» (Eco-design of energy-using products), όπου δημιουργεί το πλαίσιο για τον οικολογικό σχεδιασμό προϊόντων που καταναλώνουν ενέργεια και αφορά συστήματα πολύ μικρής και μικρής ΣΗΘ.

Ο απολογισμός των Κρατών-Μελών, υπο το πρίσμα της Κοινοτικής Οδηγίας 2004/8/EC, επιβεβαιώνει την αύξηση κατά περίπου 100 GWe της εγκατεστημένης ισχύος για Συμπααραγωγή στην ΕΕ μέχρι το 2020 [14]. Όλο και περισσότερες χώρες διαμορφώνουν το νομικό τους πλαίσιο για να ενσωματώσουν αυτήν την οδηγία κάνοντας βελτιώσεις στις αδειοδοτικές διαδικασίες για την πρόσβαση στο δίκτυο ή βελτιώσεις στους μηχανισμούς στήριξης [15]. Προς αυτή την κατεύθυνση εισήχθησαν πρόσφατα ενισχύσεις κεφαλαίου ή λειτουργικών εξόδων στους τελικούς χρηστές που θα επιλέξουν να επενδύσουν σε τέτοιες τεχνολογίες. Η πρόκληση που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι κυβερνήσεις είναι η εξής: να διευθετήσουν ορισμένα εμπόδια όπως η έλλειψη ευαισθητοποίησης από τους εγκαταστάτες και να κινητοποιήσουν όλους τους ενδιαφερόμενους στον κατακερματισμένο τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας για κτήρια [1]. Τον Ιούνιο 2011, η ΕΕ υπέβαλε πρόταση νέας Οδηγίας (COM (2011)370 final: «on energy efficiency and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC»), η διαβούλευση της οποίας ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2012. Το βασικό επιχείρημα για την αναγκαιότητα μίας νέας Οδηγίας ήταν ότι, ενώ τα στοιχεία δείχνουν ότι θα επιτευχθεί το 20% της μείωσης του διοξειδίου του άνθρακα και της παραγωγής ΗΕ από ΑΠΕ, δεν επρόκειτο να επιτευχθεί το 20% στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Με τη νέα Οδηγία τέθηκαν σαφή μέτρα ανά τομέα κατανάλωσης, μεθοδολογίες, αλλά και ενδεικτικοί εθνικοί στόχοι, οι οποίοι σύμφωνα με τη νέα Οδηγία θα είναι υποχρεωτικοί για τα Κράτη-Μέλη. Ειδικά στις κατηγορίες προμήθειας ενέργειας και βιομηχανίας, δίνεται έμφαση στη ΣΗΘΥΑ με στόχο την αύξηση της παραγόμενης συμπααραγωγικής ηλεκτρικής ενέργειας από το 11% που είναι σήμερα πανευρωπαϊκά στο 21% το 2020 καθώς και την ανάπτυξη νέων εγκαταστάσεων με τις καλύτερες διαθέσιμες τεχνολογίες. Η IEA προτείνει ότι η έρευνα και ανάπτυξη σε υβριδικά συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε τεχνολογίες με υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλές εκπομπές, ενώ σε πιο μακροχρόνιο ορίζοντα (πχ μετά το 2030) η έρευνα πρέπει να εστιάσει σε νέες αναπτυσσόμενες τεχνολογίες που είναι πιο αποδοτικές από αυτές που αναπτύσσονται σήμερα [1].

Πίνακας 2.4: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη (MWe)

Χώρα	Ισχύς	Χώρα	Ισχύς	Χώρα	Ισχύς
Αυστραλία	1864	Ελλάδα	240	Πορτογαλία	180
Αυστρία	3250	Ουγγαρία	2050	Ρουμανία	5250
Βέλγιο	1890	Ινδία	10012	Ρωσία	65100
Βραζιλία	1316	Ινδονησία	1203	Σιγκαπούρη	1602
Βουλγαρία	1190	Ιρλανδία	110	Σλοβακία	5410
Καναδάς	6765	Ιταλία	5890	Ισπανία	645
Κίνα	28153	Ιαπωνία	8723	Σουηδία	3490
Τσεχία	5200	Κορέα	4522	Ταϊβάν	7378
Δανία	5690	Λετονία	590	Τουρκία	790
Εστονία	1600	Λιθουανία	1040	Ην. Βασίλειο	5440
Φινλανδία	5830	Μεξικό	2838	Ην. Πολιτείες	84707
Γαλλία	6600	Ολλανδία	7160		
Γερμανία	20840	Πολωνία	8310		

Στον Πίνακα 2.2.1 παρουσιάζεται η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς από αυτοπαραγωγούς στην Ευρώπη το 2008 [16].

2.2.2 Ελλάδα

Νομοθετικό πλαίσιο

Το νομοθετικό πλαίσιο της Ελλάδας που σχετίζεται με την ενεργειακή αποδοτικότητα, τη διανεμημένη παραγωγή και ειδικότερα τη συμπαραγωγή ξεκίνησε το 1994 με το νόμο 2244/1994 «Ρύθμιση θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις». Ο Ν.2244/94 ουσιαστικά καθόρισε την απελευθέρωση, εν μέρει, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες παραγωγής ισχύος μέχρι 50 MWe, οι οποίες αξιοποιούν ΑΠΕ ή είναι μονάδες ΣΗΘ. Δινόταν επίσης η δυνατότητα ΣΗΘ με φυσικό αέριο. Για τους ανεξάρτητους παραγωγούς, ο Ν.2244/94 προέβλεπε τη δυνατότητα ΣΗΘ, με μονάδες συνδυασμένου κύκλου με καύσιμο το Φ.Α. και με ισχύ το πολύ ίση με τη θερμική και ψυκτική ισχύ των επιχειρήσεων που εξυπηρετούνται. Για τους αυτοπαραγωγούς, επιτρεπόταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με παραγωγή θερμότητας/ψύξης με ισχύ σταθμού το πολύ ίση με τη θερμική και ψυκτική ισχύ των εγκαταστάσεων του αυτοπαραγωγού, εφόσον πρόκειται για ΣΗΘ από συμβατικά καύσιμα, και αντίστοιχα χωρίς περιορισμό ισχύος, εφόσον πρόκειται για ενεργειακή αξιοποίηση υποπαραγώγων βιομηχανικού κυκλώματος ή από ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας. Στο νόμο επιδιώχθηκε η προώθηση της ΣΗΘ με την απόδοση κινήτρων και την προσπάθεια απλοστεύσης των διαδικασιών και ρυθμιζονταν θέματα σχετικά με τη διάθεση της ηλεκτρικής ενέργειας και τις

άδειες εγκατάστασης και λειτουργίας των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η τιμή αγοράς της Η.Ε. οριζόταν βάσει του αντίστοιχου τιμολογίου της ΔΕΗ και προβλεπόταν ίση με το 60% του σκέλους ενέργειας. Στην περίπτωση της ανεξάρτητης ηλεκτροπαραγωγής με μονάδες ΣΗΘ καύσης ΦΑ, η τιμή αγοράς καθοριζόταν βάσει του τιμολογίου της ΔΕΗ και περιείχε σκέλος ενέργειας (70% του αντίστοιχου τιμολογίου της ΔΕΗ) και σκέλος ισχύος (70% του αντίστοιχου τιμολογίου της ΔΕΗ).

Ο νόμος 2773/99 «Για την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας» ρύθμιζε και θέματα ΣΗΘ, όπως η δυνατότητα να δίνεται προτεραιότητα από την κατανομή για τη συμπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και καθορίζονταν τα ελάχιστα κριτήρια απόδοσης για μονάδες ΣΗΘ. Επίσης, ο νόμος εισήγαγε νέες ρυθμίσεις σχετικά με την τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ΑΠΕ ή ΣΗΘ.

Ο Ν.3175/2003 «Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανση και άλλες διατάξεις» δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού αλλά και για τη διανομή της θερμικής ενέργειας μέσα από δίκτυα θερμότητας, περιγράφοντας τη διαδικασία διανομής θερμικής ενέργειας σε τρίτους και καθορίζοντας την αδειοδοτική διαδικασία για τη λειτουργία δικτύων διανομής θερμότητας και ειδικότερα αυτών που σχετίζονται με εγκαταστάσεις ΣΗΘ. Με την άδεια καθορίζονται ο χρόνος ισχύος της, η περιοχή κατασκευής του δικτύου θερμότητας, η τεχνολογία και οι όροι της διανομής θερμότητας στους καταναλωτές. Αν η θερμική ενέργεια παράγεται από εγκαταστάσεις ΣΗΘ, η Άδεια Διανομής Θερμικής Ενέργειας χορηγείται μαζί με την Άδεια Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Ο Ν.3468/2006 «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και ΣΗΘ Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) και λοιπές διατάξεις» εισήγαγε νέο πλαίσιο για τη χορήγηση άδειας, παραγωγής, εγκατάστασης και λειτουργίας των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ Υψηλής Αποδοτικότητας (ΣΗΘΥΑ). Ο νόμος αναφέρεται ρητά στη ΣΗΘ Υψηλής Αποδοτικότητας, όπως αυτή ορίζεται από την οδηγία 2004/8/ΕΚ, απλοποιείται η αδειοδοτική διαδικασία για επενδύσεις ΣΗΘΥΑ και τίθενται αποκλειστικές προθεσμίες για την έκδοση των αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας για έργα ΣΗΘΥΑ. Θεσμοθετείται Κανονισμός Αδειών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ. Καθορίζεται η τιμολόγηση της Η.Ε. που παράγεται από ΣΗΘΥΑ και απορροφάται από το Σύστημα ή το Δίκτυο, με σκοπό την ανεξάρτηση από τα τιμολόγια της ΔΕΗ και τη διασφάλιση των επενδύσεων. Ο νόμος έθεσε νέες βάσεις για την αδειοδότηση έργων ΣΗΘΥΑ και, ιδιαίτερα στην έγκριση των περιβαλλοντικών μελετών, θέτει αυστηρότερα κριτήρια για την έγκριση των ΠΠΕ/ΜΠΕ και συντομότερο χρόνο για την έγκριση των περιβαλλοντικών όρων από τις αρμόδιες κρατικές υπηρεσίες.

Ο Ν. 3734/09 ενσωματώνει πλήρως την Κοινοτική Οδηγία 2004/8/ΕΚ και δημιούργησε το θεσμικό πλαίσιο για τη γρηγορότερη εξάπλωση της τεχνολογίας στο Εθνικό ενεργειακό σύστημα. Βασικές τομές του νόμου είναι η μέθοδος υπολογισμού της ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ, ο υπολογισμός αποδοτικότητας της ΣΗΘ. Επίσης σημαντικό σημείο είναι η κατηγοριοποίηση των συστημάτων ΣΗΘΥΑ, ως προς το όριο του 1 MWe (μικρή ΣΗΘ), εγκρίνοντας ή όχι, διάφορους τύπους μηχανών διαφόρων κατασκευαστών, για την περιβαλλοντική τους συμπεριφορά.

Ακολούθησε μια σειρά από υπουργικές αποφάσεις που επισήμαναν λεπτομέρειες περί ΣΗΘ, η υπουργική απόφαση «Καθορισμός εναρμονισμένων τιμών αναφοράς των βαθμών απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας» και «Καθορισμός λεπτομερειών της μεθόδου υπολογισμού της Η.Ε. από ΣΗΘ και της αποδοτικότητας ΣΗΘ» (ΦΕΚ Β' 1420/15.6.2009), όπου καθορίστηκαν οι εναρμονισμένες τιμές αναφοράς των βαθμών απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, οι απαιτούμενοι διορθωτικοί συντελεστές για τις τιμές αυτές και καθορίζεται αναλυτικά ο τρόπος υπολογισμού της ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ (με βάση την 2004/8/ΕΚ). Η διαδικασία έκδοσης αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ απλοποιήθηκε με σχετική υπουργική απόφαση του ΥΠΕΚΑ το 2010.

Ο Ν. 3851/2010 «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των ΑΠΕ για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις» αντικαθιστά τον τρόπο τιμολόγησης της συμπαραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, από σταθμούς ΣΗΘΥΑ έως 1 MW που κάνουν χρήση Φ.Α. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμολόγηση είναι η μέση μηνιαία τιμή Φ.Α. καθώς και η απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος ΣΗΘ. Η υπουργική απόφαση που ακολούθησε το σχέδιο διαβούλευσης της ΡΑΕ «Εφαρμογή του Συστήματος Εγγυήσεων Προέλευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ και μηχανισμού διασφάλισης του» (12/2010) καθόρισε, με αναλυτικό τρόπο, το σύστημα Εγγυήσεων Προέλευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ και το μηχανισμό διασφάλισής του.

Τέλος, σε τροπολογία του νόμου 4001/11 (ΦΕΚ Α' 179/22-8-2011) για τη «Λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις» δόθηκε προτεραιότητα κατά την κατανομή του φορτίου σε μονάδες ΣΗΘΥΑ ανεξαρτήτως εγκατεστημένης ισχύος και στην τιμολόγησή τους με εγγυημένη τιμή εξομοιώνοντάς τις στην ουσία στο ίδιο καθεστώς με τις ΑΠΕ [17].

Όσον αφορά στα οικονομικά εργαλεία υποστήριξης ενεργειακών επενδύσεων στον τομέα της συμπαραγωγής από εθνικά ή κοινοτικά κονδύλια, τα κυριότερα εργαλεία που χρησι-

μοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια είναι τα εξής: το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας (ΕΠΕ) του Β' ΚΠΣ, το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα» (ΕΠΑΝ) του Γ' ΚΠΣ, το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα» (ΕΠΑΕ ή ΕΠΑΝ ΙΙ) του Δ' ΚΠΣ, και οι Αναπτυξιακοί Νόμοι 2601/98, 3299/04 και 3522/06. Τα παραπάνω αφορούσαν σε επιδότηση στην επένδυση από 20%–40% ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης της επένδυσης και το μέγεθος της επιχείρησης ή, εναλλακτικά, επιδότηση στο κόστος απασχόλησης ή φορολογική απαλλαγή. Σήμερα, ο νέος αναπτυξιακός νόμος 3908/2011 συνεχίζει τις ενισχύσεις σε ενεργειακά έργα (εκτός των φωτοβολταϊκών) μέσω ενός συνδυασμού φορολογικών ελαφρύνσεων και επιδοτήσεων.

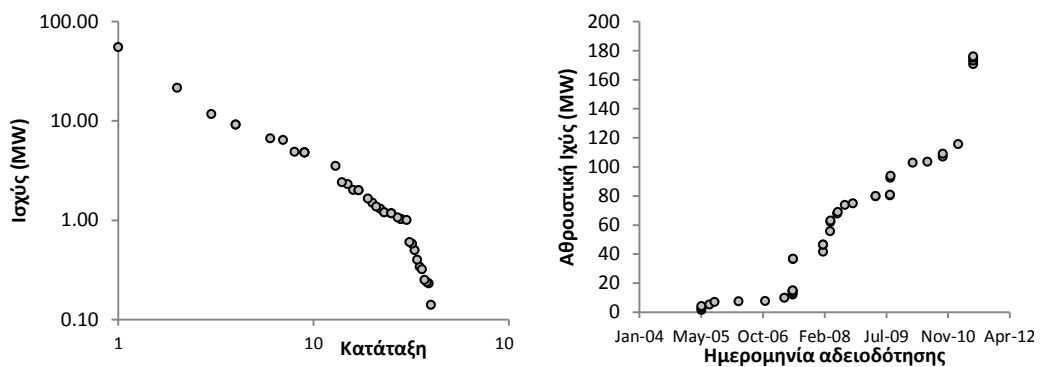
Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές διεύθυνσης

Η Ελλάδα έχει σχετικά μικρή ανάπτυξη της Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ), κυρίως λόγω της σχετικά μικρής ζήτησης για θερμική ενέργεια, άρα και περιορισμένου επενδυτικού ενδιαφέροντος, αλλά και της έλλειψης των σχετικών υποδομών. Το μεγάλο μέρος της εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ΣΗΘ βρίσκεται στα διυλιστήρια, σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στη βιομηχανία τροφίμων (ΕΛΠΕ, Motor Oil, EBZ). Παράλληλα, κάποιες ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες της ΔΕΗ έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε να καλύψουν τις θερμικές ανάγκες αστικών περιοχών με δίκτυα τηλεθέρμανσης (Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Αμύνταιο, Μεγαλόπολη και—μελλοντικά—Φλώρινα). Δύο από τους λιγνιτικούς σταθμούς της ΔΕΗ ανακυκλώνουν την άχρηστη θερμότητα που αποβάλλεται από αυτούς σε τοπικά θερμικά συστήματα διανομής που εξυπηρετούν τις γειτονικές κοινότητες. Οι σταθμοί αυτοί παράγουν περίπου 200 GWh θερμότητας και 2.300 GWh ηλεκτρικού ρεύματος ετησίως, φτάνοντας σε μία συνδυασμένη αποδοτικότητα περίπου 42%, σε σύγκριση με τα 30–33% των μονάδων λιγνίτη που λειτουργούσαν χωρίς άνκτηση θερμότητας. Η μεγαλύτερη μονάδα συμπαραγωγής στην Ελλάδα (παραγωγός) είναι της εταιρείας Πρωτεργία, θυγατρική του ομίλου Μυτηλιναίου με ισχύ 334 MW. Βρίσκεται δίπλα στις εγκαταστάσεις παραγωγής αλουμίνιας και αλουμινίου της εταιρείας «Αλουμίνιον Α.Ε.», καλύπτοντας τις ανάγκες του Αλουμινίου για συνεχή παροχή ατμού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ο Σταθμός εντάχθηκε στο ηλεκτρικό Σύστημα της χώρας, το Μάιο 2008.

Μετά τη λήψη μέτρων οικονομικής υποστήριξης της ΣΗΘ, έχουν αρχίσει να γίνονται βιώσιμες τέτοιες εγκαταστάσεις και σε μεγάλα κτήρια του τριτογενούς τομέα ως αυτοπαραγωγοί. Το πρώτο νοσοκομειακό συγκρότημα που εγκατέστησε μία τέτοια μονάδα ήταν το ΜΗΤΕΡΑ και το έχουν ακολουθήσει ήδη πολλά δημόσια και ιδιωτικά νοσοκομεία κάνοντας αίτηση για άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τις διαδικασίες έχουν ξεκινήσει επίσης

μεγάλα εκπαιδευτικά συγκροτήματα και μεγάλα ξενοδοχεία.

Στη ΡΑΕ υποβάλλονται συνεχώς αιτήσεις ΣΗΘΥΑ για χορήγηση άδειας παραγωγής ενέργειας, κυρίως από νοσοκομεία, ξενοδοχεία, βιομηχανίες και λοιπές εταιρείες του δευτερογενούς τομέα. Η κατανομή μεγέθους των συστημάτων συμπαραγωγής καθώς και η χρονική εξέλιξη της αιτούμενης ισχύος στην Ελλάδα φαίνεται στο Σχήμα 2.3 [18]. Παρατηρείται ότι η τεχνολογία διείσδυσε στην ελληνική αγορά το 2007 και το 2010, γεγονός που συμπίπτει με σχετικές νομοθεσίες και κίνητρα επενδύσεων.



Σχήμα 2.3: Άδειες παραγωγής για ΣΗΘ στην Ελλάδα

Μελέτες για την εκτίμηση του δυναμικού της συμπαραγωγής (“Assessment of the National Potential for Combined Heat and Power in Greece”, 2008 και «Εθνική έκθεση βάσει των Άρθρων 6, Παράγραφος 3 και 10, Παράγραφος 2 της Οδηγίας 2004/8/ΕΚ, σχετικά με την προώθηση της συμπαραγωγής ενέργειας βάσει της ζήτησης για χρήσιμη θερμότητα στην εσωτερική αγορά και για την τροποποίηση της Οδηγίας 92/42/ΕΚ», 2011), προβλέπουν σημαντική δυνατότητα διείσδυσης ΣΗΘ, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικοοικονομικούς παράγοντες (κόστη, απόδοση, συντελεστής διαθεσιμότητας) της κάθε εφαρμογής, αλλά και τη ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας ανά τομέα τελικής κατανάλωσης και χρήση. Συγκεκριμένα, για το έτος 2020 διαφαίνεται η δυνατότητα διείσδυσης σημαντικού αριθμού εγκαταστάσεων ΣΗΘΥΑ, αξιοποιώντας ένα σημαντικό μέρος του οικονομικού δυναμικού που έχει εντοπιστεί σε διάφορες χρήσεις και περιοχές. Εξ’ αυτών, περισσότερο από το 85% αφορούν στο βιομηχανικό τομέα, ενώ οι προβλεπόμενες εγκαταστάσεις στον οικιακό και τριτογενή τομέα αφορούν σχεδόν αποκλειστικά σε εγκαταστάσεις τηλεθέρμανσης. Οι προβλέψεις δυναμικού διείσδυσης, με βάση την προαναφερθείσα μελέτη, μπορούν να επεκταθούν και για την περίοδο έως το 2050, καθώς αφορούν εφαρμογές σε συγκεκριμένους κλάδους οικονομικής δραστηριότητας.

Το μερίδιο των τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας στην πρωτογενή ενέργεια για ψύξη

και θέρμανση αναμένεται να αυξηθεί σε 20% μέχρι το 2020 κυρίως με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αυξημένη χρήση θερμοσίφωνων στον οικιακό και τριτογενή τομέα, τη χρήση βιομάζας στον οικιακό τομέα και την αυξανόμενη χρήση αντλιών θερμότητας. Με τους νόμους 3851/10, 3734/09 δίνεται ένα ακόμα κίνητρο για εγκαταστάσεις συμπαραγωγής. Τα νέα ή ανακαινισμένα κτήρια από τον Ιανουάριο του 2011 υποχρεώνονται να καλύπτουν τουλάχιστον το 60% του ζεστού τους νερού από ηλιακούς θερμοσίφωνες. Από αυτή τη διάταξη όμως εξαιρούνται τα κτήρια τα οποία καλύπτουν τις ανάγκες τους για ζεστό νερό από τηλεθέρμανση ή από συστήματα αποκεντρωμένης παραγωγής, όπως συμπαραγωγή, ή από αποδοτικές αντλίες θερμότητας.

Σύμφωνα με τον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό του συμβουλίου εθνικής στρατηγικής (ΣΕΕΣ) η χάραξη στρατηγικής για τη διείσδυση της συμπαραγωγής στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα θα πρέπει να επικεντρωθεί στους εξής άξονες:

- Περαιτέρω ανάπτυξη των εφαρμογών τηλεθέρμανσης, ιδιαίτερα σε συνδυασμό είτε με υπάρχοντες σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής είτε με την ύπαρξη φυσικού αερίου.
- Περαιτέρω διείσδυση της ΣΗΘ και ΣΗΘΥΑ στη βιομηχανία σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των δικτύων φυσικού αερίου.
- Ανάπτυξη της τριπαραγωγής στον τριτογενή τομέα και ιδιαίτερα με διαχείριση του δυναμικού θέρμανσης-ψύξης με ΣΗΘΥΑ στον ξενοδοχειακό τομέα, σε μεγάλα νοσοκομεία και σε μεγάλα κτήρια γραφείων.

Παρόλ'αυτά, οι ανάγκες και συνθήκες της αγοράς είναι τελικά οι κυρίαρχες παράμετροι για την περαιτέρω προοπτική ανάπτυξης της ΣΗΘΥΑ στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, οι δεδομένες κλιματολογικές συνθήκες που ανάγονται σε περιορισμένες ανάγκες σε θερμικά φορτία, η εποχικότητα των καταναλώσεων σε εφαρμογές στον τριτογενή τομέα, καθώς και η μεταβλητότητα στην παραγωγική δραστηριότητα που παρατηρείται στις βιομηχανικές εφαρμογές λόγω του οικονομικού περιβάλλοντος, αποτελούν—και θα συνεχίσουν να αποτελούν—τους κύριους περιοριστικούς παράγοντες για την ουσιαστική ανάπτυξη των εφαρμογών ΣΗΘΥΑ στην Ελλάδα.

Παρά τη θέσπιση και υλοποίηση νομοθετικών μέτρων και διατάξεων για την προώθηση της συμπαραγωγής, η ύπαρξη ορισμένων τεχνικών, οικονομικών και διοικητικών εμποδίων καθιστά ακόμα δύσκολη τη μεγάλη και ταχεία διείσδυση της συμπαραγωγής στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή συστήματος και κρίσιμων παραμέτρων

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ένα σύστημα συμπαραγωγής δίνοντας έμφαση στην τεχνολογία του επιμέρους εξοπλισμού και το ρόλο του καθενός στη λειτουργία του συστήματος. Επίσης, προσδιορίζονται οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος.

3.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διατριβή μελετάει την εγκατάσταση ολοκληρωμένου συστήματος μονάδας συνδυασμένης παραγωγής σε κτήρια με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Γι' αυτόν το σκοπό το σύστημα που θα επιλεγθεί πρέπει να καλύπτει τα εξής κριτήρια: να εξοικονομείται ενέργεια, να υπάρχει αξιοπιστία στην παροχή όλων των ειδών ενέργειας (ηλεκτρισμός, ζεστό νερό χρήσης, ψυκτική ενέργεια κλπ) και να υπάρχουν περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Το σύστημα που θα εγκατασταθεί πρέπει να καλύπτει συγκεκριμένη χωρητικότητα και να έχει ευελιξία στην παροχή ενέργειας και στις ώρες λειτουργίας. Φυσικά, το σύστημα πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτικό. Πρέπει να τονιστεί ότι είναι απαραίτητο να υλοποιηθούν εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας στο περίβλημα του κτηρίου, πριν από τη μελέτη για την εγκατάσταση συστήματος ΣΗΘ. Επίσης, απαιτούνται γνώσεις του ισχύοντος νομοθετικού πλαισίου και των ρυθμιστικών διατάξεων που αφορούν στην εγκατάσταση και λειτουργία της μονάδας ΣΗΘ στο κτήριο. Είναι πιθανόν οι προαναφερόμενες διατάξεις να θέτουν όρια στο σχεδιασμό και στη λειτουργία της μονάδας ΣΗΘ (πχ επίπεδα θορύβου, όριο εκπομπών αερίων ρύπων, κλπ).

Στις παρακάτω ενότητες αναλύεται ο εξοπλισμός που επιλέχθηκε, η λειτουργία του συστήματος και οι κρίσιμες παράμετροι.

3.2 Εξοπλισμός

Τα δομικά στοιχεία του συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας, ψύξης (ΣΗΘΨ) που επιλέχθηκε για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτηρίων περιγράφονται παρακάτω:

- Ένας κινητήρας (prime mover), ο τύπος του οποίου είναι παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης που λειτουργεί με κύκλο Otto και καύσιμο φυσικό αέριο. Ο κινητήρας αυτός επιλέχθηκε σε σχέση με άλλες τεχνολογίες επειδή βρίσκεται στο κατάλληλο εύρος μεγεθών, για την ευελιξία της σε λειτουργία σε μερικά φορτία, τη σχετικά υψηλή ηλεκτρική απόδοση και την εύκολη εγκατάσταση. Η οικονομική ανάλυση που έκαναν οι Giaccone και Canova [19] κατέληξε ότι, για χρήστες με ηλεκτρικά φορτία γύρω στο 1MW που δεν χρειάζονται ατμό, η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι η καλύτερη λύση. Σε αντίθετη περίπτωση ένας αεριοστρόβιλος ίσως είναι πιο αποδοτικός.
- Μία γεννήτρια που μετατρέπει το μηχανικό έργο του κινητήρα σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας, το οποίο ανακτά την απορριπτόμενη θερμότητα. Η θερμότητα ανακτάται σε δύο επίπεδα: Μέσης ενθαλπίας από τα ρευστά που κυκλοφορούν στη μηχανή (χιτώνια, λάδια, intercooler) και υψηλής ενθαλπίας από τα καυσαέρια.
- Ένας ψύκτης απορρόφησης, ο οποίος παράγει ψύξη χρησιμοποιώντας τη θερμότητα από τον κινητήρα, αυξάνοντας τη συνέπεια ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Τα χαρακτηριστικά αυτών των τεχνολογιών και η αρχή λειτουργίας τους περιγράφονται στις παρακάτω ενότητες.

3.2.1 Κινητήρας — Μηχανή Εσωτερικής Καύσης

Οι παλινδρομικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις συμπαραγωγής αποτελούν μηχανές εσωτερικής καύσης των οποίων η λειτουργία έχει παρόμοιες αρχές με τους κινητήρες πετρελαίου και ντήζελ των αυτοκινήτων. Το καύσιμο και ο αέρας αναμειγνύονται σε μια συσκευή προανάμειξης (carburettor) και τροφοδοτούνται στο εσωτερικό μιας μηχανής εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), όπου ύστερα από σπινθήρα, προκαλείται η καύση του μίγματος. Το αξονικό έργο που παράγεται από τη ΜΕΚ καταναλώνεται στη γεννήτρια και παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα, συνήθως σε φάση με το ρεύμα του δικτύου της εταιρείας διανομής. Αν και από εννοιολογική άποψη το σύστημα διαφέρει ελάχιστα από το σύστημα

των αεριοστροβίλων, υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Οι παλινδρομικοί κινητήρες παρέχουν υψηλότερη αποδοτικότητα σε όρους ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά είναι πιο δύσκολο να χρησιμοποιηθεί η θερμική ενέργεια που παράγουν εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι χαμηλότερης θερμοκρασίας και διαφεύγει από τα καυσαέρια και το κύκλωμα ψύξης της μηχανής. Η ωφέλιμη αναλογία θερμότητας προς την ισχύ υπό κανονικές συνθήκες κυμαίνεται από 0,5 έως 2,1. Αντίθετα, επειδή τα καυσαέρια έχουν μεγάλη ποσότητα περίσσειας αέρα, μπορούν να ανατροφοδοτηθούν ανεβάζοντας την αναλογία σε 5 προς 1. Η παλμική φύση της εξόδου των καυσαερίων από παλινδρομικούς κινητήρες δυσχεραίνει την προωθητική ανατροφοδότησή τους, ώστε να την καθιστά σχετικά σπάνια, αν και υπάρχουν εγκαταστάσεις όπου έχουν επιτυχώς ξεπεραστεί τα προβλήματα. Ο μέσος χρόνος ζωής τους είναι περίπου 10–15 έτη.

Στον κύκλο του Όττο (ντήζελ) οι θερμικές απώλειες παράγονται (και ανακτώνται) σε δύο θερμοκρασιακά επίπεδα: από το χιτώνιο της μηχανής και τα συστήματα ψύξης λαδιού σε χαμηλές θερμοκρασίες (90–125°C), περίπτωση κατά την οποία οι απώλειες δεν είναι πάντα αξιοποιήσιμες και από τη ροή μέσης θερμοκρασίας των καυσαερίων (200–400°C) όπου συνήθως αποτελεί τη μισή θερμότητα που απορρίπτεται από τον κινητήρα. Στην τελευταία μπορεί να ενσωματωθεί διάταξη ανάκτησης θερμότητας ως σύστημα βάσης. Σε πολλές εφαρμογές η θερμότητα που ανακτάται από τον κύκλο ψύξης και τα καυσαέρια συνδυάζονται ώστε να παράγουν κοινό θερμικό αποτέλεσμα, συνήθως την παραγωγή κρύου νερού στους περίπου 100 °C.

Υπάρχουν δύο τύποι κινητήρων, ανάλογα με τη μέθοδο ανάφλεξης: Οι κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση (ντήζελ) για συμπαραγωγή μεγάλης κλίμακας αποτελούν κυρίως μηχανές άμεσης ανάφλεξης τεσσάρων χρόνων με προσαρμοσμένους υπερσυμπιεστές κι εσωτερικούς ψύκτες. Οι κινητήρες ντήζελ μπορούν να λειτουργήσουν με αερίελλαιο (gasoil), βαρύ μαζούτ και φυσικό αέριο. Στην πραγματικότητα το φυσικό αέριο εισέρχεται υπό τη μορφή δύο καυσίμων, καθώς μαζί με το αέριο απαιτείται να εισαχθεί μικρή ποσότητα αεριολαίου (περίπου 5% από την ολικά εισαγόμενη θερμότητα) ώστε να διασφαλιστεί η ανάφλεξη (αφού ο κινητήρας λειτουργεί επίσης με πετρέλαιο, μονάχα αυτό είναι κατάλληλο για μη συνεχή παροχή αερίου). Οι αξονικές αποδόσεις είναι της τάξεως του 35–45% κι η τελική ισχύς φτάνει μέχρι τα 15 MWe. Τα ψυκτικά συστήματα είναι πιο περίπλοκα από τις μηχανές ανάφλεξης χωρίς σπινθήρα κι οι θερμοκρασίες είναι συχνά χαμηλότερες, συνήθως μέχρι 85°C, περιορίζοντας τη δυνατότητα για ανάκτηση θερμότητας. Τα επίπεδα περίσσειας αέρα στα καυσαέρια είναι μεγάλα, οπότε η συμπληρωματική τροφοδότηση με καύσιμο αποκτά πρακτική σημασία. Οι μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση λειτουργούν σε ταχύτητες από 500

μέχρι 1500 στροφές/λεπτό. Γενικώς, κινητήρες μέχρι περίπου 500 kW_e (και μερικές φορές μέχρι 2 MW_e) είναι παράγωγα των αρχικών κινητήρων diesel αυτοκινήτων, τροφοδοτούνται με ντίζελ και λειτουργούν στο μέγιστο των ορίων ταχύτητας. Οι κινητήρες από 500 kW_e μέχρι 20MW_e αποτελούν εξέλιξη των κινητήρων ντίζελ της ναυτιλίας κι αποτελούν μηχανές που λειτουργούν είτε με δυαδικό μείγμα καυσίμου είτε με βαρύ καύσιμο πετρέλαιο σε μέτρια έως χαμηλή ταχύτητα. Στις σύγχρονες μηχανές πραγματοποιείται υστέρηση του χρόνου ανάφλεξης και αυξημένες αναλογίες συμπίεσης προς περιορισμό του σχηματισμού NO_x, ενώ διατηρούνται τα υψηλά επίπεδα εξερχόμενης ισχύος κι απόδοσης. Κάτι τέτοιο απαιτεί ένα πιο πολύπλοκο σύστημα ανάφλεξης καυσίμου και διαχείρισης της μηχανής. Αν και οι μηχανές αερίου μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για υψηλή συμμόρφωση με τις τεχνικές οδηγίες για την αέρια ρύπανση, μέσω των κύριων μεθοδολογιών μείωσης (πχ περιορισμός του σχηματισμού NO_x στο εσωτερικό της μηχανής), οι μηχανές ανάφλεξης υψηλότερου βαθμού συμπίεσης συχνά λειτουργούν με μαζούτ. Αυτό απαιτεί την εφαρμογή μεθοδολογιών απονιτροποίησης στα καυσαέρια ώστε να μειωθούν οι εκπομπές σε αποδεκτά επίπεδα. Συνήθως αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης (SCR), με αμμωνία ή ουρία ως καταλύτη. Η κλίμακα αυτών των μονάδων μπορεί να κάνει το κόστος αυτής της εκ των υστέρων επεξεργασίας αποδεκτό και εντός των ορίων του συνολικού κόστους κεφαλαίου και λειτουργίας της μονάδας.

Οι μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα αποτελούν παράγωγα των αντίστοιχων μηχανών ντίζελ κι έχουν τις ανάλογες παραμέτρους λειτουργίας, όπως θερμοκρασία νερού ψύξης στους 90°C. Και σε αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα καυσαέρια για ανάκτηση θερμότητας κι επομένως οι μονάδες μπορούν να λειτουργήσουν με ζεστό νερό 160°C και αποδιδόμενο ατμό στα 20 bar. Παραδοσιακά η αξονική απόδοση είναι χαμηλότερη από αυτή των μηχανών με συμπίεση, περίπου στο 27–35%, ενώ η απόδοση ισχύος περιορίζεται γύρω στα 2 MW_e. Οι νέοι κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα άνω των 3 MW_e χρησιμοποιούν έναν προθάλαμο καύσης όπου το μίγμα βρίσκεται σε στοιχειομετρική αναλογία (βλ παρακάτω). Οι μικροί κινητήρες δεν διαθέτουν προθάλαμο κι ονομάζονται μηχανές ανοικτού θαλάμου ή συμβατικές. Η απόδοση των μηχανών με σπινθήρα είναι λίγο χαμηλότερες, συνήθως στο 83% των μηχανών ντίζελ, εξαιτίας της πιθανότητας χτυπήματος του κινητήρα. Οι μηχανές αυτές κρίνονται κατάλληλες για μικρότερες κι απλούστερες εφαρμογές συμπαραγωγής, όπου συχνά η ψύξη και η ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων αλληλοεπικαλύπτονται μέσω ενός λέβητα απορριπτόμενης θερμότητας που παρέχει ζεστό νερό μέτριας ή χαμηλής θερμοκρασίας στο χώρο.

Οι μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα λειτουργούν με καθαρά αέρια καύσιμα, με το φυ-

σικό αέριο να αποτελεί τη συνήθη επιλογή. Το βιοαέριο και άλλα παρόμοια ανακτώμενα αέρια μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, αλλά με βάση τη χαμηλή τους θερμογόνο αξία, η τελική απόδοση είναι χαμηλότερη για μηχανή δεδομένου μεγέθους. Οι μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα προσδίδουν λιγότερη θερμότητα στα καυσαέρια (κι αντίστοιχα περισσότερη στο σύστημα ψύξης) από τις μηχανές ντήζελ. Οι μεγάλοι κινητήρες με φτωχό μείγμα περιέχουν τυπικά 12% οξυγόνο στα καυσαέρια, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συμπληρωματική τροφοδότηση. Αυτό συνήθως απαιτεί καθαρό αέρα κι έχει εφαρμοστεί σε ορισμένες περιπτώσεις κατά τη διάρκεια των ωρών που δεν λειτουργεί ο κινητήρας. Οι πιο συνήθεις εφαρμογές για την παραγωγή θερμικής ενέργειας από παλινδρομικές μηχανές είναι:

- Παραγωγή ατμού έως και 15 bar με αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων και χωριστή παραγωγή ζεστού νερού 85–90°C από το σύστημα ψύξης της μηχανής.
- Παραγωγή θερμού νερού στους 100°C, με συμπλήρωση του συστήματος ψύξης του νερού με τη θερμότητα των καυσαερίων.
- Άμεση ανάκτηση των αερίων. Οι καπνοί των καυσαερίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε ορισμένες διεργασίες όπως η ξήρανση, η παραγωγή CO₂ κλπ.
- Παραγωγή θερμού αέρα. Όλη η εναπομείνασα ενέργεια του κινητήρα μπορεί να αξιοποιηθεί μέσω της εγκατάστασης κατάλληλων εναλλακτών θερμότητας, για την παραγωγή θερμού αέρα.

Οι παλινδρομικοί κινητήρες παράγουν μη εξισορροπημένες δυνάμεις κι απαιτούν μέσα υποστήριξης και ειδικά σχεδιαζόμενες δομές για την απορρόφηση των δημιουργηθέντων κραδασμών. Για παράδειγμα, οι απαιτήσεις για τα θεμέλια μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με χρήση πνευματικών συστημάτων υποστήριξης που μεταδίδουν αποδοτικά μονάχα το νεκρό φορτίο. Το πρόβλημα του θορύβου είναι οριακά λιγότερο έντονο από όσο στους αεριοστροβίλους, αν και οι χαμηλές συχνότητες μπορούν να προκαλέσουν μία δυσανάλογα μεγάλη αίσθηση ενόχλησης στο ανθρώπινο αυτί. Οι παλινδρομικοί κινητήρες από τη φύση τους διαθέτουν περισσότερα κινητά μέρη, ορισμένα από τα οποία φθείρονται πιο γρήγορα από αυτά των καθαρά περιστροφικών μηχανών, ενώ υπάρχει απαίτηση για συντήρηση τόσο κατά τη λειτουργία όσο και κατά τη διακοπή της λειτουργίας. Η συντήρηση κατά τη διακοπή της λειτουργίας παρέχεται συνήθως από τον κατασκευαστή σε πολύ συχνότερα διαστήματα, παρόλα αυτά η συνήθης διαθεσιμότητα είναι 90–96%. Όταν οι κινητήρες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες απαιτούν πολύ λιγότερη συντήρηση. Παρόλα αυτά υπάρχει αντίτιμο για αυτό, καθώς το συνολικό μέγεθος και βάρος του κινητήρα είναι μεγαλύτερο για δεδομένη ονομαστική ισχύ. Αυτό έχει ακόμα μεγαλύτερη επίδραση σε εξοπλισμό μεγαλύτερου μεγέθους. Για παράδειγμα μια MEK 51 MW (MAN K 98) ζυγίζει 1500 τόνους ενώ

έναν αντίστοιχο αεριοστρόβιλο της (ABB GT8C) ζυγίζει μόλις 100 τόνους. Η σύγκριση του κόστους συντήρησης για αεριοστρόβιλους και παλινδρομικές μηχανές αποτελεί αντικείμενο συζήτησης. Είναι απίθανο να υπάρξει συναίνεση σχετικά με αυτό, εκτός κι εάν αποκτηθεί σημαντικά μεγαλύτερη εμπειρία στην εφαρμογή μεθοδολογιών συμπαραγωγής η οποία να επιτρέπει μία πραγματικά πιο ρεαλιστική αποτίμηση του λειτουργικού κόστους κατά το χρόνο ζωής του κινητήρα. Οι κινητήρες αερίου λειτουργούν σε δύο διαφορετικές συνθήκες αναλογίας αερίου/καυσίμου, οι οποίες έχουν επίπτωση στην αγορά λόγω της περιβαλλοντικής τους απόδοσης: στοιχειομετρικοί κινητήρες έναντι των κινητήρων φτωχού μείγματος. Ενόψει της απουσίας νομοθεσίας σχετικά με τις εκπομπές, ο σχεδιασμός των παλινδρομικών μηχανών έχει προσανατολιστεί στη μεγιστοποίηση της ισχύος και της απόδοσης. Αυτό το καθεστώς λειτουργίας επιτυγχάνεται με ελάχιστα μεγαλύτερη από τη στοιχειομετρική αναλογία αερίου/καυσίμου παράγοντας σχετικά υψηλές εκπομπές NOx. Οι εκπομπές NOx μπορούν να μειωθούν σημαντικά με λειτουργία περίσσεια αέρα καύσης (φτωχό μείγμα). Παρόλα αυτά, αυτό έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην απόδοση ισχύος του κινητήρα και, τελικά, σε υψηλότερα επίπεδα περίσσειας αέρα καύσης αυξάνεται το CO και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, η αστάθεια της καύσης και οι διαλείψεις στην ανάφλεξη. Η απόδοση της ισχύος συνήθως αντισταθμίζεται με υπερπλήρωση. Οι στοιχειομετρικοί κινητήρες τείνουν να είναι μικρότεροι (συνήθως < 300 kW_e) από τους αντίστοιχους φτωχού μείγματος και βασίζονται στα συνήθη τμήματα μηχανών των οχημάτων με προσαρμοσμένες κυλινδρικές κεφαλές και συστήματα ανάφλεξης με σπινθήρα. Αντίθετα, οι σύγχρονοι κινητήρες φτωχού μείγματος έχουν υποβληθεί εκτενώς σε επανασχεδιασμό της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης, περιλαμβάνουν περίπλοκους ηλεκτρονικούς χειρισμούς και τοποθετούνται μαζί με στροβιλοσυμπιεστές ώστε να αυξηθεί η ωφέλιμη ισχύς κι η απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνοψίζοντας τα πλεονεκτήματα των κινητήρων αυτού του τύπου είναι τα εξής:

- Υψηλή ωφέλιμη ισχύς, η οποία επιτυγχάνεται σε μεγάλο εύρος φορτίου.
- Σχετικά μικρό κόστος επένδυσης ανά kW_e αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μεγάλο εύρος μεγέθους μονάδων από τα 10 kW_e κι άνω.
- Ευελιξία λειτουργίας με μερική φόρτιση από 30% έως 100% σε μεγάλη απόδοση.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές νησιδοποίησης καθώς έχουν καλή συμπεριφορά στην ακολούθηση των φορτίων.
- Μπορεί να επισκευαστεί επιτόπου με συνήθεις χειριστές.
- Χαμηλό κόστος επένδυσης σε μικρά μεγέθη.
- Μπορεί να λειτουργήσει με αέριο χαμηλής πίεσης (χαμηλότερης του 1 bar).

Ενώ τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Πρέπει να ψυχθεί ακόμα και στην περίπτωση που η ανακτώμενη θερμότητα δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.
- Χαμηλή αναλογία ισχύος/βάρους, γεγονός που απαιτεί τη χρήση δυνατών θεμελίων.
- Υψηλά επίπεδα θορύβου χαμηλής συχνότητας.
- Υψηλό κόστος συντήρησης.

3.2.2 Ψύκτης απορρόφησης

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος ψύξης, με συμπίεση ατμών, ανήκει στην κατηγορία της ψύξης δύο θερμοκρασιών, δηλαδή του εξατμιστή και του συμπυκνωτή. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις ψύξης τριών θερμοκρασιών. Στην περίπτωση αυτή ανήκει η ψύξη με απορρόφηση (absorption). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ένα διμερές εργαζόμενο μείγμα, το καθαυτό ψυκτικό μέσο και το μέσο απορρόφησης, ενώ χρησιμοποιούν τις διεργασίες της συμπύκνωσης-εξάτμισης για την παραγωγή ψύξης.

Οι ψύκτες απορρόφησης παρέχουν ψύξη σε κτήρια με χρήση θερμότητας. Αυτή η φαινομενικά παράδοξη αλλά υψηλά αποδοτική τεχνολογία είναι οικονομικά αποδοτική για μεγάλες εγκαταστάσεις με μεγάλα φορτία θερμότητας. Οι ψύκτες απορρόφησης, ψύχουν τα κτήρια χωρίς τη χρήση ουσιών που καταστρέφουν τη στοιβάδα του όζοντος (χλωροφθοράνθρακες - CFCs). Σε αντίθεση με τους συμβατικούς ηλεκτρικούς ψύκτες, οι οποίοι χρησιμοποιούν μηχανική ενέργεια σε μία διαδικασία συμπίεσης ατμού για την παροχή ψύξης, οι ψύκτες απορρόφησης χρησιμοποιούν κυρίως θερμική ενέργεια καθώς και σε περιορισμένο βαθμό μηχανική ενέργεια για την άντληση.

Στην απλή του μορφή, ένας ψύκτης απορρόφησης αποτελείται από έναν εξατμιστή, έναν συμπυκνωτή, έναν απορροφητή, μια γεννήτρια και μια αντλία διαλύματος. Στον κύκλο συμπίεσης η ψύξη παράγεται στον εξατμιστή, όπου το ψυκτικό μέσο εξατμίζεται, και μεταφέρεται θερμότητα στον συμπυκνωτή, όπου και το μέσο συμπυκνώνεται. Η απαιτούμενη ενέργεια για τη μεταφορά θερμότητας από χαμηλότερη προς υψηλότερη θερμοκρασία παρέχεται από το συμπιεστή. Στον κύκλο ψύξης, η συμπίεση του ατμοποιημένου ψυκτικού μέσου πραγματοποιείται στον απορροφητή, στην αντλία και τη γεννήτρια σε συνδυασμό, αντί για μηχανική συμπίεση. Ο ατμός που παράγεται στον εξατμιστή απορροφάται από το υγρό μέσο απορρόφησης στον απορροφητή, το οποίο στη συνέχεια αντλείται στη γεννήτρια, από όπου το ψυκτικό μέσο απελευθερώνεται ως ατμός και εν συνεχεία συμπυκνώνεται. Το αναγεννημένο ισχυρό διάλυμα του μέσου απορρόφησης οδηγείται πάλι στον απορροφητή για να ανακτήσει και πάλι το ψυκτικό μέσο. Θερμότητα παρέχεται στη γεννήτρια σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία και απορρίπτεται από τον απορροφητή σε χαμηλή θερμοκρασία [7].

Πίνακας 3.1: Βασικά Χαρακτηριστικά διαφορετικών ψυκτών απορρόφησης

	NH ₃	LiBr	
		Μονή βαθμίδα	Διπλή βαθμίδα
Χωρητικότητα (kWc)	20 - 2500	300 - 5000	300 - 5000
Συντελεστής συμπεριφοράς (COP)	0.6 - 0.7	0.5 - 0.7	0.9 - 1.2
Εύρος θερμοκρασίας παροχής (°C)	120 - 130	70 - 130	150 - 170
Εύρος προσδιδόμενης θερμοκρασίας	-60 - 0	2 - 10	2 - 10

Σε έναν κύκλο απορρόφησης, ψυκτικό μέσο και απορροφητικό μέσο συγκροτούν το «ζεύγος εργασίας». Στην πράξη συνήθως χρησιμοποιείται το μείγμα (LiBr/H₂O) σε κλιματιστικές εγκαταστάσεις και το μείγμα (NH₃/H₂O) σε βιομηχανική ψύξη. Και αυτό διότι στην περίπτωση του μείγματος (LiBr/H₂O), το ψυκτικό μέσο είναι νερό το οποίο στερεοποιείται στους 0°C και επομένως οι εγκαταστάσεις αυτές δεν εργάζονται ποτέ σε θερμοκρασίες κάτω των 4°C, ενώ, στην περίπτωση του μείγματος (NH₃/H₂O), το ψυκτικό μέσο είναι η αμμωνία και οι εγκαταστάσεις αυτές επιτρέπουν την παραγωγή ψυκτικής ισχύος μέχρι -60°C με μονοβάθμια εγκατάσταση, πράγμα αδύνατο να επιτευχθεί με μονοβάθμια ψυκτική εγκατάσταση συμπίεσης ατμών, λόγω του απαιτούμενου μεγάλου λόγου συμπίεσης. Λόγω του θερμοκρασιακού περιορισμού των 2°C στις μονάδες απορρόφησης με (LiBr/H₂O), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι εγκαταστάσεις του είδους αυτού χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στον κλιματισμό. Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,7 και 1,2 ανάλογα με την ψυκτική ισχύ της εγκατάστασης και την ποιότητα του εκάστοτε φορτίου [20].

Τα συστήματα ψυκτών απορρόφησης κατηγοριοποιούνται με βάση τα στάδια (μονά, διπλά ή τριπλά), τα οποία υποδεικνύουν τον αριθμό των γεννητριών σε ένα δεδομένο σύστημα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σταδίων τόσο μεγαλύτερη θα είναι κι η προκύπτουσα απόδοση. Οι ψύκτες απορρόφησης δύο σταδίων συνήθως έχουν μεγαλύτερο αρχικό κόστος, αλλά σημαντικά χαμηλότερο κόστος ενέργειας από τους μονούς, με αποτέλεσμα χαμηλότερη καθαρή παρούσα αξία. Τα τριπλά συστήματα βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης. Η πολυπλοκότητα των ψυκτών διπλού σταδίου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τους σε αντίθεση με αυτούς του μονού σταδίου. Όλες οι εμπορικά διαθέσιμες μηχανές συστημάτων κύκλου απορρόφησης απορρίπτουν θερμότητα σε ένα κύκλωμα πύργου ψύξης. Οι μονάδες διπλού σταδίου γενικά προτιμώνται περισσότερο από αυτές του μονού σταδίου, λόγω της αυξημένης ενεργειακής αποδοτικότητας και της μειωμένης κατανάλωσης νερού. Το κόστος μιας μονάδας ανά kWψ της ψυκτικής ικανότητας εξαρτάται από το μέγεθός της, αλλά γίνεται σχεδόν σταθερό πάνω από 2000 kWψ. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι ότι το σύστημα διπλού σταδίου είναι τουλάχιστον 20% ακριβότερο (μπορεί να φθάσει και στο 30-

40% ανάλογα με τη χρήση του συστήματος) από το αντίστοιχο σύστημα μονού σταδίου με την ίδια ικανότητα. Το υψηλότερο κόστος οφείλεται στην επιπλέον γεννήτρια και το συμπυκνωτή κατά το σχεδιασμό. Δεύτερος εμπειρικός κανόνας είναι ότι μια μονάδα τροφοδοτούμενη με ζεστό νερό είναι περίπου 25% πιο ακριβή σε σχέση με μία μονάδα ατμού με την ίδια ικανότητα. Η αιτία είναι ότι το μέγεθος των αγωγών που απαιτούνται για μια δεδομένη παροχή θερμικής ενέργειας στο μηχάνημα απορρόφησης είναι μεγαλύτερο με ζεστό νερό συγκριτικά με αυτό του ατμού [17]. Ανάλογα με τον τύπο τους, η θερμότητα αυτή παράγεται είτε με άμεση καύση, με χρήση καυστήρα, είτε με έμμεση καύση, με χρήση ατμού, ζεστού νερού ή από περίσσεια / ανάκτηση θερμότητας. Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα των ψυκτών απορρόφησης έναντι των συμβατικών κλιματιστικών μηχανημάτων, βασισμένα σε κύκλο συμπίεσης ατμών, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2:

Πίνακας 3.2: Σύγκριση ψυκτών απορρόφησης και συμβατικών ψυκτών με συμπίεση ατμών

	Συμπίεση ατμών	Απορρόφηση
Πηγή ενέργειας	Ηλεκτρισμός	Θερμότητα
Συμπεριφορά σε μερική φόρτιση	Μέτρια	Πολύ καλή
Κινούμενα μηχανικά μέρη	Πολλά	Ελάχιστα
Κόστος συντήρησης	Υψηλό	Χαμηλό
Κόστος επένδυσης	Χαμηλό	Υψηλό
Συντελεστής συμπεριφοράς (COP)	Υψηλός	Χαμηλός
Κατανάλωση νερού στον πύργο ψύξης	Μέτρια	Υψηλή
Βάρος μονάδας	Μέτριο	Μεγάλο
Θόρυβος/κραδαμοί	Μέτριοι	Χαμηλοί
Αέρια θερμοκηπίου στο ψυκτικό μέσο	Ναι	Όχι

Ψύκτης απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου μίας βαθμίδας

Τα περισσότερα συστήματα απορρόφησης που βασίζονται στο “νερό-διάλυμα βρωμιούχου λιθίου” έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές ψύξης αέρα. Τα συστήματα αυτά εμφανίστηκαν περί το 1900, πολύ πριν από αυτά του κύκλου συμπίεσης. Για ιστορικούς λόγους, η μονάδα μέτρησης δίνεται σε RT (ψυκτικοί τόνοι - Refrigeration Tons) από τους κατασκευαστές και 1 RT αντιστοιχεί σε περίπου 3,52 kWψ ψύξης. Για το σχεδιαζόμενο σύστημα τριπαραγωγής, ο κατάλληλος τύπος του ψύκτη απορρόφησης χρησιμοποιεί “νερό-διάλυμα βρωμιούχου λιθίου” μόνης βαθμίδας. Αυτό γιατί χρησιμοποιείται για κλιματισμό, δηλαδή δεν υπάρχει απαίτηση για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, και αξιοποιεί απορριπτόμενη θερμότητα χαμηλής ποιότητας από τον κινητήρα.

Ένας ψύκτης απορρόφησης LiBr/H₂O μίας βαθμίδας λειτουργεί ως εξής: Η θερμότητα μεταφέρεται από την πηγή σε μία δεξαμενή θερμότητας μέσω ενός απορροφητικού ρε-

στού κι ενός ψυκτικού. Η ολοκλήρωση της ψύξης επιτυγχάνεται μέσω της απορρόφησης και της διαδοχικής απελευθέρωσης υδρατμών εντός κι εκτός ενός διαλύματος βρωμιούχου λιθίου. Η διαδικασία ξεκινάει με τη θέρμανση μίας γεννήτριας κι οι υδρατμοί οδηγούνται προς ένα συμπυκνωτήρα. Οι ψυχόμενοι υδρατμοί στη συνέχεια διέρχονται από μία βαλβίδα εκτόνωσης όπου μειώνεται η πίεση. Ο χαμηλός σε πίεση ατμός εισάγεται διαδοχικά στον εξατμιστήρα, όπου προστίθεται ατμοσφαιρική θερμότητα από ένα φορτίο, ώστε τελικά να πραγματοποιείται αληθινή ψύξη. Ο θερμαινόμενος ατμός χαμηλής πίεσης επιστρέφει στον απορροφητήρα, όπου αναμειγνύεται εκ νέου με το διάλυμα βρωμιούχου λιθίου προς σχηματισμό υγρού χαμηλής πίεσης. Το διάλυμα αυτό στη συνέχεια αντλείται σε υψηλότερη πίεση και μέσω της γεννήτριας η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

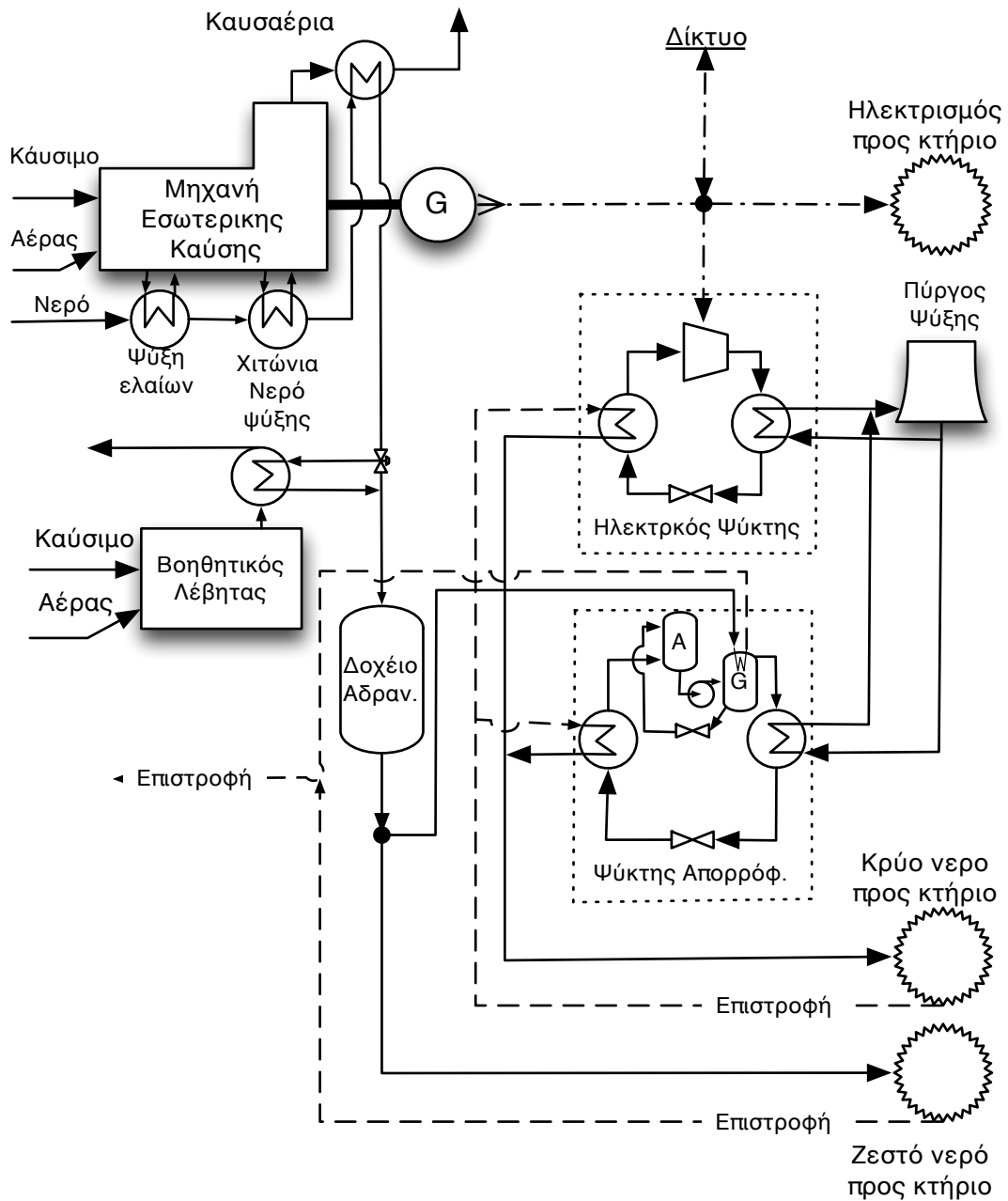
3.3 Περιγραφή συστήματος

Ο εξοπλισμός της μονάδας τριπαραγωγής που περιγράφεται παραπάνω συνήθως συνοδεύεται από εξοπλισμό παραγωγής ενέργειας που, ενώ δεν είναι απαραίτητος και αναπόσπαστο τμήμα του συστήματος ΣΗΘΨ, συνήθως υπάρχει ήδη εγκατάσταση για την κάλυψη των αναγκών των ενεργειακών φορτίων και μπορεί να λειτουργήσει επικουρικά. Αυτός απαρτίζεται από τις εξής μονάδες:

- Ένας συμβατικός εφεδρικός λέβητας που χρησιμοποιείται όταν η θερμότητα από τον κινητήρα δεν είναι αρκετή για να καλύψει τη ζήτηση θερμότητας.
- Ένας συμβατικός ηλεκτρικός ψύκτης που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για να παράγει ψύξη. Αυτός χρησιμοποιείται συνήθως όταν δεν υπάρχει περίσσεια θερμότητας και όταν η λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης είναι μη οικονομική.
- Ένα δοχείο αδρανείας για την αποθήκευση του ζεστού νερού.

Ένα τυπικό διάγραμμα ροής ενός συστήματος τριπαραγωγής που επιλέχθηκε για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών που περιέχει τον παραπάνω εξοπλισμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 και περιγράφεται παρακάτω:

Η ΜΕΚ τροφοδοτείται με καύσιμο το φυσικό αέριο και, αντιδρώντας με τον αέρα, η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε μηχανική αξονική ενέργεια που κινεί μια γεννήτρια για να παράγει ηλεκτρισμό. Η περίσσεια θερμότητας ανακτάται σειριακά σε δύο βαθμίδες καθώς για τις ανάγκες των κτηρίων δεν υπάρχει κάποια απαιτητική διεργασία που να χρειάζεται την αξιοποίηση της θερμότητας υψηλής ποιότητας απευθείας από τα καυσαέρια. Η κάλυψη όλων των φορτίων από τον κινητήρα δεν είναι εφικτή καθώς ο λόγος Η/Θ



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής ενός τυπικού συστήματος τριπαραγωγής

που παράγει είναι σταθερός ενώ ο λόγος των ενεργειακών απαιτήσεων όχι. Όταν η ανακτώμενη θερμική ενέργεια του κινητήρα δεν είναι αρκετή για να καλύψει τη ζήτηση, τότε ενεργοποιείται ο βοηθητικός λέβητας. Με την εγκατάσταση του συστήματος τριπαραγωγής η ψυκτική ενέργεια μπορεί να παραχθεί με δύο τρόπους. Είτε χρησιμοποιώντας την περίσσεια θερμότητας μέσω ενός ψύκτη απορρόφησης, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ή χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρισμό μέσω μιας συμβατικής διάταξης συμπίεσης ατμών¹. Όταν οι ανάγκες για ψύξη δεν καλύπτονται από τον ψύκτη απορρόφησης (που λειτουργεί από την περίσσεια θερμότητας), καλύπτονται από το συμβατικό ηλεκτρικό ψύκτη. Οι ψύκτες απορρόφησης μειώνουν τις αιχμές ηλεκτρικής ισχύος, αφού μειώνουν το χρόνο λειτουργίας των ηλεκτρικών ψυκτών και αυξάνουν τη χρήση των θερμικών φορτίων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Πρέπει να σημειωθεί ότι, όταν δεν υπάρχει περίσσεια θερμότητας, ίσως να μην είναι αποδοτική η λειτουργία του ψύκτη με επιπλέον καύσιμο, λόγω του πολύ μικρού συντελεστή συμπεριφοράς σε σχέση με τους συμβατικούς ψύκτες. Για αυτό το λόγο, όπως θα αποδειχτεί και σε επόμενες ενότητες, αυτός λειτουργεί μόνο όταν υπάρχει περίσσεια θερμότητας, δηλαδή όταν η ζήτηση ψύξης είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη ζήτηση θερμότητας.

Συνήθως στη διάταξη χρησιμοποιείται ένα δοχείο ζεστού νερού—γνωστό και ως δοχείο αδρανείας—για την εξισορρόπηση των ωριαίων διαταραχών της θερμικής ζήτησης, η οποία συσσωρεύει τη θερμότητα που παράγεται και δε χρειάζεται σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή εξομαλύνοντας, συνεπώς, τις αιχμές. Στην περίπτωση του εμπορικού κτιρίου, οι σωληνώσεις βοηθούν επίσης στην αποθήκευση και μπορούν να προτυποποιηθούν ως δοχείο με συγκεκριμένη θερμοχωρητικότητα. Ανάλογα με την στρατηγική λειτουργίας, η ενέργεια αποθηκεύεται όταν υπάρχει περίσσεια θερμότητας και επιστρέφει στο σύστημα όταν υπάρχει έλλειμμα. Οι Kostowski και Skorek [21] απέδειξαν ότι η εγκατάσταση μίας συσκευής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας καταλήγει σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου στο σύστημα καθώς ο βοηθητικός λέβητας λειτουργεί μικρότερο διάστημα.

Η θερμική ενέργεια είναι στην ουσία η μόνη μορφή ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί. Ο ηλεκτρισμός θα μπορούσε να αποθηκευτεί τοπικά σε συσσωρευτές αλλά με πολύ μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με ό,τι μπορεί να εισαχθεί από το δίκτυο και συνήθως δεν χρησιμοποιείται. Οι Staffell et al. [22] μελέτησαν την προσθήκη συσσωρευτών σε σύστημα συμπαραγωγής υπολογίζοντας τα κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη και βρήκαν ότι στην καλύτερη περίπτωση το κόστος του ηλεκτρισμού ήταν υψηλότερο κατά 50% από το κόστος επαναγοράς ηλεκτρισμού του δικτύου. Για αυτόν το λόγο, στα πλαίσια αυτής της

¹ Οι ηλεκτρικοί ψύκτες χρησιμοποιούν έναν μηχανικό συμπίεστή για να συμπιέσουν το ψυκτικό μέσο από την χαμηλότερη πίεση εξαίτησης στην υψηλότερη πίεση συμπύκνωσης

διατριβής, δεν αξιολογείται η προσθήκη σύστηματος συσσωρευτών.

Ο λοιπός βοηθητικός εξοπλισμός σχεδιάζεται από το μελετητή της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της μελέτης εφαρμογής και είναι εξειδικευμένος για κάθε περίπτωση. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό του συστήματος [17]:

- Η χωροθέτηση του συστήματος ΣΗΘ στο χώρο εγκατάστασης, με βάση τα ισχύοντα από τις πολεοδομικές, πυροσβεστικές διατάξεις για συστήματα παραγωγής ενέργειας (πχ αερισμός χώρου, πυρόσβεση, κλπ).
- Η διασύνδεση του συστήματος ΣΗΘ με το υφιστάμενο εντός κτηρίου σύστημα παροχής καυσίμου (πετρελαίου ή αερίου), με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς που αναφέρονται και στη βιβλιογραφία.
- Η διασύνδεση του συστήματος ΣΗΘ με το υφιστάμενο δίκτυο, σύμφωνα με τις οδηγίες του διαχειριστή του δικτύου.
- Η σύνδεση του συστήματος ΣΗΘ με το δίκτυο ύδρευσης του κτηρίου, με βάση τις ισχύουσες διατάξεις.
- Το σύστημα απαγωγής των καυσαερίων του συστήματος ΣΗΘ και της διαδρομής του από το χώρο εγκατάστασης στο εξωτερικό περιβάλλον,
- Η διασύνδεση της παραγόμενης χρήσιμης θερμότητας από το σύστημα ΣΗΘ με το δίκτυο θέρμανσης και ZNX ή, αν εγκαθίσταται σύστημα τριπαραγωγής, με τη μονάδα απορρόφησης.
- Το σύστημα ελέγχου και αυτοματισμών, τόσο της μονάδας ΣΗΘ, όσο και όλης της εγκατάστασης.

3.4 Κρίσιμες παράμετροι

Ως κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό αναγνωρίστηκαν τα ενεργειακά φορτία, οι τιμές ηλεκτρισμού και η επιλογή της στρατηγικής λειτουργίας. Αυτά αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

3.4.1 Ενεργειακά φορτία

Η διαστασιολόγηση των μονάδων συμπαραγωγής εξαρτάται πρωτίστως από τις ενεργειακές ανάγκες. Για να έχει νόημα η εφαρμογή της πρέπει να υπάρχει ταυτόχρονη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (ή ψύξης). Ο σχεδιασμός θα ήταν πολύ απλός στην ιδανική περίπτωση, η ζήτηση δεν θα παρουσίαζε εποχικότητα και δεν θα μεταβαλλόταν με

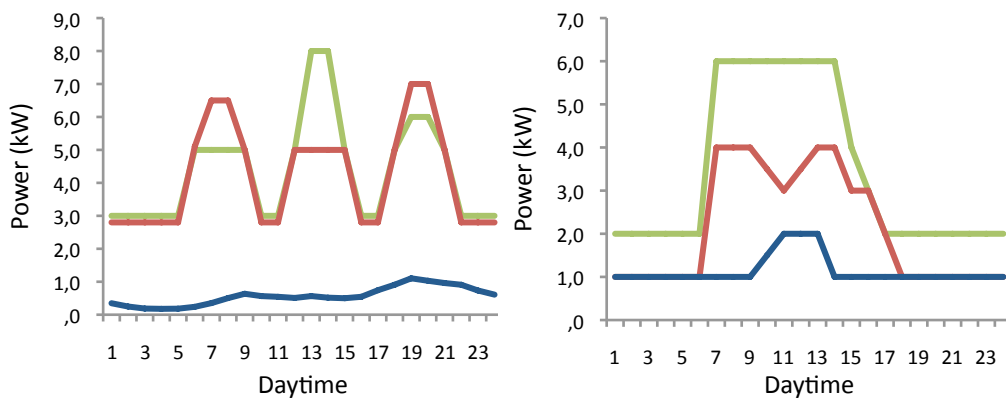
το χρόνο. Κάτι τέτοιο όμως δε συμβαίνει καθώς τα φορτία μεταβάλλονται και έχουν κάποια ειδικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την ομαδοποίησή τους ανά καταναλωτή.

Τυπικά χαρακτηριστικά καταναλωτών

Οι καταναλωτές ενέργειας, μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: Βιομηχανικοί, εμπορικοί και οικιακοί. Κάθε ένας από αυτούς έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και καθορίζει τον τύπο του συστήματος συμπαραγωγής που είναι κατάλληλο.

Βιομηχανικός τομέας Τα βιομηχανικά φορτία είναι συνήθως τα ευκολότερα στην πρόβλεψη και προσομοίωση γιατί εξαρτώνται έντονα από τις παραγωγικές ανάγκες και τον προγραμματισμό. Η ενέργεια χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές διεργασίες με μορφή ζεστού νερού, ατμού, ψυχρών βοηθητικών παροχών ηλεκτρισμού και λιγότερο σε συστήματα HVAC ή φωτισμό. Για αυτό το λόγο, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχει μικρότερη επίδραση στις ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με άλλους καταναλωτές. Οι βιομηχανίες μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο λειτουργίας τους: συνεχούς λειτουργίας και λειτουργίας κατά παρτίδες. Αυτές που έχουν συνεχή λειτουργία έχουν πιο σταθερά ενεργειακά φορτία και η αναλογία μεταξύ διαφορετικών τύπων ενέργειας δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η αναλογία αυτή εξαρτάται μόνο από το είδος της βιομηχανίας. Για παράδειγμα, μια βιομηχανία αλουμινίου είναι εντάσεως ηλεκτρισμού ενώ μια βιομηχανία παγωτού χρειάζεται μεγάλες ποσότητες ψυκτικής ενέργειας. Ένα συνηθισμένο πρόβλημα που παρουσιάζεται στις βιομηχανίες που λειτουργούν κατά παρτίδες είναι η αλληλουχία της ενεργειακής ζήτησης, για παράδειγμα μπορεί η γραμμή παραγωγής να περιλαμβάνει μια διεργασία που καταναλώνει μεγάλη ποσότητα θερμότητα αμέσως μετά από μια διεργασία που καταναλώνει ηλεκτρισμό. Οι αιχμές των φορτίων παρουσιάζουν μεγάλη ασυνέπεια, γεγονός που δυσκολεύει τον ενεργειακό σχεδιασμό. Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει δυο χαρακτηριστικά ημερήσια φορτία για τα 3 είδη ενέργειας. Το πρώτο Σχήμα αναφέρεται σε μια βιομηχανία με λειτουργία κατά παρτίδες δύο βαρδιών και το δεύτερο αναφέρεται σε βιομηχανία συνεχούς λειτουργίας μίας βάρδιας. Το εναλλασσόμενο μοτίβο στη πρώτη περίπτωση είναι ξεκάθαρο.

Εμπορικά και δημόσια κτήρια – Τριτογενής τομέας Τα εμπορικά κτήρια έχουν απαιτητικά θερμικά και ψυκτικά φορτία λόγω των συστημάτων θέρμανσης, κλιματισμού και εξαέρωσης (HVAC). Για αυτό το λόγο ο σχεδιασμός και η εφαρμογή των τεχνολογιών συμπαραγωγής στον εμπορικό τομέα είναι πιο δύσκολη καθώς α) έχει πιο ασαφή ενεργειακά



Σχήμα 3.2: Ημερήσια προφίλ δύο βιομηχανικών καταναλωτών

προφίλ, β) κατά μέσο όρο λειτουργούν λιγότερες ώρες το χρόνο, άρα η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης ανεβαίνει και γ) τα κτήρια είναι κατά κανόνα μικρότερα από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, γεγονός που συνεπάγεται λιγότερο αποδοτικές εγκαταστάσεις και μικρότερες οικονομίες κλίμακας.

Σε αντίθεση με τους βιομηχανικούς καταναλωτές, η εξωτερική θερμοκρασία επηρεάζει πολύ τα εμπορικά κτήρια, ενώ ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η συχνότητα απασχόλησης και χρήσης. Ο ετεροχρονισμός μεταξύ ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων είναι πιο συχνός γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης θερμότητας.

Το Σχήμα 3.4 αναπαριστά τα ημερήσια προφίλ ενός σχολείου, νοσοκομείου, ενός συγκροτήματος γραφείων και ενός ξενοδοχείου. Η λειτουργία ενός σχολικού κτηρίου αρχίζει να λειτουργεί στις 7:00 και κορυφώνεται στις 8:00 όταν όλοι οι μαθητές φτάνουν και αρχίζουν τα μαθήματα. Μετά το πέρας των μαθημάτων (14:00) η ζήτηση μειώνεται και αργότερα το απόγευμα το κτήριο κλείνει. Αυτή η συμπεριφορά των φορτίων δεν είναι ιδανική καθώς καταλήγει σε χαμηλό συντελεστή φορτίου, λόγω των απαιτητικών πρωινών αιχμών και του σχετικά χαμηλού συντελεστή απασχόλησης. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται επίσης σε συγκροτήματα γραφείων, αλλά με πιο ομαλή καμπύλη λόγω της αυξημένης απασχόλησης κατά τις απογευματινές ώρες. Απεικονίζεται επίσης η ημερήσια λειτουργία ενός τυπικού ξενοδοχείου το καλοκαίρι. Τα βασικότερα στοιχεία της ηλεκτρικής κατανάλωσης αποτελείται από φωτισμό και εξαέρωση. Η ψυκτική ισχύς είναι επίσης σημαντική κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου είναι υψηλότερη το απόγευμα, όταν οι περισσότεροι επισκέπτες βρίσκονται στα δωμάτια τους. Η ενεργειακή κατανάλωση πέφτει τη νύχτα, ενώ οι επισκέπτες κοιμούνται, και τη μέρα, όταν τα δωμάτια μένουν άδεια.

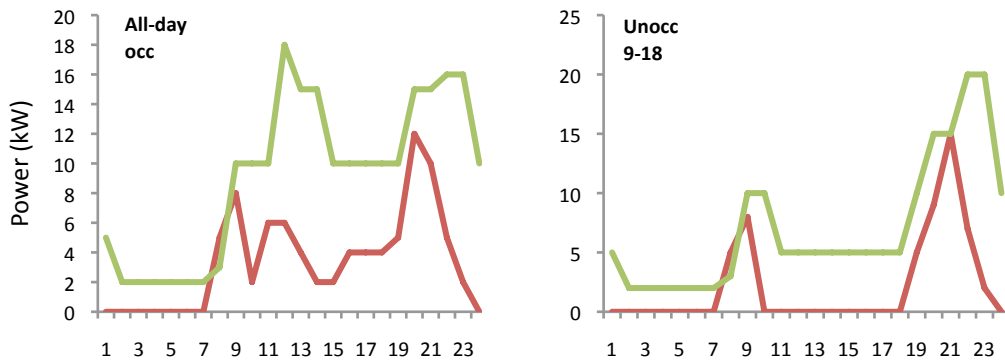
Οι συνήθεις διεργασίες ενός ξενοδοχείου (πχ. μαγείρεμα, καθάρισμα) είναι επίσης σημαντικός παράγοντας. Τα νοσοκομεία έχουν τα πιο σταθερά φορτία από όλα τα εμπορικά κτήρια γιατί έχουν ένα πιο διευρυμένο ωράριο λειτουργίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Εκτός από τα παραπάνω παραδείγματα, άλλοι ιδανικοί υποψήφιοι για εγκαταστάσεις τριπαραγωγής αυτού του τομέα μπορεί να είναι εγκαταστάσεις με υψηλά θερμικά φορτία, όπως κέντρα συλλογής δεδομένων, καταστήματα τροφίμων που απαιτούν ψύξη ή καζίνο.

Κατοικίες Αρκετές μελέτες έχουν γίνει για να βελτιώσουν την κατανόηση της οικιακής ηλεκτρικής κατανάλωσης [23–25]. Οι κατοικίες έχουν τα πιο απρόβλεπτα φορτία, καθώς βασίζονται σε ανθρώπινες δράσεις και συνήθειες. Η κυκλικότητα των διακυμάνσεων σε κλίμακα τετάρτου της ώρας είναι σημαντική λόγω της φύσης της λειτουργίας του οικιακού εξοπλισμού (πχ ψυγείο, λέβητας κλπ). Για παράδειγμα, συσκευές, όπως π.χ. το ψυγείο, καταναλώνουν ενέργεια με έντονη κυκλικότητα λόγω του ηλεκτρικού συμπυκνωτήρα που λειτουργεί, όποτε χρειαστεί, από το σύστημα ελέγχου της συσκευής. Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι το ωράριο απασχόλησης που εξαρτάται από τις συνήθειες των κατοίκων (εργασία, εκπαίδευση, διασκέδαση). Πιο συγκεκριμένα, οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το μοτίβο απασχόλησης και συνεπώς την ενεργειακή ζήτηση ενός νοικοκυριού είναι οι εξής [25]: α) ο αριθμός των κατοίκων, β) ο χρόνος του πρώτου κατοίκου που σηκώνεται το πρωί και του τελευταίου κατοίκου που πηγαίνει για ύπνο το βράδυ και γ) η περίοδος που το σπίτι μένει ακατοίκητο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το Σχήμα 3.3 απεικονίζει δύο τυπικά ενεργειακά προφίλ για κατοικίες.

Οι αιχμές συνήθως συμβαίνουν το απόγευμα, οπότε η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι πιο έντονη, το πρωί, οπότε ο κόσμος ξυπνάει και ετοιμάζεται να φύγει, αλλά επίσης το βράδυ, που οι περισσότεροι κάτοικοι είναι στο σπίτι και οι απαιτήσεις φωτισμού αλλά και χρήσης συσκευών είναι μεγαλύτερες. Η εξωτερική θερμοκρασία και κατά συνέπεια το γεωγραφικό πλάτος είναι πολύ σημαντικός παράγοντας και επηρεάζει τη ζήτηση, ειδικά για θερμικά και ψυκτικά φορτία. Από την οπτική του σχεδιασμού εγκαταστάσεων ΣΗΘ για σπίτι (micro-CHP), ο συγχρονισμός των διαφορετικών ειδών ενέργειας βασίζεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα και ώρα της ημέρας (λόγω της εξωτερικής θερμοκρασίας). Οι Ren et al [3] ισχυρίζονται ότι η ωριαία ζήτηση θέρμανσης και ζεστού νερού έχει μεγαλύτερη διακύμανση από την ωριαία ηλεκτρική ζήτηση. Επίσης επισημαίνουν ότι συνήθως η αιχμή ζήτησης θέρμανσης και ηλεκτρισμού συμβαίνει σε διαφορετικές ώρες. Στον Πίνακα 3.4.1 αναφέρονται τυπικές ενεργειακές ανάγκες για κατοικίες στην Ευρώπη [1].

Πίνακας 3.3: Ενεργειακές Ανάγκες για θέρμανση και ψύξη σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης (kWh/m^2)

	N. Ευρώπη	Κεντρική Ευρώπη	B. Ευρώπη
Θερμότητα	15	15	20-30
Ψύξη	15	15	20-30
Συνολική πρωτογενής ενέργεια	120	120	130-140

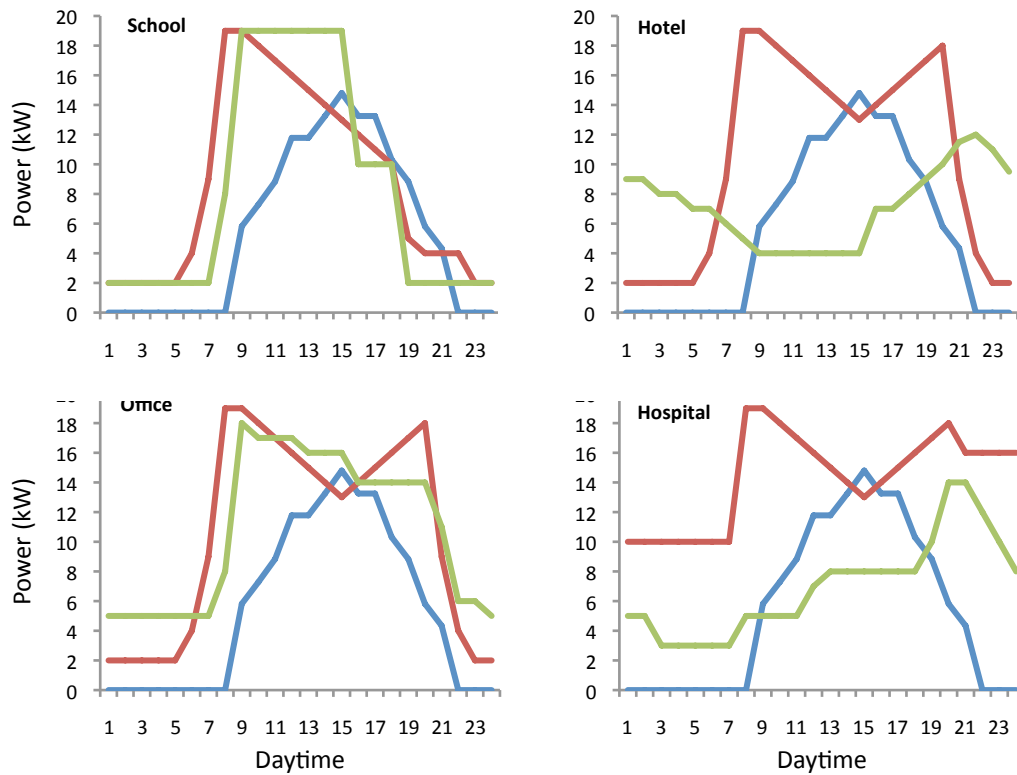


Σχήμα 3.3: Ημερήσιο ενεργειακό προφίλ μιας κατοικίας που απασχολείται και μιας που δεν απασχολείται κατά τη διάρκεια της ημέρας

Επισκόπηση φορτίων

Διαγράμματα Βασικό εργαλείο για την περιγραφή των φορτίων είναι με την απεικόνισή τους σε διαγράμματα καμπύλης διάρκειας φορτίου (ΚΔΦ). Σε αυτά απεικονίζεται το μέγεθος των φορτίων συγκριτικά με τη διάρκειά τους [26] και χρησιμοποιούνται κυρίως στα ηλεκτρικά φορτία και κάνουν πιο εύκολο το διαχωρισμό μεταξύ φορτίων βάσης και φορτίων αιχμής.

Μια καμπύλη διάρκειας φορτίου (ΚΔΦ) χρησιμοποιείται συχνά για να αναπαραστήσει το χρονικό φορτίο σε μια εκτεταμένη χρονική περίοδο. Όπως και με τη χρονολογική καμπύλη φορτίου, η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη διάρκειας φορτίου αναπαριστά τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις. Σε μια τέτοια καμπύλη, η τετμημένη αναπαριστά τον αριθμό των ωρών κατά τη διάρκεια του οποίου το σύστημα έχει ίσο ή ξεπερνά το αντίστοιχο ποσό ισχύος. Στην ουσία, είναι ίδια με την καμπύλη χρονοσειράς των φορτίων μόνο που ο χρόνος έχει αναδιαταχτεί έτσι ώστε τα ωριαία φορτία (τεταγμένες) να ταξινομηθούν σε φθίνουσα σειρά, δηλαδή η ΚΔΦ είναι πάντα μονοτονικά φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου. Η ωριαία ΚΔΦ που χρησιμοποιείται συνήθως είναι βηματική συνάρτηση, ενώ οι πραγματικές ΚΔΦ είναι ομαλές. Κανονικοποιώντας τη χρονική μεταβλητή, η τιμή σε κάθε σημείο του άξονα x γίνεται το κλάσμα της περιόδου για το οποίο το φορτίο είναι ίσο ή ξεπερνά την αντίστοιχη

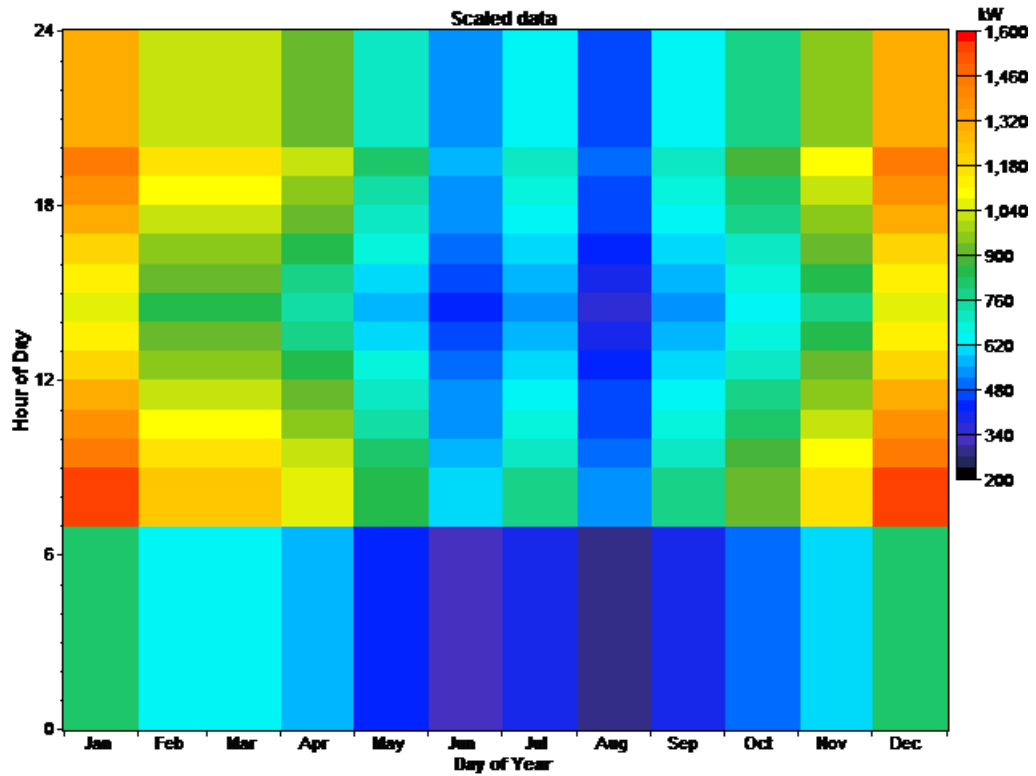


Σχήμα 3.4: Ημερήσιο προφίλ 4 εμπορικών καταναλωτών (Σχολείο, Ξενοδοχείο, Γραφεία, Νοσοκομείο)

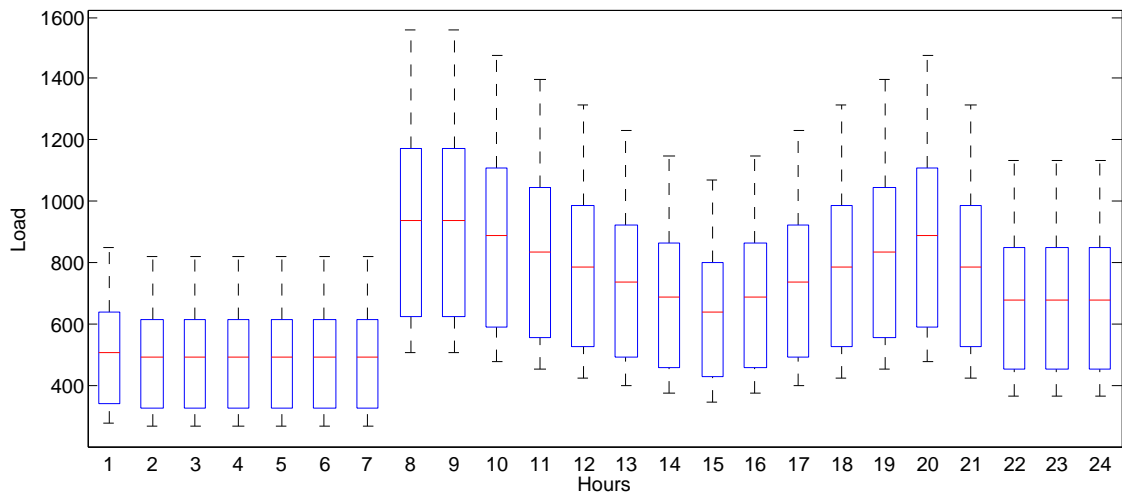
ισχύ. Σε αυτή τη λογική, ο άξονας x μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστά την πιθανότητα μία συγκεκριμένη τιμή του συστήματος να είναι ίση ή μεγαλύτερη. Παρόλ' αυτά αυτές οι καμπύλες δεν αναπαριστούν το συγχρονισμό των φορτίων, δηλαδή δεν είναι ξεκάθαρο πότε συμβαίνουν π.χ. οι αιχμές των θερμικών με τις αιχμές των ηλεκτρικών φορτίων. Για αυτό το σκοπό, αυτά τα σχήματα πρέπει να συνοδεύονται με αντίστοιχα διαγράμματα που να δείχνουν τη συσχέτιση κάθε είδους ενέργειας για όλο το χρόνο.

Ένας άλλος τρόπος για την απεικόνιση των ημερήσιων και εποχικών απαιτήσεων είναι είτε με «χάρτες ενέργειας» (Σχήμα 3.5) είτε με διαγράμματα boxplot (Σχήμα 3.6) που δείχνουν ανά μήνα ή ανά ώρα τις διακυμάνσεις των ενεργειακών απαιτήσεων.

Δείκτες Ως συνάρτηση του χρόνου, η χρονοσειρά των φορτίων παρουσιάζει αρκετές αιχμές και "κοιλιάδες". Οι παρακάτω δείκτες χρησιμοποιούνται για την ποιοτική περιγραφή των χαρακτηριστικών τους [27]: Τα φορτία χωρίζονται σε φορτία βάσης και φορτία αιχμής. Τα φορτία αιχμής είναι φορτία κοντά στο μέγιστο (συνήθως κοντά στο 95 ποσοστημόριο) και



Σχήμα 3.5: Ενεργειακός χάρτης (θερμότητας)



Σχήμα 3.6: Box-plot

φορτία βάσης τα φορτία κοντά στο ελάχιστο (κοντά στο 10 ποσοστημόριο).

Ο σημαντικότερος δείκτης για την περιγραφή των ποιοτικών χαρακτηριστικών είναι ο συντελεστής φορτίου (load factor - LF) που ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που παράγεται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα προς την ενέργεια που θα παραγόταν αν η μονάδα λειτουργούσε στα μέγιστα φορτία. Μία ισοδύναμη έκφρασή του είναι η μέση ζήτηση ισχύος προς την ισχύ αιχμής στο ίδιο χρονικό περιθώριο ($LF = \frac{Energy/mo}{PeakLoad \cdot TotalHrs/mo} = \frac{Average}{PeakLoad}$). Με απλά λόγια, είναι μια ένδειξη του πόσο ομαλά είναι τα φορτία. Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης, τόσο η μονάδα λειτουργεί πιο κοντά στα φορτία αιχμής. Σε ένα διάγραμμα ΚΔΦ που έχει κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη αιχμή και τη συνολική διάρκεια, ο συντελεστής φορτίου είναι ο λόγος της επιφάνειας κάτω από τη ΚΔΦ προς την επιφάνεια πάνω από την καμπύλη. Γενικά ένας χαμηλός συντελεστής φορτίου δεν είναι επιθυμητός γιατί "απασχολεί" το δίκτυο είτε τον εξοπλισμό λίγες ώρες σε σχέση με την ονομαστική του δυναμικότητα. Αυτό φυσικά έχει και αντίκτυπο στο κόστος της ενέργειας, όπως θα φανεί σε επόμενες ενότητες.

Ένας δείκτης με μικρότερη σημασία είναι ο λόγος των φορτίων (Load Ratio - LR) όπου είναι ο λόγος της βάσης προς τα φορτία αιχμής. ($LR = \frac{Base(Min)Load}{Peak(Max)Load}$). Πιο συγκεκριμένοι δείκτες για συγκεκριμένες ομάδες καταναλωτών μπορούν επίσης να υπολογιστούν όπως ο συντελεστής φορτίου απασχόλησης (occupancy load factor) που είναι παρόμοιος με το συντελεστή φορτίου αλλά είναι ένα μέτρο της κατανάλωσης που συμβαίνει σε ώρες εκτός ωραρίου λειτουργίας ($OLF = \frac{Energy/mo}{PeakLoad \cdot Op.Hrs/mo}$). Όταν ο OLF είναι κοντά ή μεγαλύτερος από τη μονάδα, σημαίνει ότι υπάρχουν συσκευές που λειτουργούν όταν το κτήριο δεν κατοικείται. Για τη σύγκριση της μέσης κατανάλωσης (και των φορτίων αιχμής) κτηρίων με παρόμοια χαρακτηριστικά χρησιμοποιείται συνήθως η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας ($\frac{W}{m^2}$) που είναι συνήθως χαρακτηριστική για το είδος και τον τόπο του καταναλωτή.

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να δείξουν αν χρειάζεται να γίνουν ενέργειες διαχείρισης των φορτίων πριν την επένδυση. Τέτοιες τεχνικές είναι η μετακίνηση φορτίων (load shifting), το γέμισμα των "κοιλιάδων" (valley filling), το κόψιμο των αιχμών (peak clipping) κλπ [28]. Για παράδειγμα, μπορεί να προκληθεί χαμηλός συντελεστής φορτίου, αν κατά την εκκίνηση μιας αντλίας θερμότητας προκληθεί απότομη αιχμή στη ζήτηση. Η εγκατάσταση εξοπλισμού συμπαραγωγής συνήθως μεταβάλλει τους παραπάνω δείκτες, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά το σχεδιασμό.

Καταγραφή φορτίων

Απαραίτητο βήμα πριν το σχεδιασμό είναι η ενεργειακή επιθεώρηση. Οι υπολογισμοί πρέπει να στηρίζονται σε πραγματικά στοιχεία, τα οποία έχουν συγκεντρωθεί με μετρήσεις

κατά τη συγκεκριμένη περίοδο αναφοράς. Η ενεργειακή καταγραφή είναι μια συστηματική συλλογή και ανάλυση πληροφοριών από την ενεργειακή χρήση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των βελτιώσεων της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτηρίου, του σχεδίου/ εξοπλισμού ή μιας συγκεκριμένης διαδικασίας.

Αρχικά, καταγράφονται οι λεπτομέρειες του υφιστάμενου συμβατικού συστήματος ενεργειακής παροχής. Οι πηγές των πληροφοριών μπορεί να είναι τα τεχνικά σχέδια του έργου, η επίσκεψη στον πιθανό χώρο εγκατάστασης του συστήματος ΣΗΘ, πληροφορίες από τα τεχνικά φυλλάδια του εξοπλισμού, κτλ. Συλλέγονται δεδομένα για τις συνθήκες λειτουργίας, όπως οι πιέσεις, οι θερμοκρασίες, το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας του κτηρίου, ο τόπος και τα χαρακτηριστικά σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο και το δίκτυο καυσίμου. Σε αυτό το στάδιο πρέπει να αποσαφηνιστεί αν χρειάζονται να ληφθούν μέτρα ενεργειακής εξοικονόμησης που δε σχετίζονται με τη μονάδα ΣΗΘ και δεν απαιτούν μεγάλη επένδυση. Με βάση τα συλλεχθέντα στοιχεία, δημιουργούνται τα προφίλ των φορτίων ηλεκτρισμού, θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου, με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Συνήθως χρησιμοποιούνται είτε μετρητές, είτε λογαριασμούς ρεύματος και καυσίμου.

Για την περίπτωση της τριπαραγωγής εξάγονται τα φορτία του ηλεκτρισμού που χρησιμοποιούνται για ψύξη για να θεωρηθούν ξεχωριστά. Ιστορικά δεδομένα των ενεργειακών φορτίων για τουλάχιστον ένα χρόνο είναι απαραίτητα για την καταγραφή της εποχικότητας. Αν υπάρχουν δεδομένα για περισσότερα από δύο χρόνια, τότε ο σχεδιασμός θα είναι ακριβέστερος αλλά σε αυτή την περίπτωση πρέπει να αφαιρεθεί από τη χρονοσειρά η τάση για να μετατραπεί σε στάσιμη. Σε αυτή τη περίπτωση, καταγράφονται οι μέσοι όροι μαζί με την τυπική απόκλιση ανά μήνα ή ανα ημέρα της εβδομάδας, πληροφορία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση αβεβαιότητας. Τέλος, υπολογίζεται το πραγματικό κόστος ενέργειας (θερμικής / ηλεκτρικής) για τη σύγκριση της εξοικονόμησης.

3.4.2 Τιμολόγηση ενεργειακών παροχών

Μετά την ενεργειακή κρίση, η πρόοδος της ενεργειακής χρήσης και της ενεργειακής αποδοτικότητας υπήρξε στο επίκεντρο της τεχνολογικής εξέλιξης. Σήμερα οι ενεργειακές πηγές που τροφοδοτούν το βιομηχανικό, εμπορικό και οικιακό τομέα είναι ο ηλεκτρισμός και το φυσικό αέριο. Και οι δύο βασίζονται στο κόστος των πρωτογενών (κυρίως ορυκτών) καυσίμων. Καθώς τα πρωτογενής καύσιμα είναι αγαθά που η τιμή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες—όπως γνωστά αποθέματα, παγκόσμια παροχή και ζήτηση, φορολογία, συνάλλαγμα και άλλοι κοινωνικο-οικονομικοί παράγοντες—η ακριβής πρόβλεψη είναι εξαιρετικά δύσκολη. Η πρόσφατη αιχμή της τιμής του πετρελαίου στα 140 \$/bbl ξεπέρασε ακόμα και

τις πιο απαισιόδοξες προβλέψεις [29]. Σε συνδυασμό με την εκθετική αύξηση του πληθυσμού, αυτή η αβεβαιότητα επηρεάζει όλα τα είδη της ενεργειακής τιμολόγησης, κάνοντας το μακροχρόνιο σχεδιασμό εξαιρετικά δύσκολο και ευαίσθητο σε απρόβλεπτα γεγονότα.

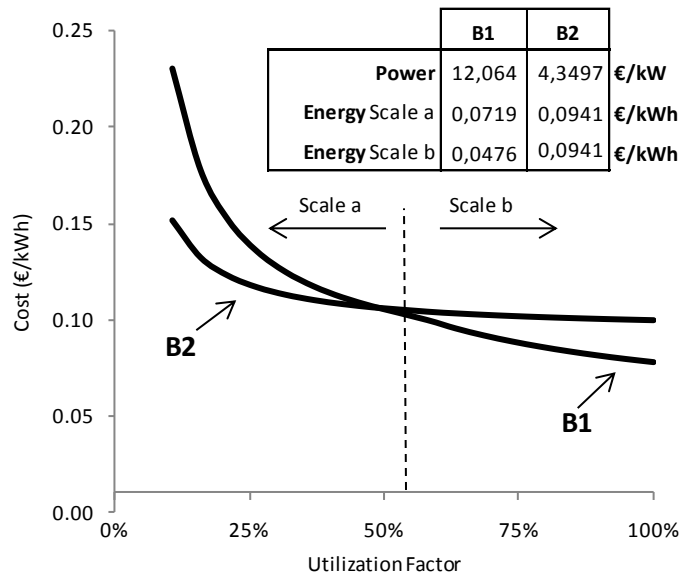
Ηλεκτρισμός

Η τιμολογιακή πολιτική που εφαρμόζεται σε κάθε χώρα επηρεάζει σημαντικά την οικονομική αποδοτικότητα των ενεργειακών επενδύσεων. Η κερδοφορία και η αριστοποίηση μιας επένδυσης τριπαραγωγής εξαρτάται έντονα από τη δομή και την τιμολόγηση ενέργειας που εφαρμόζεται πριν και μετά από την εγκατάσταση του εξοπλισμού.

Συνήθως για τους εμπορικούς καταναλωτές μέσης τάσης υπάρχουν τρία είδη χρεώσεων: Πάγια χρέωση, χρέωση ενέργειας (kWh) και χρέωση μέγιστης ισχύος (kW) ανά μήνα.

Τα πάγια έξοδα είναι σταθερά για όλους τους καταναλωτές και συνήθως δεν επιδέχονται επιδοτήσεις ή εκπτώσεις παρά μόνο σε προνομιακές κοινωνικές ομάδες. Οι χρεώσεις ενέργειας είναι ανάλογες με τον ηλεκτρισμό που καταναλώνεται κάθε μήνα και συνήθως υπάρχει κλιμάκωση μετά από δεδομένες κιλοβατώρες. Οι χρεώσεις ισχύος εξαρτώνται από τη μέγιστη ισχύ κατά τη διάρκεια του μήνα, ανεξάρτητα από το πόσο συχνά εμφανίζεται. Η χρέωση μέγιστης ισχύος οφείλεται στο γεγονός ότι ο πάροχος ηλεκτρισμού είναι υποχρεωμένος να χρησιμοποιήσει λιγότερο αποδοτικές μορφές ενέργειας για να ικανοποιήσει τη ζήτηση, καταλήγοντας έτσι σε υψηλότερο οριακό κόστος ενέργειας. Άλλη μορφή τιμολογίων που χρησιμοποιείται συχνά είναι τα τιμολόγια που χρεώνουν ανάλογα με την ώρα χρήσης (Time-Of-Use tariffs) χωρίζοντας τη μέρα σε ώρες αιχμής, ώρες κανονικό φορτίου και ώρες χαμηλού φορτίου. Κάθε συνδυασμός των παραπάνω μπορεί να είναι πιθανός. Συνήθως οι παραγωγοί ενέργειας που ακολουθούν αυτό το μοτίβο τιμολόγησης διαμορφώνουν τα τιμολόγια τους ως εξής: Ένα τιμολόγιο μπορεί να χρεώνει ακριβά την ισχύ και φτηνά την ενέργεια και ένα άλλο χρεώνει φτηνά την ισχύ και ακριβά την ενέργεια. Ο ηλεκτρισμός για βιομηχανικές χρήσεις ή για συμπαραγωγή έχει συνήθως έκπτωση.

Ένας χρήσιμος δείκτης για την επιλογή του βέλτιστου τιμολογίου είναι ο *συντελεστής χρησιμοποίησης* (Utilization Factor – UF) του δικτύου, ο οποίος είναι η αντίστοιχη έκφραση του συντελεστή φορτίου αλλά για τον ηλεκτρισμό που αγοράζεται από το δίκτυο. Ο τρόπος τιμολόγησης της ενέργειας (χρέωση ζήτησης και ενέργειας) κάνει το κόστος της να είναι άμεση συνάρτηση του δείκτη αυτού. Αυτός εκφράζει το ποσό της ενέργειας που καταναλώθηκε ως προς τη ενέργεια που θα μπορούσε να καταναλωθεί αν ο πελάτης λειτουργούσε συνέχεια σε φορτία αιχμής (μέγιστη ζήτηση). Στο Σχήμα 3.7 μαζί με τις εφαρμοζόμενες χρεώσεις παρουσιάζεται η σχέση του συντελεστή χρησιμοποίησης για δύο διαφορετικά τιμολόγια, ένα



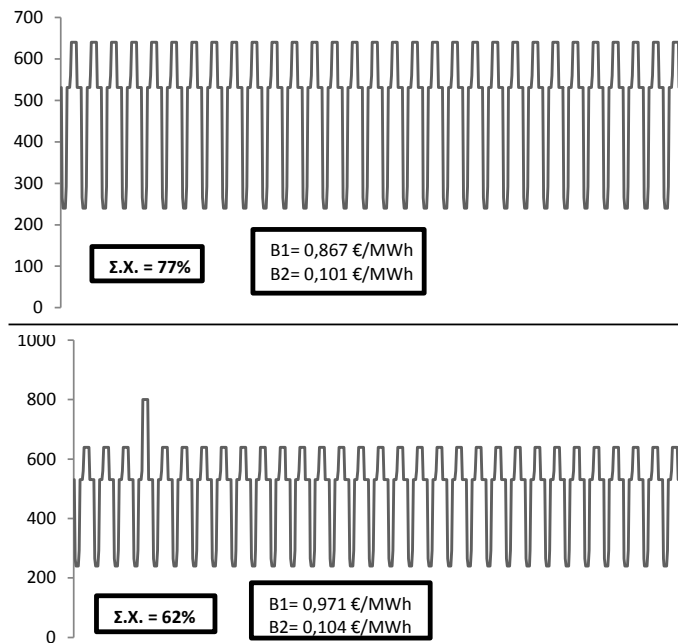
Σχήμα 3.7: Συσχέτιση συντελεστή χρησιμοποίησης με συνολική χρέωση

που χρεώνει φτηνά την ισχύ και ακριβά την ενέργεια και το αντίστροφο.

Από το Σχήμα 3.7 είναι προφανές ότι είναι καλύτερη η λειτουργία σε υψηλούς συντελεστές χρησιμοποίησης ή αλλιώς η λειτουργία σε φορτία κοντά στα φορτία αιχμής. Πριν από κάθε επένδυση, λοιπόν, είναι απαραίτητα να ληφθούν όλα τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας και διαχείρισης φορτίων. Ανεβάζοντας το συντελεστή χρησιμοποίησης με τις τεχνικές που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.4.1 μπορεί να μειωθεί το κόστος της ενέργειας. Με την εγκατάσταση μιας μονάδας τριπαραγωγής, ο ΣΧ αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με την εφαρμοσμένη στρατηγική λειτουργίας. Συνήθως, με τα τιμολόγια της πρώτης κατηγορίας και με σωστή διαχείριση των φορτίων είναι δυνατόν να πετύχουμε πολύ χαμηλές τιμές, αλλά αυξάνεται ο κίνδυνος για μεγαλύτερες χρεώσεις γιατί, αν πχ κάποια στιγμή η μονάδα σταματήσει να δουλεύει σε ώρες αιχμής για οποιονδήποτε λόγο, τότε τα φορτία αιχμής που θα ζητηθούν από το δίκτυο θα οδηγήσουν σε μικρότερο ΣΧ και συνεπώς σε πολύ υψηλότερο κόστος ενέργειας (Σχήμα 3.8).

Τιμή πώλησης στην Ελλάδα Η τιμή πώλησης ηλεκτρισμού στους βιομηχανικούς και εμπορικούς πελάτες είναι κοντά στο μέσο όρο των χωρών της ΔΕΑ ενώ η τιμή του οικιακού τομέα είναι από τις χαμηλότερες. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η τιμολόγηση ενέργειας για καταναλωτές μέσης τάσης (με ετήσια κατανάλωση 2GWh) [30].

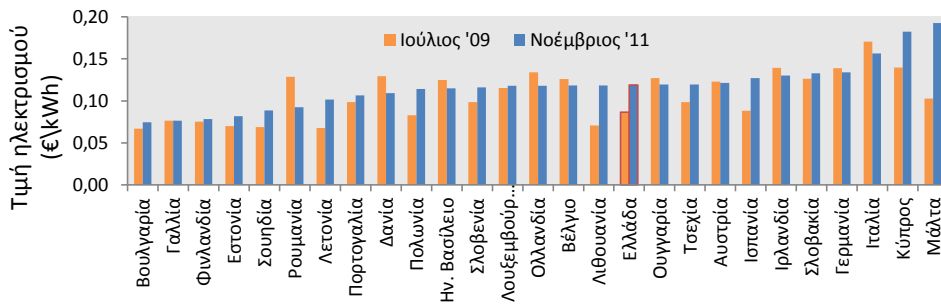
Τα τιμολόγια του ηλεκτρισμού στην Ελλάδα παραμένουν υπό ρύθμιση όσο το μερίδιο αγοράς της ΔΕΗ είναι πάνω από 70%. Η αναμόρφωση των τιμολογίων πραγματοποιήθηκε το



Σχήμα 3.8: Επίδραση δυσλειτουργίας του συστήματος στο συντελεστή χρησιμοποίησης και στο κόστος ενέργειας

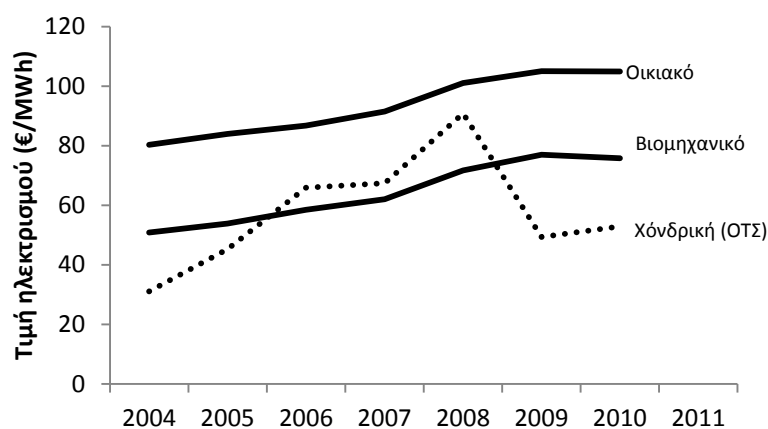
2007 με υπουργική απόφαση που αφαιρούσε όλες τις επιδοτήσεις μεταξύ τιμολογίων αλλά η ενσωμάτωση των αλλαγών δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα. Η πιο σημαντική αλλαγή ήταν η αναδιαμόρφωση των τιμολογίων με την εφαρμογή τους το Γενάρη 2011 που απλοποίησε τις διαφορετικές κλίμακες και αφαίρεσε τις αλληλοεπιδοτήσεις. Η αγορά των ιδιωτών θα απελευθερωθεί εντελώς ως το 2013 [5].

Το υφιστάμενο τιμολογιακό σύστημα προκάλεσε διάφορες στρεβλώσεις στην αγορά ηλεκτρισμού. Η μέση τιμή χονδρικής τριπλασιάστηκε από το 2004 ως το 2008, αλλά τα ρυθμιζόμενα τιμολόγια ηλεκτρισμού αυξήθηκαν μόνο 40% για τους βιομηχανικούς χρήστες και



Σχήμα 3.9: Τιμή ηλεκτρισμού σε διάφορες χώρες της ΕΕ για βιομηχανικούς καταναλωτές

25% για τους οικιακούς. Το 2007–2008, οι υψηλές τιμές των καυσίμων οδήγησαν σε υψηλές τιμές ηλεκτρισμού. Ως αποτέλεσμα, όλοι οι παραγωγοί και προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας δεν πουλούσαν τον ηλεκτρισμό στους ιδιώτες αλλά στην χονδρική, επειδή λόγω της ρύθμισης η τιμή ήταν ανταγωνιστικότερη (Σχήμα 3.10). Για αυτό το λόγο δεν υπήρχε ουσιαστική απελευθέρωση της αγοράς μέχρι το 2010 [31]. Τέλη του 2009 αρκετοί εμπορικοί πελάτες άλλαξαν πάροχο από τη ΔΕΗ σε άλλους, καθώς οι τιμές χονδρικής έπεσαν σημαντικά και η αγορά ιδιωτών έγινε πιο ανταγωνιστική, γεγονός που συνεχίστηκε και τις επόμενες χρονιές. Οι χαμηλές τιμές ηλεκτρισμού στο δίκτυο αποτελούν αντικίνητρο για



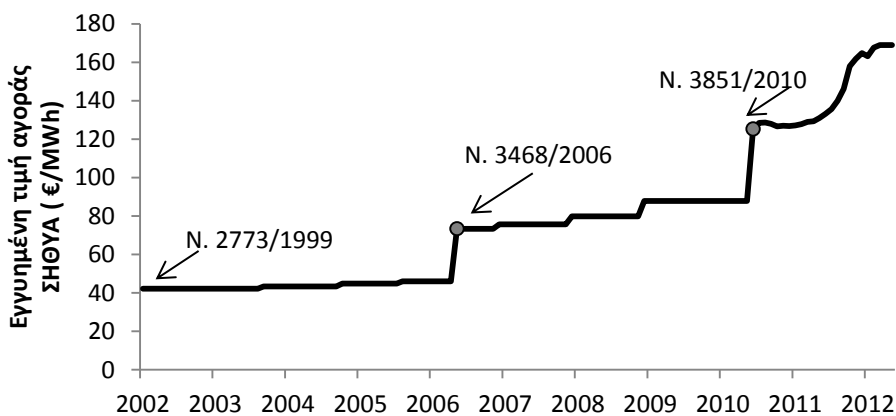
Σχήμα 3.10: Μέση ετήσια τιμή ηλεκτρισμού

επενδύσεις συμπαραγωγής καθώς το λειτουργικό όφελος δεν επαρκεί για την αποπληρωμή της επένδυσης.

Τιμή αγοράς στην Ελλάδα Με τον νόμο 3468/2006 η εγγυημένη τιμή αγοράς κλειδώσε στα 87,84 €/MWh για το διασυνδεδεμένο και στα 99,44 €/MWh για το μη διασυνδεδεμένο δίκτυο. Η τιμή αυτή μεταβαλλόταν μόνο με βάση το δείκτη τιμών των καταναλωτών. Η σταθερή τιμή που καθιερώθηκε στο πνεύμα της τιμολόγησης άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φάνηκε να εμφανίζει αδυναμία γιατί το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ΣΗΘ εξαρτάται από την τιμή του φυσικού αερίου. Για αυτό το λόγο με το νόμο 3851/2010 θεοπίστηκε ένας συντελεστής ρήτρας, όπου η παραπάνω τιμή διορθώνεται με βάση τη διακύμανση της τιμής του φυσικού αερίου ως εξής: $SR = 1 + \frac{MT\Phi A - 26}{100 \times \eta_{el}}$, όπου ΜΤΦΑ η ανά μήνα μέση μοναδιαία τιμή πώλησης φυσικού αερίου για συμπαραγωγή σε €/MWh ανώτερης θερμογόνου δύναμης (ΑΘΔ) στους χρήστες ΦΑ στην Ελλάδα, εξαιρουμένων των πελατών ηλεκτροπαραγωγής και η_{el} ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της διάταξης ΣΗΘΥΑ επί ανώτερης θερμογόνου δύναμης (ΑΘΔ) φυσικού αερίου, ο οποίος ορίζεται σε 33% για

μονάδες ΣΗΘΥΑ <1MWe, και σε 35% για μονάδες ΣΗΘΥΑ >1MWe. Η ΜΤΦΑ ορίζεται με μέρη της Διεύθυνσης Πετρελαϊκής Πολιτικής του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής και κοινοποιείται ανά μήνα στον ΔΕΣΜΗΕ. Η τιμή του ΣΡ δεν μπορεί να είναι μικρότερη της μονάδας. Στην περίπτωση που οι ανωτέρω ΣΗΘΥΑ που κάνουν χρήση φυσικού αερίου αξιοποιούν τα καυσάερια για γεωργικούς σκοπούς ο συντελεστής ΣΡ μπορεί να προσαυζάνεται με απόφαση της ΡΑΕ μέχρι 20%.

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη της εγγυημένης τιμής και η ευνοϊκή ρύθμιση που έτυχε από τους εκάστοτε νόμους. Η επίδραση του συντελεστή ρήτρας όπου σχεδόν διπλασιάζει την τιμή αγοράς του ηλεκτρισμού από ΣΗΘΥΑ είναι φανερή από το 2010 και μετά.



Σχήμα 3.11: Διαχρονική εξέλιξη εγγυημένης τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΣΗΘΥΑ

Φυσικό Αέριο

Η εισαγωγή του Φυσικού Αερίου στη χώρα μας είναι ιδιαίτερα επίκαιρη αφού μόλις το 1996 εισάγεται στη χώρα μας προερχόμενο από τη Ρωσία και την Αλγερία με προορισμό σε μια εικοσαετία να καλύψει το 20% περίπου των ενεργειακών αναγκών μας υποκαθιστώντας σε σημαντικό ποσοστό κυρίως το πετρέλαιο και τον ηλεκτρισμό. Το κύριο συστατικό του είναι το μεθάνιο (CH_4), το οποίο καθορίζει αποφασιστικά τις θερμοφυσικές του ιδιότητες. Είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και έχει μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη από το πετρέλαιο γι' αυτό και μπορεί με ευκολία να αντικαταστήσει άμεσα τον ηλεκτρισμό. Οι σημαντικότερες ιδιότητες του φυσικού αερίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4 [32].

Η επόμενη δεκαετία είναι για την Ελλάδα η 'δεκαετία του Φυσικού Αερίου', τόσο στον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό όσο και στην ανάπτυξη και διάδοση της σχετικής τεχνολογίας.

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες ΦΑ στην Ελλάδα

Μέγεθος	Ρώσικο	Αλγερινό	
ΑΘΔ	11,1	11,8	kWh/Nm ³
	40,2	42,3	MJ/Nm ³
ΚΘΔ	10,0	10,0	kWh/Nm ³
	36,2	36,2	MJ/Nm ³
Πυκνότητα	0,74	0,78	kg/Nm ³
Σχετική Πυκνότητα	0,57	0,60	-
ΑΘΔ / Μον. Μάζας	15,0	15,1	KWh/kg
	54,0	54,0	MJ/kg
ΑΘΔ / Μον. Μάζας	13,5	13,5	KWh/kg
	48,6	48,6	MJ/kg
Λόγος ΚΘΔ/ΑΘΔ	0,90	0,90	-
Αν. Όριο Ανάφλεξης	14,3	13,9	%
Κατ. Όριο Ανάφλεξης	5,2	4,8	%

σίας και τεχνολογίας. Όσον αφορά στη συμπαραγωγή, το φυσικό αέριο είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Δεν είναι μόνο η καθαρότερη πηγή ενέργειας που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, αλλά είναι και η πιο αποδοτική σε όρους ενέργειας τελικής χρήσης. Και στους δυο βασικούς τύπους εξοπλισμού συμπαραγωγής, δηλαδή στις παλινδρομικές μηχανές και στους στροβίλους, το φυσικό αέριο έχει να παρουσιάσει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα καύσιμα, όπως το πετρέλαιο και το μαζούτ. Η καθαρότητά του και η ποιότητά του συντελούν σε περισσότερο αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μονάδας και σημαντικά μειωμένη συντήρηση. Τα προβλήματα προμήθειας και αποθήκευσης που υπάρχουν με τη χρήση άλλων καυσίμων, υγρών και στερεών, παύουν να υφίστανται με τη χρήση του Φυσικού Αερίου, καθόσον αυτό μεταφέρεται εύκολα με σωληνώσεις σε όλα τα σημεία της κατανάλωσής του. Το Φυσικό Αέριο αναμειγνύεται πολύ εύκολα με τον αέρα και τα προϊόντα της καύσεως που παράγονται δεν περιέχουν θείο.

Τιμή πώλησης Η τιμή πώλησης του φυσικού αερίου διαφέρει ανάλογα με το που αναφέρεται. Υπάρχουν τιμές χονδρικής και τιμές τελικής χρήσης που διαφέρουν ανάλογα με το είδος του καταναλωτή (βιομηχανικός, εμπορικός, οικιακός). Οι τιμές του φυσικού αερίου περιλαμβάνουν το κόστος προμήθειας, μεταφοράς, διανομής και αποθήκευσης καθώς και το περιθώριο κέρδους του διανομέα και φόρους. Οι τιμές τελικής χρήσης και οι τιμές χονδρικής διαφέρουν σημαντικά ακόμα και σε διαφορετικές περιοχές της ίδιας χώρας.

Η τιμή του αερίου μπορεί να υπολογιστεί με δύο φόρμουλες. Η πρώτη είναι μέσω σύνδεσης της τιμής του ΦΑ με το πετρέλαιο μέσω ενός δείκτη πετρελαιοειδών που συνήθως

αναπαριστά τα μακροπρόθεσμα συμβόλαια. Η δεύτερη, και πιο συνηθισμένη φόρμουλα, αφορά στον καθορισμό των τιμών από την ελεύθερη αγορά (gas-to-gas competition) όπου τα διάφορα προϊόντα ανταγωνίζονται μεταξύ τους με βάση τους νόμους προσφοράς-ζήτησης. Σε άλλες περιοχές οι τιμές ρυθμίζονται και μπορούν ακόμα να οριστούν και κάτω από το κόστος, στο κόστος υπηρεσιών ή να καθοριστούν πολιτικά αντικατοπτρίζοντας τις δημόσιες ανάγκες.

Στην Ελλάδα η τιμή του φυσικού αερίου στις περισσότερες ΕΠΑ υπολογίζεται ανα τρίμηνο με βάση τη κυλιόμενη μέση τιμή των πετρελαιοειδών εξαμήνου. Προκύπτει από το δείκτη "FOB Breakeven Price" που δημοσιεύεται στο Platts Oilgram Price Report, Word Crude Oil Prices ο οποίος απεικονίζει το μέσο όρο τιμών Kuwait, Arab Light, Iranian Light, Kirkuk, Murban, Zuetina, Brass Blend, Saharan Blend. Ενδεικτικά αναφέρεται ο τύπος υπολογισμού της τιμής του αερίου Αττικής από το 2010 μέχρι σήμερα προκύπτει από τον τύπο: $Price = 0,34 \cdot FOB + 17 \text{ €/MWh}$ με ελάχιστη τιμή τα 23 €/MWh. Για εφαρμογές συμπαραγωγής προβλέπεται μια έκπτωση 5,5-7,5 €/MWh. Καθώς τα τιμολόγια φυσικού αερίου δεν είναι καθορισμένα και αλλάζουν περιοδικά επηρεαζόμενα από τις γεωπολιτικές εξελίξεις, εισέρχεται ένας επιπλέον παράγοντας ρίσκου που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά τη μελέτη σκοπιμότητας κάθε σχετικής επένδυσης [33]. Οι υψηλές τιμές φυσικού αερίου, ειδικά όταν συνδυάζονται με φτηνή ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, αποτελούν αντικίνητρο για επενδύσεις συμπαραγωγής καθώς το λειτουργικό όφελος δεν επαρκεί για την αποπληρωμή της επένδυσης.

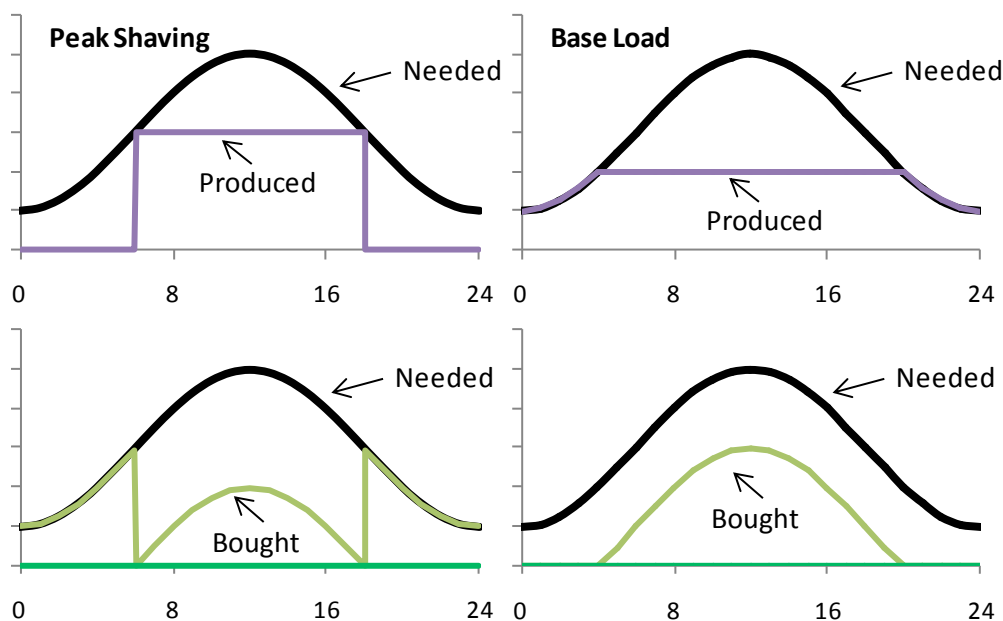
3.4.3 Στρατηγικές λειτουργίας

Η επιλογή του τρόπου—ή όπως λέγεται συχνά της στρατηγικής λειτουργίας—στα συστήματα αποκεντρωμένης παραγωγής θα μπορούσε θεωρητικά να είναι απλή διαδικασία: Το σύστημα πρέπει να λειτουργεί όταν μπορεί να παραχθεί ενέργεια σε μικρότερο κόστος από το κόστος ενέργειας του δικτύου ή από συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Στην πράξη οι στρατηγικές λειτουργίας είναι μέρος του συστήματος ρύθμισης που εξαρτάται από τους εξής παράγοντες: ζήτηση για κάθε είδος ενέργειας, ονομαστική ισχύ κινητήρα, συντελεστής απόδοσης και παράγοντες μετατροπής ενέργειας για όλες τις συσκευές παραγωγής/μετατροπής ενέργειας. Στα συστήματα ΣΗΘ συναντάται συχνά ένας συμβιβασμός μεταξύ της ανάγκης κάλυψης των ηλεκτρικών φορτίων και της αποφυγής παραγωγής και συνεπώς απόρριψης περισσότερης ενέργειας από ό,τι χρειάζεται. Για αυτό, για την ανάλυση τέτοιων συστημάτων πρέπει να αναπτυχθούν στρατηγικές που λαμβάνουν υπόψιν τα εγγενή χαρακτηριστικά τους. Ο έλεγχος της λειτουργίας ολόκληρου του θερμικού συστήματος (σύστημα ΣΗΘ, λε-

θήτων και ψυκτών) γίνεται με ειδικό Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου - Ρύθμισης, το οποίο αντιλαμβάνεται το σύστημα ΣΗΘ ως τον "οδηγό" και προχωρεί στις κατάλληλες ρυθμίσεις, έτσι ώστε η παραγόμενη ενέργεια να ικανοποιεί τη ζήτηση. Ανάλογα με την στρατηγική που ακολουθείται όταν δεν επαρκεί η θερμότητα που παράγεται στο μέγιστο της λειτουργίας της ΜΕΚ, τότε το σύστημα ελέγχου δίνει εντολή εκκίνησης σε έναν λέβητα ή σε άλλη διάταξη παραγωγής ενέργειας τελικής χρήσης.

Στη βιβλιογραφία συναντώνται πέντε βασικοί τρόποι λειτουργίας στους οποίους διακρίνονται οι μονάδες παραγωγής των συστημάτων ΣΗΘ για αυτοπαραγωγούς. Αυτοί λειτουργούν είτε καλύπτοντας ένα σταθερό μέρος της ενέργειας ή ακολουθώντας την εξέλιξη των ηλεκτρικών ή θερμικών φορτίων και συνοψίζονται ως εξής [10, 16, 34]:

1. *Συνεχής λειτουργία*: Το σύστημα λειτουργεί σε προκαθορισμένο χρόνο (βάρδιες), αγνοώντας τη ζήτηση ενέργειας. Αυτή η στρατηγική εφαρμόζεται συνήθως από παραγωγούς που πουλάνε την περίσσεια για συγκεκριμένου τύπου κινητήρες στους οποίους η τεχνολογία δεν τους επιτρέπει σε μερικά φορτία ή από μεγάλους κεντρικούς σταθμούς που πουλάνε όλη την ενέργεια στο δίκτυο [35].
2. *Κάλυψη θερμικών φορτίων*: Το σύστημα ΣΗΘ λειτουργεί για την κάλυψη των θερμικών φορτίων και το έλλειμμα ή περίσσεια ηλεκτρισμού αγοράζεται ή πωλείται αντίστοιχα από/προς το δίκτυο διανομής.
3. *Κάλυψη ηλεκτρικών φορτίων*: το σύστημα καλύπτει πρώτα τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού φορτίου της εγκατάστασης και, αν υπάρχει έλλειμμα θερμότητας, καλύπτεται από ένα βοηθητικό λέβητα. Αν υπάρχει περίσσεια, η θερμότητα αποθηκεύεται, σε περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα, ή αποβάλλεται ανεκμετάλλευτη προς το περιβάλλον. Το τελευταίο μειώνει το συνολικό βαθμό απόδοσης και γενικότερα δεν πρέπει να εφαρμόζεται.
4. *Λειτουργία σε φορτία αιχμής*, η οποία είναι επίσης γνωστή με το όνομα *Peakshaving* ("ξύρισμα αιχμών"): Το σύστημα λειτουργεί για περιορισμένο χρόνο, με σκοπό την κάλυψη προκαθορισμένου ποσού των φορτίων σε ώρες αιχμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα φορτία αιχμής να αγοράζονται από το δίκτυο και ο συντελεστής χρησιμοποίησης βελτιώνεται γεγονός που αντανακλάται σε φτηνότερες οριακές τιμές ενέργειας.
5. *Λειτουργία σε φορτία βάσης*: Το σύστημα ΣΗΘ λειτουργεί για να καλύπτει τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού φορτίου βάσης και του αντίστοιχου θερμικού φορτίου της εγκατάστασης του καταναλωτή (αυτοπαραγωγός). Σε οποιοδήποτε καταστάσεις που μπορεί να υπάρχουν για τη μη επαρκή ικανοποίηση των απαιτήσεων του ηλεκτρικού ή/και θερμικού φορτίου της εγκατάστασης, επιπρόσθετες ποσότητες ηλεκτρικής ισχύος μπο-



Σχήμα 3.12: Στρατηγικές λειτουργίας

ρεί να παρέχονται από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ενώ επιπρόσθετες ποσότητες θερμικής ισχύος μπορεί να παρέχονται από κατάλληλους λέβητες που βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής. Μειώνει αρκετά το συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου και αυξάνει το χρόνο απασχόλησης της μονάδας συμπαραγωγής. Δίνει καλύτερα αποτελέσματα με τιμολόγια που έχουν φτηνή ισχύ και κινητήρες που δεν έχουν καλή δυναμική συμπεριφορά.

Το Σχήμα 3.12 απεικονίζει τις τελευταίες δύο στρατηγικές. Η χρονική περίοδος της ρύθμισης μπορεί να μεταβάλλεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι λίγες ώρες, αναλόγως τη δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα. Αυτές οι μεταβολές γίνονται συνήθως με κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας ή στραγγαλίζοντας την παροχή καυσίμου και πρέπει φυσικά να είναι μέσα στην επιτρεπόμενη περιοχή λειτουργίας του κινητήρα.

Για τους παραγωγούς ενέργειας μια αξιοσημείωτη στρατηγική λειτουργίας που λειτουργεί σε ρυθμιζόμενες (επιδοτούμενες) αγορές και χρησιμοποιείται όταν η τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας προς το δίκτυο διανομής είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή αγοράς είναι η εξής: Το σύστημα ΣΗΘ λειτουργεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος η οποία εγχέεται ολοκληρωτικά στο δίκτυο διανομής, χωρίς να χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του ηλεκτρικού φορτίου των εγκαταστάσεων των καταναλωτών. Η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για την ικανοποίηση του

ηλεκτρικού φορτίου της εγκατάστασης του καταναλωτή παρέχεται από το δίκτυο διανομής διαμέσου διαφορετικής σύνδεσης. Η παραγόμενη θερμική ισχύς του συστήματος ΣΗΘ χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του θερμικού φορτίου της εγκατάστασης του καταναλωτή, ενώ η επιπρόσθετη ισχύς χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των θερμικών φορτίων άλλων καταναλωτών, αν υπάρχουν οι κατάλληλες υποδομές. Συνήθως αφορά μεγάλους κεντρικούς σταθμούς ή εγκαταστάσεις που δεν έχουν απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό και εκμεταλλεύεται αποκλειστικά την εγγυημένη (επιδοτούμενη) τιμή αγοράς. Αυτή η στρατηγική δεν εκμεταλλεύεται το εγγενές λειτουργικό κέρδος από την εξοικονόμηση ενέργειας αλλά το αρμπιτράζ μεταξύ των τιμών αγοράς και πώλησης ενέργειας. Στην Ελλάδα αυτή η στρατηγική εφαρμόστηκε στη μεγάλη κεντρική μονάδα της Πρωτεργία στο "Αλουμίνιο της Ελλάδος" και έχει προκαλέσει ποικίλες αντιδράσεις.

Οι συμβατικές στρατηγικές κάλυψης φορτίων που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς σε εγκαταστάσεις τριπαραγωγής καθώς δεν εκμεταλλεύονται ή σε ορισμένες περιπτώσεις ακυρώνουν τα πλεονεκτήματα αυτών των εγκαταστάσεων. Όταν μελετώνται εγκαταστάσεις τριπαραγωγής, υπάρχει ένας επιπλέον παράγοντας που περιπλέκει την επιλογή στρατηγικής: η περίσσεια θερμότητας μπορεί να μετατραπεί σε ψυκτική ενέργεια, γεγονός που επιτρέπει την ανάπτυξη πιο ευέλικτων στρατηγικών. Με αυτό τον τρόπο οι ψύκτες απορρόφησης μπορούν να μεταβάλλουν το θερμικό και ηλεκτρικό προφίλ ενός κτηρίου «μεταφέροντας» ψυκτική ενέργεια από ένα ηλεκτρικό φορτίο σε ένα θερμικό. Αυτή η μεταφορά μπορεί να είναι πολύ σημαντική για εγκαταστάσεις με μεταβλητή ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια ανάλογα με την ώρα της ημέρας, υψηλές εποχικές απαιτήσεις για ψύξη και υψηλά φορτία ζήτησης.

Αν εφαρμοστούν οι συμβατικές στρατηγικές δεν αξιοποιείται το παραπάνω πλεονέκτημα. Πιο συγκεκριμένα, με τη στρατηγική κάλυψης θερμικών φορτίων, ο κινητήρας θα παράγει μόνο τη θερμότητα που χρειάζεται, αφήνοντας τον ψύκτη απορρόφησης αναξιοποίητο. Στην περίπτωση της κάλυψης συνολικών ηλεκτρικών φορτίων, δηλαδή των ηλεκτρικών φορτίων τελικής χρήσης και των ηλεκτρικών φορτίων για τη λειτουργία του ηλεκτρικού ψύκτη, ο ψύκτης απορρόφησης πάλι μένει αναξιοποίητος καθώς όλα τα ψυκτικά φορτία καλύπτονται από τον ηλεκτρικό ψύκτη. Τέλος, αν ακολουθηθεί η στρατηγική κάλυψης των ηλεκτρικών φορτίων (χωρίς τον ηλεκτρισμό που χρειάζεται για ψύξη), τότε ο ηλεκτρικός ψύκτης δεν λειτουργεί ενώ υπάρχει περίπτωση να λειτουργεί ο κινητήρας μόνο για τη δημιουργία περίσσειας θερμότητας για τη λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης, γεγονός που μπορεί να καταστήσει την λειτουργία του μη αποδοτική. Αυτό το πρόβλημα συναντάται πιο έντονα σε εφαρμογές που έχουν έντονες διακυμάνσεις στο λόγο θερμότητας προς ηλεκτρισμό.

Με βάση τα παραπάνω, εξετάζονται δύο νέες στρατηγικές ειδικά για αυτά τα συστήματα: κάλυψη *ισοδύναμων* ηλεκτρικών ή θερμικών φορτίων. Ως *ισοδύναμα* φορτία ορίζονται τα φορτία που χρειάζονται για να καλύψουν τη ζήτηση θερμότητας/ηλεκτρισμού μαζί με τη θερμότητα/ηλεκτρισμό που χρειάζεται για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων.

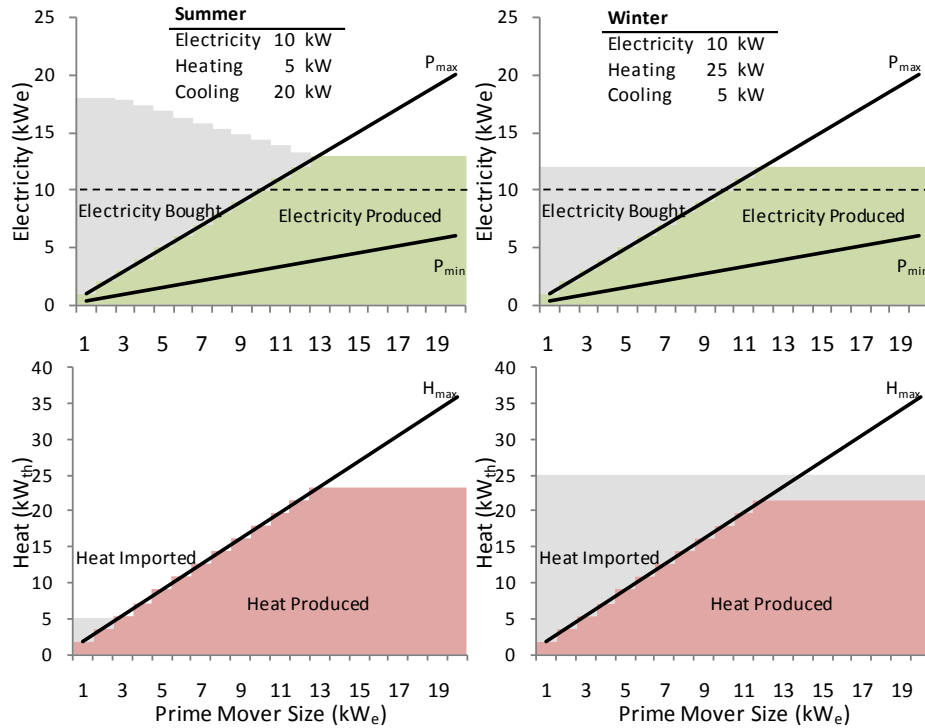
Για να φανεί η σημασία της παραπάνω προσέγγισης χρησιμοποιείται ένας νέος όρος, η *ισοδύναμη ζήτηση ηλεκτρισμού* (El_{eq}). Η *ισοδύναμη ζήτηση ηλεκτρισμού* είναι ο ηλεκτρισμός που χρειάζεται για την κάλυψη της ηλεκτρικής ενέργειας και της ψύξης που δεν θα καλύπτεται από τον ψύκτη απορρόφησης. Η βασική παραδοχή για την δημιουργία αυτού του όρου είναι ότι η ψυκτική ενέργεια παράγεται από τον ψύκτη απορρόφησης μόνο αν υπάρχει περίσσεια θερμότητας. Με άλλα λόγια, δεν επιτρέπεται η χρήση θερμότητας από το βοηθητικό λέβητα για τη λειτουργία του ψύκτη αφού η καταστροφή της εξέργειας για τη δημιουργία ζεστού νερού από φυσικό αέριο αντανakλάται όχι μόνο στην ενεργειακή αποδοτικότητα αλλά και στην οικονομία της μονάδας. Συνεπώς η *ισοδύναμη ζήτηση ηλεκτρισμού* El_{eq} εξαρτάται όχι μόνο από τα φορτία αλλά και από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα—και συγκεκριμένα το μέγεθος του και το λόγο θερμότητας προς ηλεκτρισμό.

Συνεπώς οι ακόλουθες στρατηγικές προτείνονται για τη λειτουργία των εγκαταστάσεων τριπαραγωγής [36]:

1. Κάλυψη *ισοδύναμων ηλεκτρικών φορτίων* (EeF): το σύστημα λειτουργεί με σκοπό να καλύψει τα ηλεκτρικά φορτία και τον ηλεκτρισμό για τον ψύκτη απορρόφησης αφαιρώντας τον ηλεκτρισμό που εξοικονομείται από τη λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης. Θερμική ενέργεια παράγεται μέσω του βοηθητικού λέβητα ή απορρίπτεται (ή αποθηκεύεται, αν είναι δυνατόν) με σκοπό να καλύψει το έλλειμμα ή την περίσσεια αντίστοιχα.
2. Κάλυψη *ισοδύναμων θερμικών φορτίων* (HeF): Το σύστημα λειτουργεί με σκοπό να καλύψει τα θερμικά φορτία και τη θερμότητα που χρειάζεται από τον ψύκτη απορρόφησης για να καλύψει τα ψυκτικά φορτία. Ο ηλεκτρισμός αγοράζεται ή πωλείται στο δίκτυο με σκοπό την κάλυψη του ελλείμματος ή της περισσειας αντίστοιχα.

Ένα παράδειγμα της πρώτης στρατηγικής εμφανίζεται στο Σχήμα 3.13. Έχοντας ως δεδομένο τη ζήτηση των φορτίων και το λόγο θερμότητας προς ηλεκτρισμό, απεικονίζονται η El_{eq} και η θερμική ενέργεια που παράγεται ως συνάρτηση του μεγέθους της μηχανής. Είναι φανερό ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που η ζήτηση για θερμότητα είναι μικρότερη, η El_{eq} μειώνεται καθώς το μέγεθος του κινητήρα μεγαλώνει γιατί η περίσσεια θερμότητας που παράγεται από τον κινητήρα χρησιμοποιείται για ψύξη. Το χειμώνα η ζήτηση θερμότητας είναι σχετικά μεγαλύτερη από τη ψύξη και έτσι η στρατηγική είναι παρόμοια με την

κάλυψη ηλεκτρικών φορτίων καθώς δεν υπάρχει περίσσεια θερμότητας από τον κινητήρα για την τροφοδότηση του ψύκτη απορρόφησης.



Σχήμα 3.13: Παράδειγμα στρατηγικής κάλυψης ισοδύναμων ηλεκτρικών φορτίων

Η στρατηγική λειτουργίας επηρεάζει τόσο τη βιωσιμότητα της επένδυσης όσο και την ενεργειακή αποδοτικότητά της. Οι περιγραφόμενες στρατηγικές είναι συνηθισμένο να αλλάζουν μια ή δυο φορές το χρόνο για να ταιριάζουν καλύτερα στα εποχιακά χαρακτηριστικά των φορτίων.

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογική προσέγγιση

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογική προσέγγιση που προτείνεται για την ανάλυση του συστήματος συμπαραγωγής. Αφού παρουσιαστεί το μαθηματικό πρότυπο ενεργειακών ροών που περιγράφει την υπερδομή, αναφέρεται ο τρόπος ανάλυσης του συστήματος με βασικές επεκτάσεις την αριστοποίηση πολλών στόχων, και την αριστοποίηση με τη θεώρηση αβεδαιοτήτων.

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του σχεδιασμού ενός συστήματος είναι να βρεθούν οι βέλτιστες μεταβλητές (τεχνολογία, μέγεθος και λειτουργικές παράμετροι) που επιλύουν ένα προδιαγεγραμμένο πρόβλημα μεγιστοποιώντας ένα ή περισσότερα αντικειμενικά κριτήρια.

Πιο συγκεκριμένα ο σχεδιασμός συστημάτων τριπαραγωγής ως δράση εξοικονόμησης ενέργειας σκοπεύει στον καθορισμό του βέλτιστου μεγέθους του κινητήρα, του ψύκτη απορρόφησης και των βέλτιστων λειτουργικών παραμέτρων μεγιστοποιώντας έναν οικονομικό, ενεργειακό ή περιβαλλοντικό στόχο. Η συνιστώμενη λύση πρέπει να υπόκειται στους περιορισμούς που ορίζονται από την σχετική νομοθεσία, ενώ είναι πολύ ευαίσθητη στην ενεργειακή πολιτική που εφαρμόζει η εκάστοτε χώρα και σε ευρύτερα γεωπολιτικά γεγονότα που συνήθως ορίζουν τις τιμές ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Το πρόβλημα περιπλέκεται ακόμα περισσότερο αν ληφθεί υπόψιν και ο συμβατικός εξοπλισμός που μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά. Η επίδοση και η βιωσιμότητα μιας επένδυσης τριπαραγωγής εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η μελέτη και η επίδραση κάθε παραμέτρου και η συνεισφορά στην λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ σημαντική για να κατανοηθούν τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας [37].

Είναι φανερό ότι η πολυπλοκότητα ενός τέτοιου συστήματος κάνουν δυσκολότερο τον σχεδιασμό του, δηλαδή την επιλογή του κατάλληλου τύπου και μεγέθους της εγκατάστασης, καθώς και τον καθορισμό του τρόπου λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος. Ο προσε-

χτικός σχεδιασμός και η αξιολόγηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την επένδυση είναι επιβεβλημένος. Με την προσομοίωση των λειτουργικών και οικονομικών χαρακτηριστικών του συστήματος εκτιμάται σε ικανοποιητικό βαθμό η βιωσιμότητα της επένδυσης.

Στην ενότητα αυτή μετά από μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία η οποία αναπτύχθηκε για την μαθηματική προτυποποίηση όλων των φυσικών παραμέτρων όπως περιγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η αριστοποίηση βασισμένη σε οικονομικά κριτήρια από την μεριά του επενδυτή έχει εξεταστεί πολύ αναλυτικά για απλά συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας [10, 11, 35, 38]. Τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη του συστήματος έχουν επίσης συζητηθεί και θεωρηθεί πολύ σημαντικά [4, 39, 40]. Στο πλαίσιο των παραπάνω έχουν γίνει θερμοοικονομικές αναλύσεις που κατηγοριοποιούνται σε τρία επίπεδα: καταμερισμός κόστους, αριστοποίηση κόστους και ανάλυση κόστους [41–44]. Η τρίτη κατηγορία που είναι γνωστή και ως εξεργοοικονομική ανάλυση [45–47] αναλύει και κοστολογεί τις ενεργειακές ροές με βάση την ποιότητα και ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρει. Αυτές οι μέθοδοι είναι πολύτιμες για τον καθορισμό του κόστους κεντρικών εργοστασίων που σκοπεύουν στην πώληση ενέργειας αλλά δεν χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που το οικονομικό όφελος δεν προέρχεται από την πώληση της ενέργειας αλλά από την εξοικονόμηση που προσφέρει ο εξοπλισμός συμπαραγωγής. Πολυκριτηριακές αναλύσεις [48] είναι λιγότερο διαδεδομένες που όμως λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά οφέλη του συστήματος [37, 49] μπορούν να καταλήξουν σε πολύτιμα εργαλεία για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους του εξοπλισμού και των βέλτιστων λειτουργικών παραμέτρων. Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω εργασιών έδειξαν ότι τα συστήματα ΣΗΘ προσφέρουν καλύτερη οικονομική και ενεργειακή απόδοση από ένα συμβατικό σύστημα.

Η τριπαραγωγή έχει ακόμα μεγαλύτερη προοπτική για οικονομική και ενεργειακή εξοικονόμηση λόγω της επιπλέον αξιοποίησης του πρωτογενούς καυσίμου. Σε ένα σύστημα συνδυασμένης παραγωγής τα διαφορετικά είδη ενέργειας είναι αμοιβαία αποκλειόμενα και δεν μπορούν να παραχθούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο [50]. Τα συστήματα τριπαραγωγής όμως, χρειάζονται περισσότερη ανάλυση λόγω του μεγαλύτερου βαθμού ελευθερίας συγκριτικά με απλά συστήματα ΣΗΘ. Η έρευνα σε εμπορικές εφαρμογές τριπαραγωγής μικρής κλίμακας δεν είναι πολύ διαδεδομένη λόγω της μη διαθεσιμότητας προσιτού ψυκτικού απορρόφησης που λειτουργεί με θερμότητα χαμηλής ενθαλπίας. Η πιο συνηθισμένη

μέθοδος ανάλυσης και σχεδιασμού εγκαταστάσεων τριπαραγωγής είναι με πρότυπα (μη) γραμμικού προγραμματισμού [38, 51–56]. Μια θερμοοικονομική ανάλυση, βασισμένη στο οριακό κόστος παραγωγής, χρησιμοποιήθηκε για υπολογισμό του μοναδιαίου κόστους των εσωτερικών ενεργειακών ροών και των τελικών προϊόντων καθώς και για την διερεύνηση της βέλτιστης στρατηγικής λειτουργίας ως συνάρτηση της ενεργειακής ζήτησης των τιμών και των πόρων που καταναλώθηκαν [57]. Εξειδικευμένη ανάλυση σε τεχνολογίες τριπαραγωγής έχει γίνει κυρίως από τους Cardona και Piacentino [4] όπου παρουσίασαν δύο στρατηγικές λειτουργίας που αποσκοπούν στην κάλυψη του μέγιστου συγχρονισμού θερμικής και ψυκτικής ζήτησης. Αυτή η εργασία δεν εξέτασε την οικονομική αποδοτικότητα και την επίδραση των διαφορετικών τιμολογίων ενέργειας. Επόμενες εργασίες των Cardona et al. [37] και των Piacentino et al. [58] συμπεριλαμβάνουν λειτουργικές στρατηγικές προσαρμοσμένες για την τριπαραγωγή στις οποίες τα ενεργειακά κόστη συγκρίνονται σε ωριαία βάση. Οι στρατηγικές αυτού του είδους εφαρμόζονται μόνο με συγκεκριμένες τιμολογιακές δομές (time-of-use) όπου τα ωριαία κόστη μπορούν να υπολογιστούν στιγμιαία και δεν εξαρτώνται από χρεώσεις ισχύος ή την επίδραση του συντελεστή φορτίων.

Συνήθως αυτά τα πρότυπα δεν μπορούν να διατυπώσουν μαθηματικά όλα τα χαρακτηριστικά των τιμολογίων (πχ χρεώσεις μέγιστης ισχύος, διαφορετικές χρεώσεις σε ώρες αιχμής κλπ) και συχνά η θεωρητικά άριστη λύση αναφέρεται σε μη εφαρμόσιμο τρόπο λειτουργίας του συστήματος. Για την επίλυση των προτύπων πρέπει η λειτουργική περιοχή των συστημάτων τριπαραγωγής να είναι κυρτή (convex) και τα κόστη να είναι μια κυρτή συνάρτηση των τριών ειδών ενέργειας [59]. Λόγω της μη κυρτότητας (non-convexity) του χώρου επίλυσης συνήθως καταλήγουν σε λύση που εξαρτάται από το αρχικό σημείο [54]. Η απλοποίηση όμως των προτύπων με την αφαίρεση των μη γραμμικών στοιχείων για την διευκόλυνση των διαδικασιών βελτιστοποίησης του επιλύτη [60] όπως η προτυποποίηση της μερικής απόδοσης, των οικονομιών κλίμακας, της αποθήκευσης ενέργειας και πιο εξειδικευμένων τρόπων τιμολόγησης μειώνουν σημαντικά την ακρίβεια του προτύπου.

Με βάση τα παραπάνω, χαρακτηριστικά των τιμολογίων στρατηγικές που βασίζονται στο ωριαίο spark-spread, δηλαδή στην ωριαία διαφορά ηλεκτρισμού-ΦΑ [55, 58] καθώς δεν ενσωματώνουν τα περίπλοκα τιμολογιακά σχήματα που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια. Ο βέλτιστος σχεδιασμός πρέπει να προσαρμοστεί και να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διαθέσιμα σχέδια τιμολόγησης ηλεκτρισμού σε συνδυασμό με την ευελιξία της μονάδας να λειτουργεί με διαφορετικούς τρόπους.

4.2.1 Υπολογιστικά εργαλεία

Υπάρχουν αρκετά εργαλεία που αναλύουν συστήματα συνδυασμένης παραγωγής στα πλαίσια μελέτη σκοπιμότητας και η εφαρμογή τους, αποτελεσματικότητα τους και επίπεδο πολυπλοκότητας τους διαφέρει. Κάποια είναι ανοιχτού λογισμικού και κάποια διατίθενται στο ίντερνετ δωρεάν κυρίως γιατί έχουν αναπτυχθεί από μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς ή σε ορισμένες περιπτώσεις από κυβερνητικούς οργανισμούς. Οι Connolly et al. [61] έκαναν μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για ενεργειακές μελέτες καλύπτοντας μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, από τα ενεργειακά συστήματα ενός κτηρίου μέχρι τα εθνικά συστήματα. Η μελέτη καταλήγει ότι δεν υπάρχει ένα μοναδικό εργαλείο για την εξέταση ενός συγκεκριμένου συστήματος καθώς αυτά διαφέρουν σημαντικά ως προς τους τομείς που αναφέρονται, τις χρονικές παραμέτρους και της διαθεσιμότητα τους. Παρακάτω αναφέρονται τα εργαλεία που είναι πιο σχετικά με το εξεταζόμενο σύστημα και κρίνεται η επάρκεια τους για την μελέτη του συστήματος αυτού.

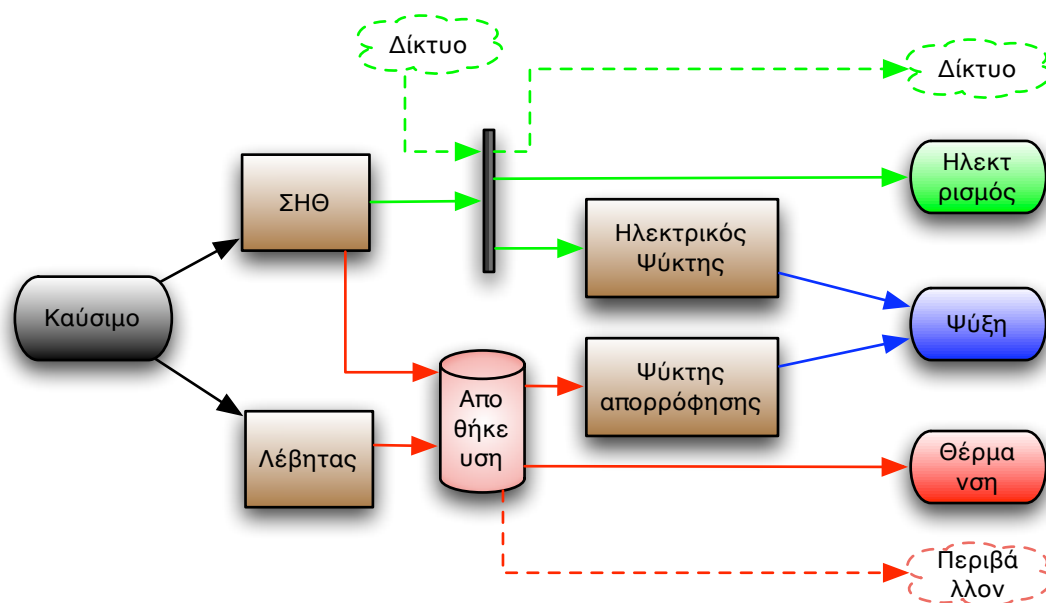
Το BCHP Screening Tool [62] αποτελεί ίσως το πιο πλήρες εργαλείο για την αξιολόγηση της εξοικονόμησης ενέργειας από συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής κυρίως για εμπορικά κτίρια ή συγκροτήματα. Η πρώτη έκδοση αναπτύχθηκε το 2003 από το Oak Ridge National Laboratory των ΗΠΑ. Περιέχει βάσεις δεδομένων για εξοπλισμό HVAC, κινητήρες συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ζήτηση ενέργειας, κλιματικά δεδομένα και τιμολόγια ενεργειακών παροχών. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιείται για την παραμετρική ανάλυση ενός κτηρίου που καλύπτει τις ανάγκες του με συμβατικές παροχές συγκρίνοντας το για διάφορα σενάρια συμπαραγωγής, εναλλάσσοντας τις διαθέσιμες επιλογές που υπάρχουν για την επιλογή μηχανικών συστημάτων και πρόγραμματισμού λειτουργίας.

Το RETscreen [63] είναι ένα εργαλείο βασισμένο σε υπολογιστικά φύλλα που υπολογίζει εκτός των άλλων την οικονομική και περιβαλλοντική επίδοση των συστημάτων ΣΗΘ για διάφορες διατάξεις παροχών θερμότητας ηλεκτρισμού και ψύξης. Η ανάλυση βασίζεται σε μέσες μηνιαίες τιμές της ενεργειακής ζήτησης ενώ δεν συμπεριλαμβάνει περίπλοκα τιμολόγια, αποθήκευση ενέργειας και στρατηγικές λειτουργίας ειδικά για εγκαταστάσεις τριπαραγωγής. Το HOMER [64] είναι ένα εύχρηστο εργαλείο που απλοποιεί την διαδικασία αξιολόγησης των επιλογών σχεδιασμού για συστήματα διανεμημένης παραγωγής είτε πρόκειται για συστήματα που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα είτε ανανεώσιμες πηγές. Αποτελείται από τρεις υπομονάδες, το σύστημα προσομοίωσης σε ωριαία βάση, το σύστημα αριστοποίησης και το σύστημα ανάλυσης ευαισθησίας. Ενώ το πρόγραμμα αυτό έχει πολλές δυνατότητες δεν περιλαμβάνει την επιλογή για την μελέτη ενός συστήματος τριπαραγωγής ή την ανάλυση ευαισθησίας με βάση διαφορετικά χαρακτηριστικά των φορτίων.

Το CHP Capacity Optimizer αναπτύχθηκε από την ORNL το 2005 για το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ [65]. Αναπτύχθηκε ως ένα φύλλο εργασίας του Excel και περιλαμβάνει μια μεθοδολογία για τον καθορισμό του βέλτιστου μεγέθους του εξοπλισμού του κινητήρα και του ψύκτη απορρόφησης. Το άριστο σε όρους μέγιστης παρούσας αξίας της ετήσιας εξοικονόμησης βρίσκεται με ένα μη γραμμικό αλγόριθμο αριστοποίησης και με ωριαία προσομοίωση του συστήματος. Τα δεδομένα που χρειάζονται είναι τα εξής: ωριαία δεδομένα των φορτίων για ένα χρόνο, προδιαγραφές εξοπλισμού, λειτουργικά και κεφαλαιουχικά κόστη του εξοπλισμού, επιτόκιο προεξόφλησης, και ωριαίο πρόγραμμα λειτουργίας. Οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν τα εξής: τη βέλτιστη χωρητικότητα του κινητήρα και του ψύκτη απορρόφησης, ετήσιο κόστος με και χωρίς την επένδυση, και την καθαρά παρούσα αξία για το κύκλο ζωής της επένδυσης. Οι αδυναμίες που εντοπίστηκαν στο εργαλείο αυτό είναι οι εξής: Η αξιολόγηση του κόστους δεν συμπεριλαμβάνει οικονομίες κλίμακας στο ειδικό κόστος εγκατάστασης του κινητήρα (\$/kW) και στον υπολογισμό της μερικής απόδοσης του εξοπλισμού. Επιπλέον δεν δίνεται καμία πληροφορία για το ενεργειακό και περιβαλλοντικό όφελος καθώς απευθύνεται μόνο σε επενδυτές και η ζήτηση της ετήσιας χρονοσειράς ενέργειας το καθιστά δεσμευτικό καθώς αυτά τα δεδομένα σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι διαθέσιμα. Τέλος δεν υπάρχουν πολλές δυνατότητες για ανάλυση ευαισθησίας ή αβεβαιότητας.

Το energyPRO [66] είναι ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό εργαλείο για τεχνο-οικονομικό σχεδιασμό, ανάλυση και αριστοποίηση για συστήματα συμπαραγωγής, τριπαραγωγής καθώς και συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή συνδυασμού αυτών. Αναπτύχθηκε πριν από 20 χρόνια και διατηρείται από την Δανική εταιρεία EMD International A/S. Το εργαλείο αυτό πωλείται προς €2700 το €5600 αναλόγως τον υποσυστημάτων που θα αγοραστούν μαζί του. Μπορεί να εξετάσει πολλούς τύπους καυσίμου και συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για την προσομοίωση μεγάλων κεντρικών σταθμών κυρίως για εφαρμογές τηλεθέρμανσης που έχουν σταθερούς καταναλωτές και συνεπώς φορτία. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα ή 100% κάλυψη της ζήτησης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Μετά από την ανάλυση των εργαλείων και μεθόδων που είναι διαθέσιμα, μπορεί να συναχθεί ότι κάθε εργαλείο έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του. Τα περισσότερα χρησιμοποιούνται στα πλαίσια μελέτης επισκόπησης και εξετάζουν την λειτουργική βιωσιμότητα του. Γενικά διαπιστώθηκε ότι σε ένα εργαλείο ανάλυσης συστημάτων τριπαραγωγής πρέπει να υπάρχουν οπωσδήποτε τα εξής χαρακτηριστικά: ωριαία προσομοίωση των φορτίων, προτυποποίηση μερικής λειτουργίας του εξοπλισμού, χρήση διαφορετικών



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ενεργειακών ροών

στρατηγικών λειτουργίας, τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών καυσίμου με την δυνατότητα διαφορετικών τιμολογήσεων καθώς και τιμολόγησης της ισχύος, επίδραση οικονομικών κλίμακας στο κόστος εξοπλισμού, διαφορετικά κριτήρια αξιολόγησης ανάλογα με τον ενδιαφερόμενο που εξετάζει το σύστημα και ανάλυση ευαισθησίας και ανάλυση αβεβαιότητα σε όλα τα παραπάνω.

Η μεθοδολογία που προτείνεται σε αυτήν την ενότητα για την μελέτη των συστημάτων τριπαραγωγής λαμβάνει υπόψιν τις παραπάνω απαιτήσεις για την δημιουργία ενός ευέλικτου εργαλείου που μπορεί να μελετήσει τα συστήματα τριπαραγωγής ή συμπαραγωγής ανάλογα με τον προσανατολισμό του χρήστη.

4.3 Περιγραφή προτύπου

Οι ενεργειακές ροές του συστήματος που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται ως μια λειτουργική υπερδομή στο Σχήμα 4.1. Ο εξοπλισμός του ενεργειακού συστήματος αναφοράς που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της εγκατάστασης τριπαραγωγής προτυποποιείται με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ένας κινητήρας με μέγιστη ονομαστική ηλεκτρική ισχύ (P_{max}) παράγει ηλεκτρισμό (EI^{CHP}) και απορρίπτει θερμική ενέργεια (Th^{CHP}) καταναλώνοντας καύσιμο (F^{CHP}).

- Ένας βοηθητικός λέβητας που παράγει θερμότητα (Th^{Boiler}) όποτε χρειαστεί. Το καύσιμο (F^{Boiler}) τροφοδοτείται στον λέβητα και μετατρέπεται σε χρήσιμη θερμική ενέργεια με απόδοση (η^{Boiler}).
- Ένας ηλεκτρικός ψύκτης με γνωστό συντελεστή λειτουργίας $COP^{E.Chiller}$ και ονομαστική ψυκτική ισχύ (EC_{max}), που τροφοδοτείται με ηλεκτρισμό ($El^{E.Chiller}$) και παράγει ψυκτική ενέργεια ($Co^{E.Chiller}$).
- Ένα ψύκτη απορρόφησης με γνωστό $COP^{A.Chiller}$ και ονομαστική ψυκτική ισχύ (AC_{max}), που τροφοδοτείται με θερμική ενέργεια ($Th^{A.Chiller}$) και παράγει ψυκτική ενέργεια ($Co^{A.Chiller}$).
- Ένα δοχείο αδρανείας με ορισμένη θερμοχωρητικότητα (mC_p). Η θερμότητα απορρίπτεται (Th^{Waste}) αν το δοχείο δε μπορεί να αποθηκεύσει παραπάνω θερμότητα.
- Το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρισμού που πουλάει ($El^{GridOut}$) ή αγοράζει (El^{GridIn}) ηλεκτρισμό.

Το ενεργειακό σύστημα περιγράφεται με ένα ωριαίο μαθηματικό πρότυπο. Ο χρονικός ορίζοντας όλων των υπολογισμών είναι ένας χρόνος ($t = 1..8760$). Οι φυσικοί περιορισμοί των ηλεκτρικών, θερμικών και ψυκτικών ισοζυγίων ενέργειας που περιγράφουν την υπερδομή του Σχήματος 4.1 για κάθε ώρα (t) διατυπώνονται ως εξής:

$$El_t^{CHP} + El_t^{GridIn} - El_t^{EC} - El_t^{EndUse} - El_t^{GridOut} = 0 \quad (4.1)$$

$$Th_t^{CHP} + Th_t^{Boiler} - Th_t^{AC} - Th_t^{EndUse} - Th_t^{Waste} = mC_p(T_t - T_{t+1}) \quad (4.2)$$

$$Co_t^{AC} + Co_t^{EC} - Co_t^{EndUse} = 0 \quad (4.3)$$

όπου El , Th , Co (kW) είναι η ηλεκτρική, θερμική και ψυκτική ενέργεια που παράγεται ή καταναλώνεται ($EndUse$) αντίστοιχα. Ο εκθέτης υποδεικνύει την συσκευή όπου η ενέργεια παράγεται ή καταναλώνεται. Μια βασική παραδοχή είναι ότι η ποιότητα που παράγει ο κινητήρας είναι πάντοτε η επιθυμητή. Αυτό ισχύει στα πλαίσια των κτιριακών αναγκών όπου οι βασικές ανάγκες τους περιορίζονται σε ζεστό νερό χρήσης και θέρμανση χώρων όπου μπορεί να γίνει με θερμότητα χαμηλής ποιότητας που παράγεται από τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας δύο βαθμίδων όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενο Κεφάλαιο. Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης (4.2) αναπαριστά την συσσώρευση θερμότητας στο δοχείο αδρανείας (ή στις σωληνώσεις του κτηρίου) έχοντας θερμοχωρητικότητα mC_p . Αυτή η εξίσωση οιονεί-μόνιμης κατάστασης μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια καθώς η ακρίβεια του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας σε ωριαίο βήμα είναι ικανοποιητική στα πλαίσια αυτής της διατριβής.

Ο κινητήρας δεν λειτουργεί πάντα στην ονομαστική του ισχύ, γεγονός που συμβαίνει κυρίως όταν λειτουργεί σε στρατηγικές κάλυψης φορτίων. Η ηλεκτρική απόδοση του κινητήρα και συνεπώς η θερμότητα που απορρίπτεται εξαρτάται έντονα από τα μερικά φορτία όπως εκφράζονται από τον συντελεστή φόρτισης του (LF). Ο τελευταίος ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ενέργειας που παράγεται σε δεδομένη ώρα προς την ονομαστική ισχύ. Στη βιβλιογραφία συναντώνται πολυωνυμικές εμπειρικές σχέσεις που προκύπτουν από προσαρμογή σε δεδομένα πραγματικής λειτουργίας [67]. Άλλες προσεγγίσεις υποθέτουν ότι το ποσό του καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή δεδομένης ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται μέσω μιας γραμμικής σχέσης γνωστής και ως καμπύλη καυσίμου [64]. Η τελευταία παραδοχή χρησιμοποιείται και στη παρούσα διατριβή για την περιγραφή της ηλεκτρικής απόδοσης των μερικών φορτίων ως συνάρτηση του συντελεστή χρησιμοποίησης του κινητήρα.

Η ακόλουθη εξίσωση δίνει την κατανάλωση του κινητήρα ως συνάρτηση της ηλεκτρικής της παραγωγής.

$$F_t = a \cdot P_{max} + b \cdot El_t \quad (4.4)$$

όπου a (μονάδα/hr/kW) η αποτέμνουσα και b (μονάδα/hr/kW) η κλίση της καμπύλης. Για μονάδες συμπαραγωγής στο στάδιο κατασκευής, οπότε δεν έχουν συγκεντρωθεί ακόμη επαρκή μετρητικά δεδομένα για να γίνει η προσαρμογή σε πραγματικά δεδομένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία από τον κατασκευαστή της μονάδας συμπαραγωγής ή μεγέθη που υπολογίζονται με τη βοήθεια μοντέλου προσομοίωσης της συγκεκριμένης μονάδας. Συνεπώς η ηλεκτρική απόδοση βρίσκεται από την σχέση:

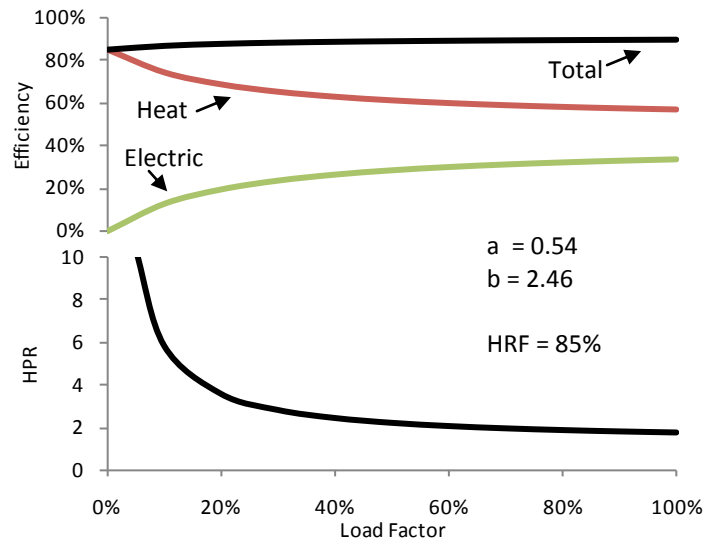
$$\eta_{el,t}^{CHP} = \frac{El_t^{CHP}}{F_t^{CHP}} = \frac{El_t^{CHP}}{a \cdot P + b \cdot El_t} \quad (4.5)$$

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό του συντελεστή χρησιμοποίησης η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται με την παρακάτω εξίσωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον παραγόμενο ηλεκτρισμό ανα πάσα χρονική στιγμή ως εξής:

$$\eta_{El,t}^{CHP}(LF_t) = \frac{FF_t}{a + b \cdot LF_t} \quad (4.6)$$

$$El_t^{CHP} = \eta_{El,t}^{CHP}(LF_t) \cdot F_t^{CHP} \quad (4.7)$$

Η χημική ενέργεια του καυσίμου που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό απορρίπτεται ως θερμότητα. Στη ΣΗΘ η ανακτώμενη θερμότητα εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα του



Σχήμα 4.2: Τυπική καμπύλη απόδοσης μιας μηχανής εσωτερικής καύσης

εξοπλισμού ανάκτησης θερμότητας μέσω της:

$$\eta_{Th,t}^{CHP} = HRF \cdot (1 - \eta_{El,t}^{CHP}) = \frac{Th_t^{CHP}}{F_t^{CHP}} \quad (4.8)$$

όπου HRF είναι ο συντελεστής ανάκτησης θερμότητας. από τις εξισώσεις (4.6), (4.7),(4.8) συνεπάγεται ότι, ο λόγος θέρμανσης προς ηλεκτρισμό (HPR) του κινητήρα είναι επίσης συνάρτηση του συντελεστή χρησιμοποίησης αφού ισχύει:

$$HPR_t = \frac{\eta_{Th,t}^{CHP}}{\eta_{El,t}^{CHP}} = HRF \cdot \frac{a + b \cdot LF_t - LF_t}{LF_t} \quad (4.9)$$

Η συμπεριφορά κάθε κινητήρα ΣΗΘ μπορεί να οριστεί μονοσήμαντα με τα a, b, HRF . Το Σχήμα 4.2 απεικονίζει μια τυπική καμπύλη απόδοσης για μια μηχανή εσωτερικής καύσης συνδεδεμένη με μια τυπική διάταξη ανάκτησης θερμότητας. Συνήθως οι ΜΕΚ με αυτή τη συμπεριφορά λειτουργούν ικανοποιητικά όταν ο LF είναι πάνω από 30%. Η μετατροπή του καυσίμου σε θερμότητα στον βοηθητικό λέβητα, η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ψυκτική στον ηλεκτρικό ψύκτη, και η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ψυκτική στον ψύκτη απορρόφησης ορίζεται ως εξής:

$$Th_t^{Boiler} = \eta^{Boiler} F_t^{Boiler} \quad (4.10)$$

$$Co_t^{EC} = COP^{EC} El_t^{EC} \quad (4.11)$$

$$Co_t^{AC} = COP^{AC} Th_t^{AC} \quad (4.12)$$

όπου η^{Boiler} είναι η απόδοση του λέβητα και COP^{EC}, COP^{AC} είναι οι συντελεστές συμπεριφοράς του ηλεκτρικού ψύκτη και του ψύκτη απορρόφησης αντίστοιχα. Οι περιορισμοί χωρητικότητας ορίζονται με τις ακόλουθες ανισότητες:

$$El_t^{CHP} \leq P \quad (4.13)$$

$$Co_t^{AC} \leq A \quad (4.14)$$

$$Co_t^{EC} \leq E \quad (4.15)$$

$$Th_t^{Boiler} \leq B \quad (4.16)$$

όπου P είναι η ηλεκτρική ονομαστική ισχύς του κινητήρα, A η ονομαστική ψυκτική ισχύς του ψύκτη απορρόφησης, E η ονομαστική ψυκτική ισχύς του ηλεκτρικού ψύκτη και B η ονομαστική θερμική ισχύς του λέβητα. Οι στρατηγικές λειτουργίας ορίζουν την παραγωγή ενέργειας μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$El_t^{CHP} \geq \begin{cases} P & \text{CO} \\ El_t^{EndUse} - \min_t El_t^{EndUse} & \text{PS} \\ El_t^{EndUse} + \frac{Co_t^{EC}}{COP^{EC}} & \text{Ee F} \\ \frac{Th_t^{EndUse}}{HPR_t} + \frac{\min\{Co_t^{EndUse}, A\}}{COP^{AC} HPR_t} & \text{He F} \end{cases} \quad (4.17)$$

4.3.1 Οικονομικό πρότυπο

Η οικονομική αριστοποίηση ως μέρος της μελέτης σκοπιμότητας μιας μονάδας συμπαραγωγής γίνεται συνήθως με την εξέταση ενός οικονομικού κριτηρίου [68] για να εξασφαλίσει την βιωσιμότητα της επένδυσης.

Σε αντίθεση με κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας τα οικονομικά μεγέθη που σχετίζονται με την βιωσιμότητα της επένδυσης δεν αφορούν την πώληση ενέργειας στην αγορά αλλά το λειτουργικό κέρδος που προέρχεται από την εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Το οικονομικό πρότυπο περιλαμβάνει τα κεφαλαιουχικά κόστη, τα λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης τα οποία σε συνδυασμό με τεχνικό πρότυπο θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της οικονομικής συμπεριφοράς. Τα λειτουργικά κόστη που σχετίζονται με την επένδυση ενός συστήματος τριπαραγωγής αποτελούνται από το κόστος συντήρησης και λειτουργίας, το κόστος παροχής καυσίμου στον

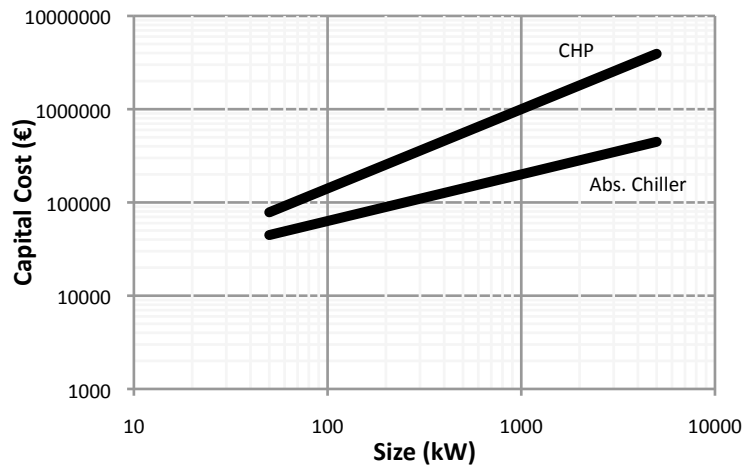
κινητήρα και στον βοηθητικό λέβητα καθώς και το κόστος αγορά ηλεκτρισμού αν χρειαστεί. Το κόστος ηλεκτρισμού υπολογίζεται σε μηνιαία βάση ($k = 1..12$) και μετά αθροίζεται ανά έτος, καθώς οι χρεώσεις μέγιστης ζήτησης εφαρμόζονται άνα μήνα. Η περίσσεια ηλεκτρισμού που εξάγεται στο δίκτυο μπορεί να ληφθεί επίσης υπόψιν, αν ο καταναλωτής δεν είναι αυτοπαραγωγός, δηλαδή αν επιτρέπεται να πουλήσει. Το κόστος της εργασίας, των ανταλλακτικών και των άλλων εξαρτημάτων που απαιτούνται για την ετήσια συντήρηση του συστήματος ΣΗΘ, προστίθεται στο λειτουργικό κόστος. Η εξίσωση (4.18) υπολογίζει το ετήσιο λειτουργικό κόστος (AOC) μέσω της:

$$\begin{aligned}
AOC = & C_{om} \cdot \sum_{t=1}^{8760} El_t^{CHP} \\
& + \sum_{t=1}^{8760} C^F \cdot (F_t^{Boiler} + F_t^{CHP}) \\
& + \sum_{k=1}^{12} \left(C_{vol}^{El,GridIn} \cdot \sum_{t=1st \text{ hour of } k}^{last \text{ hour of } k} El_t^{GridIn} + C_{max}^{El,GridIn} \cdot \max_{t=1st \text{ hour of } k}^{last \text{ hour of } k} El_t^{GridIn} \right) \quad (4.18) \\
& - \sum_{t=1}^{8760} C^{El,GridOut} El_t^{GridOut} \\
& + \sum_{t=1}^{8760} C^{Th,Waste} Th_t^{Waste}
\end{aligned}$$

όπου C^F είναι το κόστος καυσίμου, $C_{vol}^{El,GridIn}$ και $C_{max}^{El,GridIn}$ οι χρεώσεις ηλεκτρισμού ενέργειας και ισχύος που αγοράζεται από το δίκτυο, $C^{El,GridOut}$ οι χρεώσεις ηλεκτρισμού που πωλείται στο δίκτυο και $C^{Th,Waste}$ το κόστος απόρριψης της θερμότητας στο περιβάλλον π.χ. το κόστος λειτουργίας ενός πύργου ψύξης (€/kWh). Οι παραπάνω παράμετροι του κόστους εξαρτώνται από το τιμολόγιο που εφαρμόζεται. Ανάλογα με το είδος του παραγωγού υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη ποσότητα που μπορεί να εξάγει ο καθένας.

Το ετήσιο λειτουργικό κέρδος της επένδυσης (AOP) υπολογίζεται αφαιρώντας το κόστος AOC μετά την επένδυση (AOC^{CHP}) από το κόστος AOC πριν την επένδυση (AOC^{SP}), δηλαδή το κόστος που προκύπτει επιλύοντας το περιγραφόμενο πρότυπο για $P = A = 0kW$. (Εξ. (4.19)).

Το συνολικό κόστος επένδυσης είναι το άθροισμα της αγοράς του συστήματος ΣΗΘ ή τριπαραγωγής, της σύνδεσης με τα δίκτυα παροχής καυσίμου και ηλεκτρικής ενέργειας, των φίλτρων στο τμήμα καυσαερίων, των αγωγών, καλωδίων, συστημάτων ελέγχου και, τέλος, όλων των απαιτούμενων μηχανολογικών και περιβαλλοντικών μελετών. Η Εξίσωση (4.20) υπολογίζει το κεφαλαιουχικό κόστος το οποίο είναι συνάρτηση της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα και του ψύκτη απορρόφησης. Ο εκθέτης αναπαριστά τις οικονομίες κλίμακας,



Σχήμα 4.3: Τυπικές καμπύλες κόστους μια ΜΕΚ και ενός ψύκτη απορρόφησης

που είναι μικρότερες για τον κινητήρα, καθώς έχουν μικρότερη επίδραση σε πολύπλοκους εξοπλισμούς όπως ο κινητήρας [69]. Το Σχήμα. 4.3 απεικονίζει τυπικές καμπύλες κόστους σε λογαριθμικούς άξονες [10].

$$AOP = AOC^{SP} - AOC^{CCHP} \quad (4.19)$$

$$CapCost = C_{CHP}P^{n_1} + C_{ACA}A^{n_2} \quad (4.20)$$

$$ROI\% = \frac{AOP}{CapitalCost} \quad (4.21)$$

Συνήθως ως αποτέλεσμα της οικονομικής ανάλυσης λαμβάνεται η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης, η καθαρή παρούσα αξία ή ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης. Όλα τα παραπάνω, επιτρέπουν να ληφθεί απόφαση από τους μελετητές και τον επενδυτή, σχετικά με τη βιωσιμότητα του επιλεγμένου συστήματος ΣΗΘ. Στη παρούσα διατριβή η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται με κριτήριο την καθαρή παρούσα αξία (*NPV*), που συνήθως προτείνεται έναντι άλλων μεθόδων για αμοιβαία αποκλειόμενες επενδύσεις (δηλαδή όταν συγκρίνεται μόνο ένας τύπος επένδυσης) γιατί δίνει πιο αντικειμενικά αποτελέσματα [68, 70]. Καθαρή παρούσα αξία ορίζεται ως το συνολικό καθαρό όφελος μιας επένδυσης που προκύπτει ως διαφορά μεταξύ του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της επένδυσης. Όλα τα ποσά εκφράζονται σε παρούσα αξία, ανηγμένη συνήθως στην αρχή του πρώτου έτους λειτουργίας του συστήματος. Η μέθοδος *NPV* μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς για τη διαστασιολόγηση επενδύσεων που μειώνουν το λειτουργικό κόστος. Σε αυτή τη περίπτωση, η καθαρή παρούσα αξία προσδιορίζεται από τη

σχέση:

$$NPV = -CapCost + \sum_{L=1}^N \frac{AOP}{(1+i)^L} \quad (4.22)$$

όπου N είναι ο αναμενόμενος χρόνος ζωής και i το επιτόκιο προεξόφλησης.

4.3.2 Κριτήριο ενεργειακής εξοικονόμησης

Τα ανωτέρω κριτήρια εξετάζουν μια εγκατάσταση τριπαραγωγής ως επένδυση δηλαδή από την οικονομική πλευρά. Για την αξιολόγηση του συγκριτικού πλεονεκτήματος της ΣΗΘ και την αξιολόγηση της νέας εγκατάστασης από ενεργειακή άποψη ορίζονται τα εξής δύο αντικειμενικά κριτήρια: Συνολική απόδοση (η_{CHP}) και εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας ($PESR$). Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 2004/8 [13] μια εγκατάσταση συμπαραγωγής θεωρείται υψηλής απόδοσης όταν η συνολική απόδοση είναι πάνω από 75%–80% (ανάλογα με τον τύπο) και όταν ο δείκτης εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας είναι πάνω από 10% για μεγάλα συστήματα (μεγαλύτερα από $1MW_e$) ή θετικός για μικρότερα. Ενώ αυτοί οι δείκτες περιγράφουν την ενεργειακή απόδοση και το όφελος μια εγκατάστασης ΣΗΘ, δε μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς σε μια εγκατάσταση τριπαραγωγής όπως η ανωτέρω, γιατί η εξοικονόμηση του ψύκτη απορρόφησης δεν υπολογίζεται. Οι Chicco και Mancarella [40] προτείνουν ένα νέο γενικευμένο δείκτη για εγκαταστάσεις τριπαραγωγής που λαμβάνει υπόψη την ψυκτική ενέργεια που παράγεται από την απορριπτόμενη θερμότητα του κινητήρα ΣΗΘ. Ο δείκτης αυτός βασίζεται στη σύγκριση με τις τεχνολογίες χωριστής παραγωγής και υπολογίζεται σε ετήσια βάση με βάση την εξίσωση (4.24).

$$\eta_{CHP} = \eta_{el} + \eta_{th} = \frac{El^{CHP}}{F^{CHP}} + \frac{Th^{CHP}}{F^{CHP}} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} PESR &= \frac{\sum_t F_t^{SP} - \sum_t F_t^{CHP}}{\sum_t F_t^{SP}} \\ &= 1 - \frac{\sum_t F_t^{CHP}}{\frac{\sum_t El_t^{CHP}}{\eta_{el}^{SP}} + \frac{\sum_t Th_t^{CHP}}{\eta_{th}^{SP}} + \frac{\sum_t Co_t^{CHP}}{\eta_{el}^{SP} COPE_{Chiller}}} \end{aligned} \quad (4.24)$$

4.3.3 Περιβαλλοντικό κριτήριο

Το βασικότερο πλεονέκτημα της ΣΗΘ για το περιβάλλον είναι η μείωση των εκπομπών ρύπων σε σχέση με τη συμβατική ξεχωριστή παραγωγή. Τα κυριότερα αέρια από τη χρήση ΣΗΘ με τεχνολογία ΜΕΚ είναι τα εξής:

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2): Το CO_2 αποτελεί τη μεγαλύτερη συστατική των προϊόντων

της καύσης και η αύξηση των συγκεντρώσεων του στην ατμόσφαιρα αποτελεί τη βασική αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου και των κινδύνων από την κλιματική αλλαγή. Η παραγωγή του είναι ανάλογη προς την ποσότητα του καυσίμου που καίγεται και έτσι η υψηλής αποδοτικότητας ΣΗΘ οδηγεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών σε σχέση με την απλή ΣΗΘ. Η εκπομπή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση του καυσίμου: π.χ. η καύση λιθάνθρακα ή λιγνίτη παράγει σημαντικά υψηλότερες ποσότητες από αυτές που παράγει η καύση φυσικού αερίου.

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO): Το CO είναι ένα δηλητηριώδες αέριο που παράγεται μέσω της ατελούς καύσης και μπορεί να περιοριστεί σε αμελητέα επίπεδα εάν υπάρξει ικανοποιητικός έλεγχος του αέρα και του καυσίμου κατά τη διάρκεια της καύσης.
- Διοξείδιο του θείου (SO₂): Το SO₂ είναι ένα δηλητηριώδες αέριο που παράγεται μόνο κατά την καύση του θείου. Θείο περιέχεται σε καύσιμα όπως το πετρέλαιο ο αέρας και το βιοαέριο. Το SO₂ με την παρουσία υγρασίας μετατρέπεται σε θειικό οξύ (H₂SO₄) το οποίο, εάν συμπυκνωθεί προκαλεί τη διάβρωση των μετάλλων που χρησιμοποιούνται στην ανάκτηση της θερμότητας ή στα συστήματα εξάτμισης. Επιπλέον είναι η αιτία της όξινης βροχής με τις γνωστές καταστρεπτικές συνέπειες. Σε εγκαταστάσεις ΣΗΘ οι εκπομπές SO₂ δεν μπορούν να μειωθούν με τη λήψη μέτρων που αφορούν στο σχεδιασμό των κινητήρων, μπορούν όμως να εξαληφθούν από τα καυσαέρια, μέσω εγκατάστασης αποθείωσης.
- Οξείδια του αζώτου (NO_x) Το NO_x είναι ένα μίγμα των οξειδίων του αζώτου που παράγονται από την καύση οποιουδήποτε καυσίμου στον αέρα. Η σύστασή του επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες της καύσης η θερμοκρασία. ο χρόνος παραμονής και η αναλογία «αέρα/ καυσίμου». Στην ατμόσφαιρα το NO, υπόκειται σε διάφορες χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στο σχηματισμό του αζώτου και της αιθαλομίχλης. Συμβάλλει επίσης στη δημιουργία της όξινης βροχής. Το NO θεωρείται ένας από τους μεγαλύτερους αστικούς ρύπους έχοντας ως βασική πηγή την κυκλοφορία των οχημάτων και τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Άκαυστοι υδρογονάνθρακες: Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες παράγονται σε μεγάλο βαθμό από παλινδρομικές μηχανές. Πρόκειται για μια από τις σημαντικότερες αιτίες δημιουργίας του νέφους και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αντίθετα, ο σχηματισμός των NO_x και άκαυστων υδρογονανθράκων σχετίζεται άμεσα με τις συνθήκες καύσης, και επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία το λόγο «αερα/καυσίμου» και τον χρόνο παραμονής. Οι εκπομπές των NO_x και CO μπορούν να μειωθούν με προσεκτικό σχεδιασμό και έλεγχο των χαρακτηριστικών καύσης Προσαρμόζοντας τις συνθή-

Πίνακας 4.1: Συντελεστές εκπομπών στο ελληνικό σύστημα (gr/kWh καταναλωθείσας ενέργειας)

	CO ₂	SO ₂	CO	NO _x	HC	PM
Ηλεκτρισμός ¹	850	15.5	0.18	1.2	0.05	0.8
Φυσικό Αέριο (ΚΘΔ)	196.3	0	0.024	0.152	0.006	0.007

κες καύσης για την επίτευξη χαμηλών εκπομπών τίθεται σε κίνδυνο η βέλτιστη αποδοτικότητα του συστήματος. Η χρησιμοποίηση των καταλυτικών μετατροπέων μπορεί να θεωρηθεί ως η βέλτιστη λύση.

Οι παραπάνω εκπομπές ρύπων από τις ΣΗΘ είναι σημαντικές όταν αυτές βρίσκονται σε ήδη βεβαρυσμένες περιοχές από ρύπους. Παρόλα αυτά συγκρίνοντας τις με τις εκπομπές που θα υπήρχαν και τοπικά και γενικά στους χώρους παραγωγής ενέργειας θα αποδειχθούν και τα περιβαλλοντικά οφέλη από τις εγκαταστάσεις τέτοιων μονάδων [17].

Οι εκπομπές υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας έναν πίνακα με συντελεστές εκπομπών (δηλαδή εκπεμπόμενα gr ανά καταναλωθείσα kWh) με ένα πίνακα ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας για ηλεκτρισμό και καύσιμα (π.χ. φυσικό αέριο).

$$Emissions = \left[\sum_t (F_t^{Boiler} + F_t^{CHP}) \quad \sum_t El_t^{GridIn} \right] \cdot \begin{bmatrix} CO_2^F & SO_2^F & CO^F & NO_x^F & HC^F & PM^F \\ CO_2^{El} & SO_2^{El} & CO^{El} & NO_x^{El} & HC^{El} & PM^{El} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

όπου CO₂, SO₂, CO, NO_x, HC, PM είναι οι συντελεστές εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου, μονοξειδίου του άνθρακα, νιτρικών οξειδίων, άκαυστων υδρογονανθράκων και στέρεων αιωρούμενων σωματιδίων αντίστοιχα. Οι συντελεστές εκπομπών για το ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής καθώς και οι εκπομπές από τη καύση του φυσικού αερίου παρουσιάζονται στο Πίνακα 4.1 [71, 72].

Ο πίνακας $Emissions^{CCHP}$ (1 × 6) αποτελείται από τις εκπομπές που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από τη προτεινόμενη εγκατάσταση. Αφαιρώντας τον εξοπλισμό τριπαραγωγής ($P = A = 0kW$) και επιλύοντας το πρότυπο για άλλη μια φορά, λαμβάνεται ο πίνακας εκπομπών της υφιστάμενης κατάστασης ($Emissions^{SP}$). Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες στοιχεία ανά στοιχείο, βρίσκεται η σχετική μείωση των εκπομπών που προκαλείται από την εγκατάσταση της νέας εγκατάστασης. Με βάση τα παραπάνω προτείνεται ως περιβαλλοντικό

¹ Οι συντελεστές ηλεκτρισμού αναφέρονται στην ενέργεια τελικής χρήσης που παράχθηκε από το ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής. Οι συντελεστές φυσικού αερίου βασίζονται στην ΚΘΔ και αναφέρονται σε kWh πρωτογενούς καυσίμου.

κριτήριο, ο μέσος όρος της σχετικής μείωσης των εκπομπών (ERR) σύμφωνα με την (4.26).

$$ERR = mean \left(1 - \frac{Emissions^{CCHP}}{Emissions^{SP}} \right) \quad (4.26)$$

4.4 Αριστοποίηση προτύπου

4.4.1 Πολυστοχική αριστοποίηση

Η αυξανόμενη ανάγκη για πιο αποδοτικά συστήματα που είναι οικονομικά ελκυστικά και φιλικά στο περιβάλλον απαιτούν την ανάπτυξη νέων κριτηρίων τα οποία ορίζουν νέους κανόνες σχεδιασμού. Τα συστήματα τριπαραγωγής συνήθως μελετώνται με βάση οικονομικά, ενεργειακά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Αυτά τα κριτήρια μπορούν διατυπωθούν με συγκεκριμένους δείκτες που συγκρίνουν τα οφέλη της τριπαραγωγής με την παραγωγή ενέργειας με συμβατικά μέσα.

Είναι φανερό ότι ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος σχετίζεται με αντικρουόμενους στόχους. Συνήθως σε τέτοιου είδους προβλήματα, δεν υπάρχει μια μοναδική λύση που να αριστοποιεί όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Μια λύση μπορεί να καλύπτει έναν στόχο αλλά να έχει πολύ κακή επίδοση σε άλλον. Η χρήση μιας μονοκριτηριακής αντικειμενικής συνάρτησης, που συνήθως αποτελεί τον σταθμισμένο μέσο πολλών αντικειμενικών κριτηρίων, δεν διευκολύνει την κρίση του λήπτη απόφασης καθώς είναι συνήθως πιο δύσκολο να συσχετίσει και να καθορίσει την σημαντικότητα, στόχων διαφορετικής φύσης. Η παρουσίαση μίας μόνο άριστης λύσης δεν είναι επαρκής καθώς οι συμβιβασμοί μεταξύ των διαφορετικών άριστων είναι σημαντικοί. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο ορισμένες άριστες λύσεις μπορεί να μην εξερευνηθούν ποτέ καθώς δεν ήταν διατυπωμένες στο πρόβλημα [73]. Γι' αυτό τον λόγο, απαιτείται η ανάπτυξη διαφορετικών εναλλακτικών σεναρίων που, έτσι ώστε να επιλεγεί τελικά μια από αυτές που θα καλύπτει σε μεγαλύτερο βαθμό τα παραπάνω κριτήρια.

Με τη χρήση πολυστοχικής αριστοποίησης λαμβάνεται ένα σύνολο άριστων λύσεων, επίσης γνωστό ως άριστες κατά Pareto λύσεις, ή μη κυριαρχούσες λύσεις. Σε αυτές τις λύσεις, δεν γίνεται να βελτιωθεί ένας αντικειμενικός στόχος χωρίς να θυσιαστεί τουλάχιστον ένας από τους άλλους. Συνεπώς, η άριστη λύση δεν είναι ένας συγκεκριμένος δείκτης αλλά ένα σύνολο αποδοτικών λύσεων όπου μπορούν να αξιολογηθούν όλοι οι συμβιβασμοί μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων δίνοντας μεγάλη ευελιξία στον λήπτη απόφασης. Το σετ των βέλτιστων συμβιβαστικών λύσεων, συγκεκριμένων αντικρουόμενων στόχων είναι πολύτιμο για τους λήπτες απόφασης για την επιλογή της κατάλληλης λύσης που ταιριάζει στις ανάγκες

του, μέσα από ένα σύνολο αμοιβαία αποκλειόμενων άριστων εναλλακτικών λύσεων.

Με βάση τα παραπάνω, ο σχεδιασμός συστημάτων τριπαραγωγής είναι ένα πολύπλοκο πολυστοχικό πρόβλημα που περιέχει μια οικονομική (καθαρή παρούσα αξία), μια ενεργειακή (εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας), και μια περιβαλλοντική (μείωση εκπομπών) αντικειμενική συνάρτηση, καθώς και φυσικούς, χωρητικούς και ρυθμιστικούς περιορισμούς που προέρχονται από τις προδιαγραφές του φυσικού προβλήματος και τις απαιτήσεις του λήπτη απόφασης. Με βάση τα παραπάνω το πρόβλημα του σχεδιασμού μπορεί πλέον να διατυπωθεί ως εξής:

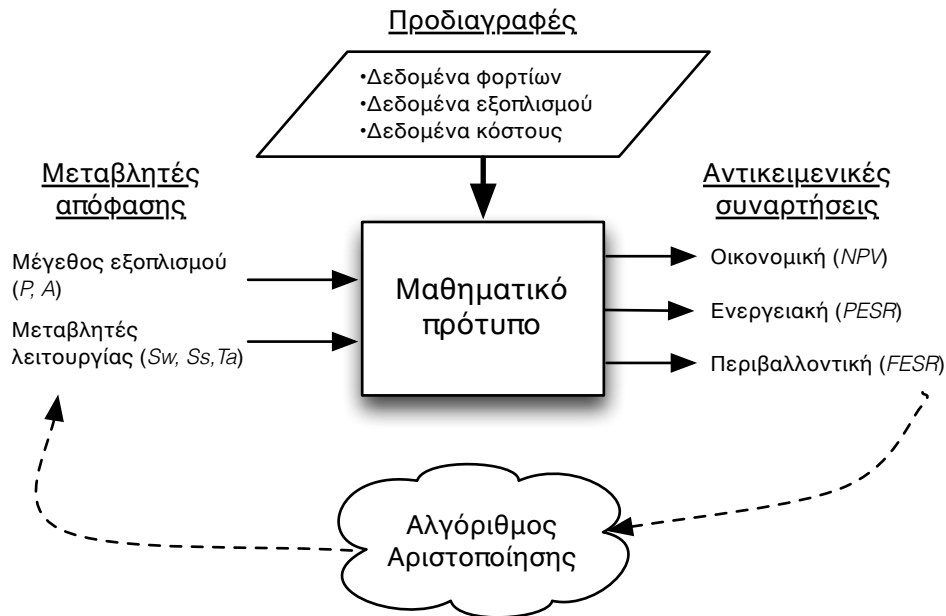
Έχοντας ως δεδομένο τα ενεργειακά φορτία, βρες το βέλτιστο μέγεθος του νέου εξοπλισμού (κινητήρας και ψύκτη απορρόφησης) που θα λειτουργεί μαζί με τον υφιστάμενο και τις άριστες λειτουργικές παραμέτρους (στρατηγική λειτουργίας, τιμολόγιο) που μεγιστοποιούν την οικονομική, ενεργειακή και περιβαλλοντική αντικειμενική συνάρτηση:

$$\max_{P,A,Sw, Ss, Ta} (NPV, PESR, ERR) \quad (4.27)$$

Ο ορισμός των δύο μεταβλητών μεγέθους: κινητήρα (P) και του ψύκτη απορρόφησης (A) και των τριών λειτουργικών μεταβλητών: στρατηγική κατά τους χειμερινούς μήνες (Sw), στρατηγική κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Ss) και τιμολόγιο (Ta) περιγράφουν ρητά μια μοναδική λύση του σχεδιασμού. Το Σχήμα 4.4 απεικονίζει τις ροές πληροφορίας του διατυπωμένου προβλήματος αριστοποίησης [74]. Η υλοποίηση του μαθηματικού προτύπου έγινε με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος MATLAB.

4.4.2 Τεχνική αριστοποίησης — Γενετικοί αλγόριθμοι

Το διατυπωθέν πρόβλημα χαρακτηρίζεται από απουσία γραμμικότητας κυρίως λόγω της συνάρτησης του συντελεστή χωρητικότητας και της συμμετοχής οικονομικών κλίμακας στον υπολογισμό του κόστους κεφαλαίου. Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει τόσο διακριτές (πχ στην επιλογή τιμολόγησης και στρατηγικής) όσο και συνεχείς μεταβλητές απόφασης. Επιπλέον, λόγω της φύσης των τιμολογήσεων, οι οποίες αφορούν στη μέγιστη χρεωστέα ζήτηση, ο ενδογενής τελεστής max οδηγεί σε μη συνεχείς συναρτήσεις παραγώγων. Ως αποτέλεσμα, οι συμβατικές μέθοδοι βελτιστοποίησης με βάση την βαθμίδα ($-\nabla f$) θεωρούνται ακατάλληλες για προβλήματα αυτού του τύπου. Από την άλλη πλευρά, εξελιγμένες τεχνικές, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms, ΓΑ) εφαρμόζονται με επιτυχία σε προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού και στα σημεία όπου οι συμβατικές μέθοδοι βελτιστοποίησης



Σχήμα 4.4: Ροές πληροφοριών του προβλήματος πολυστοχικής αριστοποίησης

δεν μπορούν να εφαρμοστούν [75]. Το βασικό πλεονέκτημα των ΓΑ είναι το ότι θεωρούν το εκάστοτε διατυπωθέν πρόβλημα 'μαύρο κουτί', δίνοντας έμφαση μονάχα στα δεδομένα εισόδου και τα αποτελέσματα, χωρίς να απαιτούν άλλες βοηθητικές πληροφορίες όπως τις παραγώγους ή/και τις ιδιότητες συνέχειας της αντικειμενικής συνάρτησης. Το μοναδικό μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, εφόσον η αντικειμενική συνάρτηση θα πρέπει να υπολογίζεται περισσότερες φορές από ότι στις συμβατικές τεχνικές, αν και η εξέλιξη των σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων απαλείφει αυτό το πρόβλημα.

Αναφορικά με την πολύκριτηριακή αριστοποίηση, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν αναγνωριστεί ως ιδιαίτερα κατάλληλοι, καθώς επιλύουν ταυτόχρονα ένα σύνολο εφικτών λύσεων. Μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους πολυστοχικής αριστοποίησης, η οποία χρησιμοποιείται και στη παρούσα διατριβή, είναι ο γενετικός αλγόριθμος μη κυριαρχούσας επιλογής, (NSGA-II: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) [76, 77]. Εκτός από τα πλεονεκτήματα των απλών γενετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ο NSGA-II παρέχει μία γρήγορη μέθοδο επιλογής και έναν μηχανισμό που διατηρεί την εκλεκτικότητα, ενώ δεν απαιτεί καμία παράμετρο που πρέπει να ρυθμιστεί για τη βέλτιστη σύγκλιση του αλγορίθμου. Ο NSGA-II μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού. Λεπτομέρειες για την εφαρμογή του δυαδικού κώδικα NSGA-II παρέχονται στη βιβλιογραφία [77] και δεν περιγράφονται περαιτέρω στη παρούσα διατριβή. Όλες οι μεταβλητές σχεδιασμού που περιγράφονται στην Εξίσωση (4.27) κωδικοποιούνται σε μία δυα-

δική αλληλουχία (χρωμόσωμα). Η επιλογή του αριθμού των bits για τις ρητές μεταβλητές, εν προκειμένω για τις μεταβλητή μεγέθους P, A , πραγματοποιείται πάντα συμβιβάζοντας την ακρίβεια και το χρόνο υπολογισμού. Για την επίτευξη του ελάχιστου επιθυμητού βήματος των μεταβλητών απόφασης, απαιτούνται m bits κατά την:

$$Increment = \frac{Range}{2^m - 1} \quad (4.28)$$

όπου *Range* είναι το απαιτούμενο εύρος της μεταβλητής, m είναι ο αριθμός των ψηφίων που χρειάζονται για την δυαδική κωδικοποίηση του. Το κάτω άκρο του επιτρεπόμενου εύρους είναι συνήθως 0, ενώ το άνω άκρο εξαρτάται από το δεδομένο πρόβλημα και συνήθως παίρνει τη τιμή της μέγιστης ετήσιας ζήτησης ενέργειας.

Η επίλυση του γενετικού αλγορίθμου πολυστοχικής αριστοποίησης ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Αρχικοποίηση: Κωδικοποίηση των μεταβλητών ως δυαδικά χρωμοσώματα. Τυχαία παραγωγή αρχικών λύσεων για τη δημιουργία του πληθυσμού πρώτης γενιάς.
2. Αξιολόγηση: Για κάθε λύση στον πληθυσμό, υπολογισμός όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων αριστοποίησης.
3. Προσδιορισμός καταλληλότητας: Προσδιορίζεται μια τιμή αξιολόγησης σε κάθε λύση με βάση τον αλγόριθμο *generalized Pareto-based scale-independent fitness function* (GPSIFF).
4. Επιλογή: Στοχαστική επιλογή λύσεων από τον πληθυσμό για την δημιουργία του πληθυσμού δεύτερης γενιάς με τη χρήση δυαδικού επιλογής.
5. Αναπαραγωγή: Εφαρμογή του παράγοντα αναπαραγωγής με δεδομένη πιθανότητα.
6. Μετάλλαξη: Εφαρμογή του παράγοντας μετάλλαξης στο κάθε γονίδιο με συγκεκριμένη πιθανότητα. Αυτός ο τελεστής βοηθά στον απεγκλωβισμό από τα τοπικά ελάχιστα.
7. Τοπική έρευνα: Ο πληθυσμός κατηγοριοποιείται σε Q είδη με βάση τις καλύτερες λύσεις για κάθε κριτήριο. Για κάθε είδος, υπολογίζονται οι τοποθεσίες όμοιων και ανόμοιων γονιδίων. Ύστερα, οι τοποθεσίες των ανόμοιων γονιδίων στην επιλεγμένη λύση διαταράσσονται με σκοπό τον σχηματισμό νέων λύσεων. Αν οι νέες λύσεις είναι μη κυριαρχούσες τότε αντικαθιστούν τις επιλεγμένες λύσεις.
8. Έλεγχος τερματισμού: Αν κάποιο κριτήριο τερματισμού (μέγιστος αριθμός γενεών, ανοχή σφάλματος κλπ) επιτευχθεί τότε ο αλγόριθμος σταματά αλλιώς επανέρχεται στο 2ο βήμα.

4.5 Ανάλυση αβεβαιότητας

Οι μέθοδοι λήψης απόφασης που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους βασίστηκαν σε αιτιοκρατικές (deterministic) τεχνικές αριστοποίησης για να καθορίσουν την βέλτιστη λύση για το δεδομένο πρόβλημα. Οι επενδύσεις συμπαραγωγής εξαρτώνται πολύ έντονα από τα λειτουργικά κέρδη που προκύπτουν από την εξοικονόμηση ενέργειας. Μερικές μεταβλητές όμως, όπως η τιμή του φυσικού αερίου ή η ζήτηση ενέργειας είναι πολύ αβέβαιες και συνήθως η επιλογή μιας μοναδικής τιμής δεν είναι αντιπροσωπευτική. Αυτή η αβεβαιότητα που εμπεριέχεται στην λειτουργία της εγκατάστασης αντανακλάται στην οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης. Απροσδόκητες διακοπές λειτουργίας, αλλαγές στην τιμολογιακή πολιτική καθώς και διακυμάνσεις στη ζήτηση της ενέργειας, αν δεν προβλεφθούν μπορούν να οδηγήσουν σε άσχημα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, μια απροσδόκητη αιχμή στην ζήτηση ψύξης κατά την καλοκαιρινή περίοδο μπορεί να εξαλείψει τα οφέλη για ένα μήνα. Έτσι, η ποσοτικοποίηση του ρίσκου πρέπει να γίνει όσο το δυνατόν ακριβέστερα για να δώσει την απαραίτητη πληροφορία που θα οδηγήσει στην αντιμετώπιση των ακραίων γεγονότων. Παρόλο που η αβεβαιότητα μπορεί να συμπεριληφθεί σε κάποιο βαθμό στα πρότυπα μέσω διαφόρων σεναρίων ή ανάλυσης ευαισθησίας, δεν συμπεριλαμβάνουν πολλαπλές και πιθανώς αλληλεπιδρούσες αβεβαιότητες που σχετίζονται με την ενέργεια.

Όταν υπολογίζονται αβέβαιοι παράγοντες στην παραγωγή ενέργειας με την χρήση τυχαίων μεταβλητών, η κοστολόγηση της παραγωγής αναφέρεται ως πιθανολογική κοστολόγηση. Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές στην σημασία της ανάλυσης αβεβαιότητας σε ένα ενεργειακό σύστημα και πιο συγκεκριμένα εφαρμογές πιθανολογικής κοστολόγησης για απλές εγκαταστάσεις συμπαραγωγής. Οι Al Mansour et al. [78] παρουσίασαν ένα εργαλείο για ανάλυση και οικονομική αξιολόγηση μικρών εγκαταστάσεων ΣΗΘ για να διευκολύνουν το σχεδιασμό του. Παρόμοια ανάλυση παρουσιάστηκε από τους Houwing et al. [79] οι οποίοι χρησιμοποίησαν συμβατική ανάλυση ευαισθησίας για διάφορα σενάρια στο σχεδιασμό και στη λειτουργία μικρών οικιακών εγκαταστάσεων μικρο-ΣΗΘ. Οι Zafra-Cabeza et al. [80] έδειξαν πως η διαχείριση του ρίσκου μπορεί να εφαρμοστεί στον προγραμματισμό της λειτουργίας μια εγκατάστασης ΣΗΘ προτείνοντας ένα στρατηγικό πλάνο δράσεων μείωσης του ρίσκου. Η επίδραση των διακυμάνσεων των τιμών ηλεκτρισμού έχει επίσης αναλυθεί εκτενώς [81, 82]. Μέθοδοι Monte Carlo έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για τη σύγκριση του κόστους ενέργειας από διαφορετικούς τύπους εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής [83, 84].

Οι κρίσιμοι παράγοντες που συμβάλλουν στην αβεβαιότητα των ενεργειακών συστημάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής [80, 85]:

- Ρίσκο λειτουργίας και συντήρησης
- Αβεβαιότητα στην ζήτηση ενέργειας (σε ετήσια ή ωριαία κλίμακα)
- Ρυθμιστικό και χρηματοοικονομικό ρίσκο

Για την προτυποποίηση αυτής της αβεβαιότητας συνήθως χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές: την εμπειρική και την αναλυτική, δηλαδή την προσέγγιση Monte Carlo και την προσέγγιση της ισοδύναμης καμπύλης διάρκειας φορτίου. Αυτή η διατριβή εστιάζει στην πρώτη μέθοδο για την εξέταση και ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας μιας επένδυσης τριπαραγωγής.

4.5.1 Ανάλυση Monte Carlo και Μέσης Διακύμανσης Χαρτοφυλακίου

Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι όπως η ανάλυση ευαισθησίας δείχνουν την αναμενόμενη εκτίμηση μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής αλλά δε μπορεί να δείξει την συχνότητα που μπορεί να συμβεί και συνεπώς το ρίσκο που πρέπει να αναληφθεί. Οι στοχαστικές μέθοδοι αξιολόγησης ρίσκου, ποσοτικοποιούν το ρίσκο και την αβεβαιότητα κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. Η μέθοδος Monte Carlo μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά μεταβλητές με δεδομένο βαθμό αβεβαιότητας και να εφαρμοστεί για την μετέπειτα αξιολόγηση της στοχαστικής επικράτησης της οικονομικής αποδοτικότητας και της διακύμανσης των μεταβλητών σχεδιασμού. Η ανάλυση αυτού του τύπου μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικές λειτουργικές και ρυθμιστικές παραμέτρους και για διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης και αβεβαιότητας.

Με την χρήση των πιθανολογικών αναλύσεων όπως η μέθοδος Monte Carlo, μπορεί να οριστεί, με συγκεκριμένο βαθμό εμπιστοσύνης το πιο πιθανό αποτέλεσμα και το επίπεδο του ρίσκου που θα αναληφθεί ανάλογα με τις παραδοχές. Μια τυπική ανάλυση Monte Carlo περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Εξαγωγή των κρίσιμων μεταβλητών από μια κατάλληλη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ανάλογα με τη φύση της μεταβλητής.
- Χρήση του προτύπου για τον υπολογισμό των επιθυμητών μεταβλητών εξόδου
- Απεικόνιση των αποτελεσμάτων με μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, εκτίμηση του διαστήματος εμπιστοσύνης και των λοιπών χαρακτηριστικών της κατανομής, πχ. μέσος όρος, τυπική απόκλιση, λοξότητα, κύρτωση κλπ.

Το προφίλ των λύσεων συνήθως καθορίζεται από τον συνδυασμό: μέσος όρος, τυπική απόκλιση, όπου ο μέσος όρος της κατανομής αντιπροσωπεύει το όφελος και η τυπική απόκλιση

το ρίσκο. Η τυπική απόκλιση χρησιμοποιείται συνήθως γιατί είναι το πιο αντιπροσωπευτικό μέγεθος της στατιστικής διασποράς, όπου υποδεικνύει πόσο διεσπαρμένα είναι τα μεγέθη σε μια κατανομή, ή αλλιώς πόσο αβέβαιο είναι να επιτευχθεί μια τιμή κοντά στο μέσο όρο. Αν είναι επιθυμητό να αναπαρασταθούν σπάνια αλλά εξαιρετικά ακραία ενδεχόμενα μπορεί να οριστεί ως ρίσκο μια τιμή στα άκρα της κατανομής (πχ το 95% ποσοστημόριο).

Ως επέκταση της ανάλυσης αβεβαιότητας αξίζει να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχουν όλο και περισσότερες αναφορές στην ανάλυση που βασίζεται στην θεωρία του χαρτοφυλακίου μέσης διασποράς (Mean Variance Portfolio – MVP), για τον προγραμματισμό των ηλεκτρικών συστημάτων. Η εργασία των Vithayasrichareon et al. [86] αποτελεί το πιο πρόσφατο παράδειγμα εργασίας που χρησιμοποίησε μεθόδους από το χρηματοοικονομικό πεδίο για τον καθορισμό του βέλτιστου ενεργειακού μίγματος μιας χώρας.

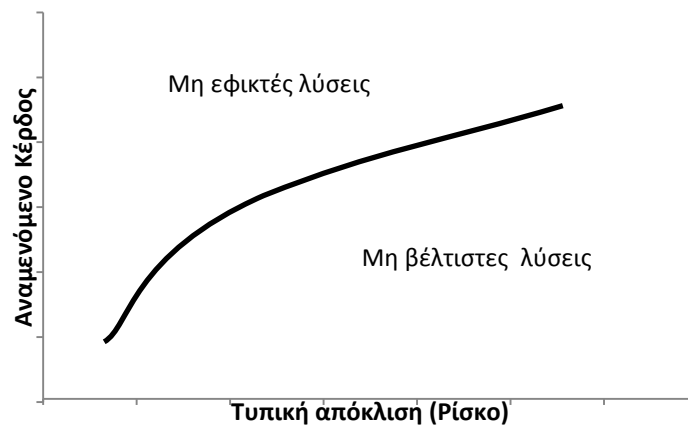
Η μέθοδος αυτή αρχικά είχε αναπτυχθεί για την ανάλυση των αναμενόμενων αποδόσεων και του ρίσκου για δεδομένα χρηματοοικονομικά χαρτοφυλάκια. Βασική αρχή της θεωρίας αυτής ήταν ότι επενδύσεις υψηλότερου ρίσκου απαιτούν μεγαλύτερο όφελος. Με αυτή τη προσέγγιση, κάθε λύση αξιολογείται με βάση την συνεισφορά του στο συνολικό κόστος λειτουργίας (ή λειτουργικό όφελος) συγκριτικά με τη συνεισφορά του στο συνολικό ρίσκο.

Οι βέλτιστες λύσεις σύμφωνα με αυτή τη θεωρία πέφτουν πάνω στο σύνορο βέλτιστων επιλογών² (Σχήμα 4.5), όπου τα αναμενόμενα κόστη μπορούν να μειωθούν μόνο αποδεχόμενοι υψηλότερο επίπεδο αβεβαιότητας. Το παραπάνω μπορεί να θεωρηθεί και ένα είδος πολυστοχικής αριστοποίησης όπου οι αντικρουόμενοι στόχοι είναι η μεγιστοποίηση του αναμενόμενου οφέλους και η ελαχιστοποίηση της αναλαμβανόμενης αβεβαιότητας. Από όλα τα συστήματα που ερευνώνται, πιο αποδοτικά είναι εκείνα που είναι πάνω ή πλησιάζουν την καμπύλη. Όλα τα άλλα συστήματα είναι μη αποδοτικά καθώς προσφέρουν την ίδια απόδοση με μεγαλύτερο κίνδυνο ή τον ίδιο κίνδυνο με μικρότερη απόδοση.

4.5.2 Στοχαστική περιγραφή τιμών ενέργειας

Ο στοχαστικός χαρακτήρων των ανωτέρω παραμέτρων μπορεί να αναπαρασταθεί με στατιστικές κατανομές. Κανονικές κατανομές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν δεν υπάρχει άλλη πληροφορία διαθέσιμη [78]. Για την αβεβαιότητα των τιμών καυσίμων η λογαριθμοκανονική κατανομή χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία [88] λόγω των εξής χαρακτηριστικών της: δεν μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές, έχει παχύτερες ουρές από την κανονική και είναι

²Το σύνορο βέλτιστων επιλογών (efficient frontier) είναι μια έννοια στη σύγχρονη θεωρία χαρτοφυλακίων που χρησιμοποιήθηκε από τον Harry Markowitz [87]. Ένας συνδυασμός παγίων, όπως ένα χαρτοφυλάκιο θεωρείται βέλτιστο αν έχει τη βέλτιστη αναμενόμενη απόδοση για το επίπεδο του ρίσκου, που συνήθως αναπαριστάται ως η τυπική απόκλιση των αποδόσεων του χαρτοφυλακίου.



Σχήμα 4.5: Σύνορο βέλτιστων τιμών

λοξευμένη προς τα αριστερά αντανακλώντας τη μεγαλύτερη πιθανότητα ρίσκου εξαιρετικά υψηλών τιμών σε σχέση με τη κανονική κατανομή. Οποιαδήποτε άλλη κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει οποιοδήποτε σενάριο. Για παράδειγμα αν χρειάζεται να γίνουν πιο συγκεκριμένες προβλέψεις περιορίζοντας τις τιμές σε πεπερασμένο εύρος, προτείνεται η χρήση της τριγωνικής κατανομής καθώς μπορεί να προτυποποιήσει ένα σενάριο χρησιμοποιώντας 3 τιμές: μέγιστη ελάχιστη και πιο πιθανή, επιτρέποντας τη δημιουργία αισιόδοξων ή απαισιόδοξων σταθμισμένων σεναρίων.

4.5.3 Στοχαστική περιγραφή των ενεργειακών φορτίων

Κατά την περιγραφή των φορτίων που θα χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό κρίνεται αναγκαίο να περιγραφούν οι τυχαίες αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές, π.χ. λόγω καιρικών συνθηκών ή άλλων τυχαίων γεγονότων. Όλα τα στοχαστικά πρότυπα έχουν σα βάση κάποια αιτιοκρατικά δεδομένα όπως εποχιακές και ημερήσιες διακύμανσης της ζήτησης. Δεδομένα για την ιστορική διακύμανση μπορεί να είναι δύσκολο να βρεθούν αν δεν υπάρχουν δεδομένα για πάνω από δύο χρόνια. Σε αυτή τη περίπτωση μπορούν να γίνουν υποθέσεις ότι η κατανομή της διακύμανσης έχει απόκλιση ένα σταθερό ποσό ως ποσοστό της μηνιαίας μέσης ζήτησης. Τα φορτία είναι συνήθως ετεροσκεδασμένα, δηλαδή η τυπική απόκλιση ανά ημέρα διαφέρει ανάλογα με τη μέση τιμή του μήνα. Αν υπάρχουν δεδομένα αφαιρείται η τάση χρησιμοποιώντας με τον ετήσιο ρυθμό αύξησης των μηνιαίων καταναλώσεων. Με αυτό το τρόπο λαμβάνεται ένα ημερήσιο (ή δύο π.χ. για μη εργάσιμες μέρες) τυπικό προφίλ ανά μήνα με δεδομένη τυπική απόκλιση ανά ώρα.

Κατά το θεώρημα κεντρικού ορίου, οι στοχαστικές διακυμάνσεις, της συνολικής ζήτησης

ακολουθούν συνήθως την κανονική κατανομή. Για την περιγραφή της стоχαστικής συμπεριφοράς αυτών των διακυμάνσεων στα πλαίσια της ανάλυσης αξιοπιστίας των συστημάτων ενέργειας προτείνεται στη βιβλιογραφία η χρήση των Γκαουσιανών προτύπων [89] ως εξής:

$$L_i = \mu_{L_i} + \sigma_{L_i}^2 \cdot \mathcal{N}_i(0, 1) \quad (4.29)$$

όπου μ_{L_i} είναι το εκτιμώμενο (μέσο) φορτίο την ώρα i , $\sigma_{L_i}^2$ η εκτιμώμενη διακύμανση για το ίδιο διάστημα και $\mathcal{N}(0, 1)$ ένας τυχαίος αριθμός εξαγόμενος από μια ανεξάρτητη κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1.

Το παραπάνω стоχαστικό πρότυπο προσομοιώνει το θόρυβο μη ρεαλιστικά καθώς ο θόρυβος σε κάθε χρονικό βήμα δεν είναι συσχετισμένος με το προηγούμενο, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει πολύ ακραίες μη ρεαλιστικές μεταβολές στα φορτία. Για να περιληφθεί αυτή η συσχέτιση μεταξύ δύο διαδοχών χρονικών βημάτων προτείνεται το ακόλουθο πρότυπο Gauss-Markov όπου η κατάσταση της προηγούμενη χρονικής περιόδου συσχετίζεται στοχαστικά με την επόμενη με συγκεκριμένο συντελεστή συσχέτισης [90]. Στην παραπάνω εργασία, αποδείχτηκε ότι αυτό το πρότυπο κατά μέσο όρο, προσεγγίζει καλύτερα αυτή τη συμπεριφορά από άλλα πρότυπα, υψηλότερου βαθμού, από αυτοπαλινδρομούμενα πρότυπα, ή από άλλες τεχνικές πρόβλεψης. Αυτή περιγράφεται από την εξής συνάρτηση δειγματοληψίας [89, 90]:

$$L_i = \begin{cases} \mu_{L_i} + \sigma_{L_i}^2 \cdot \mathcal{N}_i(0, 1) & \text{για } i = 1 \\ \mu_{L_i} + \rho \frac{\sigma_{L_i}^2}{\sigma_{L_{i-1}}^2} (L_{i-1} - \mu_{L_{i-1}}) + \sigma_{L_i}^2 \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \mathcal{N}_i(0, 1) & \text{για } i = 2 \dots 8760 \end{cases} \quad (4.30)$$

όπου ρ είναι ο συντελεστής συσχέτισης του θορύβου μεταξύ δύο διαδοχικών ωρών. Συνήθως ο συντελεστής συσχέτισης λαμβάνεται κοντά στη μονάδα πχ 0.85 για να αποφευχθούν απότομες διακυμάνσεις. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και όταν δεδομένα για μια χαρακτηριστική μέρα ανά μήνα είναι διαθέσιμη. Σε ετήσια βάση ο συνολικός θόρυβος έχει μηδενικό άθροισμα συνεπώς η συνολική ενέργεια είναι ίση με την μέση (αναμενόμενη).

Κεφάλαιο 5

Μελέτη περίπτωσης

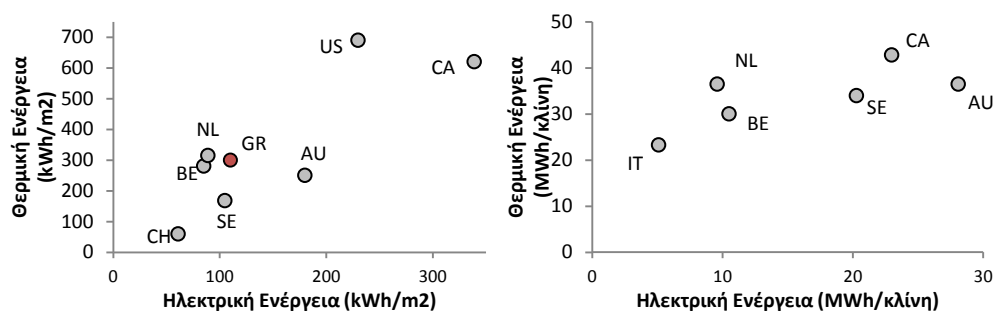
Εξετάζεται μία μελέτη περίπτωσης εφαρμόζοντας την περιγραφόμενη μεθοδολογία του περιγραφόμενου συστήματος τριπαραγωγής σε γνωστό εμπορικό νοσοκομείο. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση των μεταβλητών σχεδιασμού στην άριστη λύση και προτείνονται οι βέλτιστες λειτουργικές παράμετροι. Τα αποτελέσματα αφορούν στη διαστασιολόγηση, την παραμετρική ανάλυση διαφόρων κρίσιμων μεταβλητών, τη βέλτιστη επιλογή λειτουργικών παραμέτρων και την πολυστοχική αριστοποίηση για την εύρεση της άριστης οικονομικής, ενεργειακής και περιβαλλοντικής λύσης. Έπειτα από την επίλυση των αιτιοκρατικών προτύπων ακολουθεί η στοχαστική επίλυσή τους λαμβάνοντας υπόψιν τους κύριους παράγοντες αβεβαιότητας.

5.1 Εισαγωγή

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά παραδείγματα εφαρμογής μονάδων τριπαραγωγής σε βιομηχανίες [91, 92], κατοικίες [3, 42], εμπορικά κτήρια με συνηθέστερα παραδείγματα νοσοκομειακές [38, 93] και ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις [4] ή αλλά δημόσια κτήρια [94] και συγκροτήματα (π.χ. αεροδρόμια [95]).

Τα εμπορικά κτήρια, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.4.1, έχουν απαιτητικά θερμικά και ψυκτικά φορτία κυρίως λόγω των συστημάτων θέρμανσης, κλιματισμού και εξαέρωσης (HVAC). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα νοσοκομεία, όπου σε σχέση με άλλους εμπορικούς καταναλωτές έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις ανα μονάδα επιφάνειας λόγω του εξειδικευμένου τους εξοπλισμού και των συνεχών ωραρίων λειτουργίας με απαιτήσεις για όλα τα είδη ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας [55, 96]. Ενδεικτικά παρατίθενται οι ενεργειακές ανάγκες σε νοσοκομειακές μονάδες διαφόρων χώρων στο Σχήμα 5.1. Οι μεγάλοι χρόνοι λειτουργίας, η «ομαλότητα» των φορτίων σε όλη τη διάρκεια του 24ωρου και η προβλεψιμότητά τους λόγω του σταθερού χρόνου λειτουργίας τους, τα καθιστά ιδανικούς υποψηφίους για την εγκατάσταση συστημάτων τριπαραγωγής. Γι' αυτούς τους λόγους τα νοσοκομεία θεωρούνται ιδανικοί εμπορικοί καταναλωτές που έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς

στη βιβλιογραφία για την εγκατάσταση ενός συστήματος τριπαραγωγής και θα χρησιμοποιηθεί και σε αυτή τη διατριβή [37, 38, 93].



Σχήμα 5.1: Μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας (kWh/m^2) και ανά κλίνη ($MWh/κλίνη$) για διάφορες χώρες

Η ενεργειακή κατανάλωση που απαιτείται για την κάλυψη των ηλεκτρικών τους αναγκών κυρίως αποτελείται από τα μερικά φορτία ως ακολούθως: φωτισμός, ανελκυστήρες, ρευματοδότες, κατανάλωση του συγκροτήματος πλήσης ρούχων, κατανάλωση του χώρου προετοιμασίας γευμάτων, ιατρικός εξοπλισμός, κλιματισμός και αερισμός. Η ενεργειακή κατανάλωση που απαιτείται για την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων αποτελείται από τα μερικά θερμικά φορτία που ακολουθούν: πλήσης ρούχων, προετοιμασίας γευμάτων, αποστείρωση, θερμό νερό χρήσης, θέρμανση και ύγρανση. Πρόσφατα διεξήχθη μια στατιστική μελέτη στις ΗΠΑ από την Energy Star για το συσχετισμό κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας στα νοσοκομεία με βασικές διεργασίες τους [97]. Εξετάστηκαν 27 παράμετροι, όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω από 191 νοσοκομειακά συγκροτήματα και αφορούν στη λειτουργία των νοσοκομείων. Από αυτές βρέθηκε ότι χρειάζονται μόνο οι εξής τέσσερις για να περιγράψουν με στατιστικά σημαντικό τρόπο την ενεργειακή ένταση ενός νοσοκομείου ($R^2 = 0.87$): ο αριθμός ισοδύναμων ετήσιων μονάδων εργασίας ανά μονάδα επιφάνειας, ο αριθμός κλινών ανά μονάδα επιφάνειας, ο αριθμός μαγνητικών τομογράφων ανά μονάδα επιφάνειας και ο αριθμός βαθμομηρών ψύξης¹.

5.2 Περιγραφή του εξεταζόμενου συστήματος

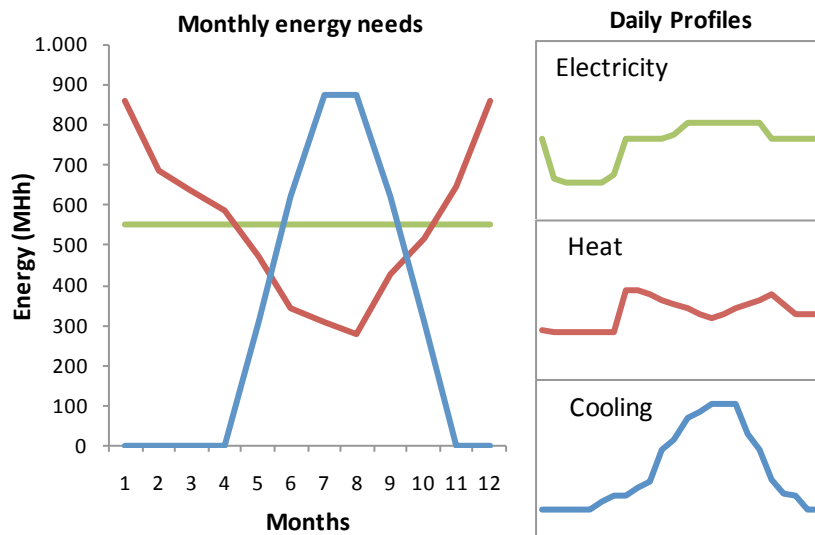
Εξετάζεται η βιωσιμότητα της επένδυσης μια μονάδας τριπαραγωγής σε γνωστή μαιευτική κλινική του λεκανοπεδίου Αττικής με 300 κλίνες. Θεωρείται ότι οι υφιστάμενες μονάδες

¹ Η εξίσωση που αναπτύχθηκε από αυτή τη μελέτη είναι: $EUI(kWh/m^2) = 1530 + 905 \frac{beds}{1000m^2} + 4085 \frac{FTE}{1000m^2} + 304316 \frac{MRI}{1000m^2} + 0.0716CDD$

παραγωγής ενέργειας του νοσοκομείου αποτελούνται από έναν λέβητα φυσικού αερίου που καλύπτει τα θερμικά φορτία και έναν ηλεκτρικό ψύκτη που καλύπτει τα ψυκτικά φορτία. Η επένδυση αφορά στην εγκατάσταση μίας μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας (ΣΗΘ) με ψύκτη απορρόφησης.

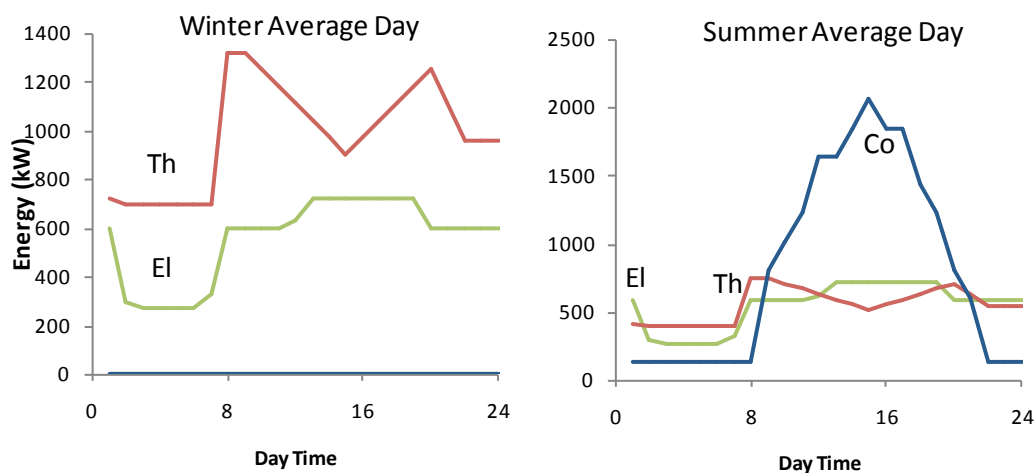
Επειδή οι ωριαίες χρονοσειρές δεν ήταν διαθέσιμες για διάστημα ενός χρόνου, εφαρμόστηκε η εξής μεθοδολογία για την καταγραφή των φορτίων και τη δημιουργία των ετησίων χρονοσειρών: Μετρήθηκαν τα λίτρα που χρησιμοποιήθηκαν στο λέβητα για τον υπολογισμό των αθροιστικών καμπυλών απαιτήσεων θερμότητας για θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης. Μαζί με τους λογαριασμούς από τον πάροχο ηλεκτρικού ρεύματος καταγράφηκε και η εποχιακή διακύμανση των φορτίων. Ποσοτικοποιήθηκαν οι ψυκτικές απαιτήσεις και μειώθηκαν αντίστοιχα οι ηλεκτρικές απαιτήσεις που χρησιμοποιούνταν για ψύξη. Στη συνέχεια μετρήθηκε για 24 ώρες το ημερήσιο προφίλ κάθε φορτίου για μια εργάσιμη και μια μη εργάσιμη μέρα και, αφού κανονικοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκαν τα μηνιαία φορτία για την εξαγωγή της ετήσιας χρονοσειράς. Για τη δημιουργία τους υποτέθηκε ότι στις μη εργάσιμες μέρες η συνολική ενέργεια ανέρχεται στο 60% των εργάσιμων σε επίπεδο ενός μήνα.

Το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει τις εποχιακές και ημερήσιες διακυμάνσεις των ενεργειακών φορτίων. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται τυπικά φορτία ζήτησης για μια καλοκαιρινή ή μια χειμερινή μέρα. Το ισχύον τιμολόγιο είναι το B1.



Σχήμα 5.2: Εποχιακά και ημερήσια ενεργειακά προφίλ

Χρησιμοποιήθηκε η δομή της ελληνικής αγοράς ενέργειας για τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο. Τα δύο τιμολόγια του ηλεκτρισμού που ίσχυαν τη στιγμή της μελέτης παρου-



Σχήμα 5.3: Πρότυπα φορτία για μια τυπική χειμερινή και καλοκαιρινή μέρα

σιάζονται στον Πίνακα 5.1. Η βασική διαφορά των δύο τιμολογίων είναι ότι το ένα τιμολόγιο έχει φτηνή ισχύ και ακριβή ενέργεια ενώ το άλλο έχει φτηνή ενέργεια και ακριβό ηλεκτρισμό. Θεωρήθηκε ότι έχουν γίνει όλα τα απαραίτητα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας και εγκατάστασης της υποδομής του φυσικού αερίου, έτσι ώστε η σύγκριση να αφορά μόνο στις διαφορετικές τεχνολογίες και όχι σε διαφορετικά καύσιμα. Η κεντρική μέση τιμή του φυσικού αερίου για τη διάρκεια της επένδυση θεωρήθηκε ίση με $C_f = 0.043\text{€/kWh}$. Η τιμή πώλησης του ηλεκτρισμού θεωρείται ίση με την τιμή αγοράς, δηλαδή το σύστημα μελετάται χωρίς την επίδραση οποιασδήποτε επιδότησης.

Πίνακας 5.1: Τιμολόγια ηλεκτρισμού στην Ελλάδα (μέχρι Ιανουάριο 2012)

Tariff	Power ($\frac{\text{€}}{\text{kW}}$)	Energy ($\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$)	
		Before $400\frac{\text{kWh}}{\text{kW}}$	After $400\frac{\text{kWh}}{\text{kW}}$
Electricity B_1	12.1	0.073	0.049
Electricity B_2	4.5	0.096	0.096
Electricity <i>Sell</i>	-	0.072	
Natural Gas	-	0.043	

Η επένδυση αφορά σε ένα σύστημα τριπαραγωγής που σχεδιάζεται με σκοπό να παρέχει ηλεκτρισμό, θερμότητα και ψύξη στο κτήριο μαζί με τον υφιστάμενο εξοπλισμό. Θα εξεταστεί εάν η συμπληρωματική λειτουργία του νέου συστήματος με το παλιό δικαιολογεί την επένδυση από άποψη οικονομικής αποδοτικότητας και ενεργειακής εξοικονόμησης. Ο κινητήρας που επιλέχθηκε είναι τύπου μηχανής εσωτερικής καύσης για τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο Κεφάλαιο. Η ανακτώμενη θερμότητα χαμηλής ποιότη-

τας είναι αρκετή για τις απαιτούμενες λειτουργίες της εγκατάστασης. Η καμπύλη απόδοσης του κινητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Η συνολική απόδοση σε πλήρη φόρτιση είναι 89%, με την ηλεκτρική απόδοση να κυμαίνεται στα 36% γεγονός που δίνει ένα λόγο θερμότητας προς ηλεκτρισμό (*HPR*) στα 1.47. Ο ψύκτης απορρόφησης λειτουργεί με ζεστό νερό που ανακτάται από τη ΜΕΚ. Οι προδιαγραφές του εξοπλισμού φαίνονται στον Πίνακα 5.2. Ο χρόνος ζωής της επένδυσης υπολογίζεται σε 15 χρόνια και το επιτόκιο προεξόφλησης 7%. Τα παραπάνω μεγέθη αποτελούν μια απαισιόδοξη εκτίμηση αλλά θα χρησιμοποιηθούν για να δείξουν το πλεονέκτημα των τεχνολογιών συμπαραγωγής για το πιο δυσμενές σενάριο.

Πίνακας 5.2: Προδιαγραφές συστήματος

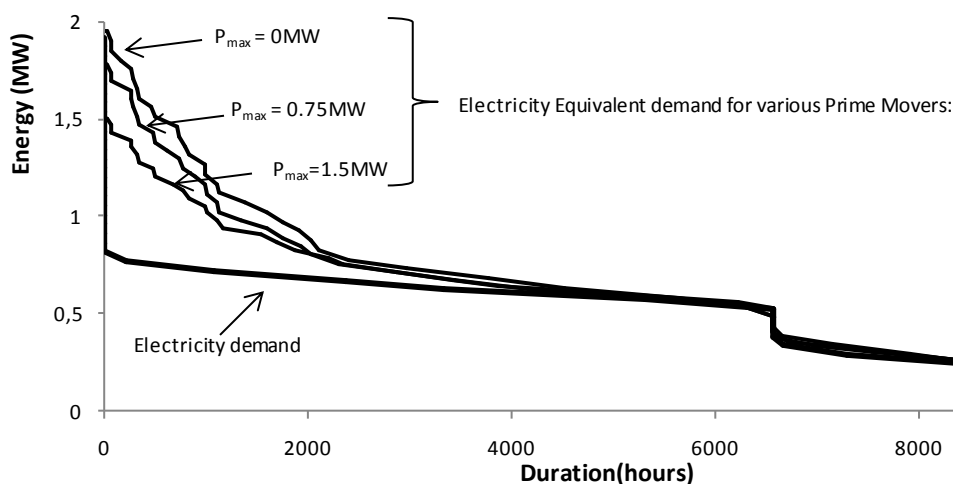
Παράμετρος	Τιμή	
Κινητήρας	HRF	85%
	C_{CHP}	1 M€/MW
	n_1	0.75
Ψύκτης απορρόφησης	$COP^{A.Chiller}$	0.8
	C_{AC}	0.25 M€/MW
	n_2	0.50
Ηλεκτρικός ψύκτης	$COP^{E.Chiller}$	3
	η^{Boiler}	85%
Λέβητας	mC_p	5000 kW/°C
Δοχείο Αδρανείας	$C^{Th,Waste}$	0.005 €/kWh
Κόστος απόρριψης θερμότητας	C_{om}	0.006 €/kWh
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης		

5.3 Αποτελέσματα

5.3.1 Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης

Για την παραμετρική ανάλυση εξετάστηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις:

- 4 Στρατηγικές
 - Στρατηγική ακολούθηση ισοδύναμων ηλεκτρικών φορτίων (Ee F) με ελάχιστη ηλεκτρική ισχύ αγορασμένη από το δίκτυο στο 0, 50% or 100% του ετήσιου φορτίου βάσης. Δηλαδή $ELF_{set} = 0, 175$ ή 350 kW.
 - Συνεχής λειτουργία (CO) για 8, 16 ή 24 ώρες προσομοιώνοντας τη λειτουργία για μία 2 ή τρεις βάρδιες.
 - Peak Shaving (PS) με $PS_{set} = 70\%$, 80% ή 90% της ετήσιας αιχμής ηλεκτρισμού.
 - Λειτουργία σε φορτία βάσης (BL) $BL_{set} = 175, 350, 500$ kW ($50\%, 100\%$ 150% του ετήσιου φορτίου βάσης)



Σχήμα 5.4: Επίδραση του μεγέθους του κινητήρα στην συνολική ισοδύναμη ζήτηση ηλεκτρισμού

- Η χρήση αποθηκευτικού μέσου (δοχείου αδρανείας ζεστού νερού)
- Δύο διαφορετικά τιμολόγια: B_1 και B_2

Με τις παραπάνω παραμέτρους δημιουργήθηκαν 48 διαφορετικές προσομοιώσεις που επιλύθηκαν για διάφορα μεγέθη του κινητήρα, με σκοπό να διερευνηθούν οι αλληλεπιδράσεις στη λειτουργία και την οικονομία της επένδυσης.

Λειτουργική επίδοση

Τα λειτουργικά οφέλη μπορούν να αναπαρασταθούν σε καμπύλες διάρκειας φορτίου. Τα ηλεκτρικά ισοδύναμα φορτία πριν και μετά την εγκατάσταση απεικονίζονται σε μια καμπύλη διάρκειας φορτίων στο Σχήμα 5.4. Είναι φανερό ότι οι συνολικές απαιτήσεις για ηλεκτρισμό μειώνονται καθώς το μέγεθος της μηχανής αυξάνεται γιατί η περίσσεια θερμότητας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψυκτικής ενέργειας. Επιπλέον το σύστημα ΣΗΘΨ εξομαλύνει την αιχμή του απαιτούμενου ηλεκτρισμού, καθώς η ζήτηση ψυκτικής ενέργειας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες είναι η αιτία των απότομων αιχμών στον ηλεκτρισμό. Το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών φορτίων που καλύπτονται από τη νέα εγκατάσταση για διαφορετικές στρατηγικές και παραμέτρους ως συνάρτηση του μεγέθους του κινητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5. Αυτό περιλαμβάνει:

- Τα ηλεκτρικά φορτία που παράγονται από τον κινητήρα και αξιοποιούνται για τελική χρήση χωρίς να περιλαμβάνουν τη ζήτηση ψύξης.

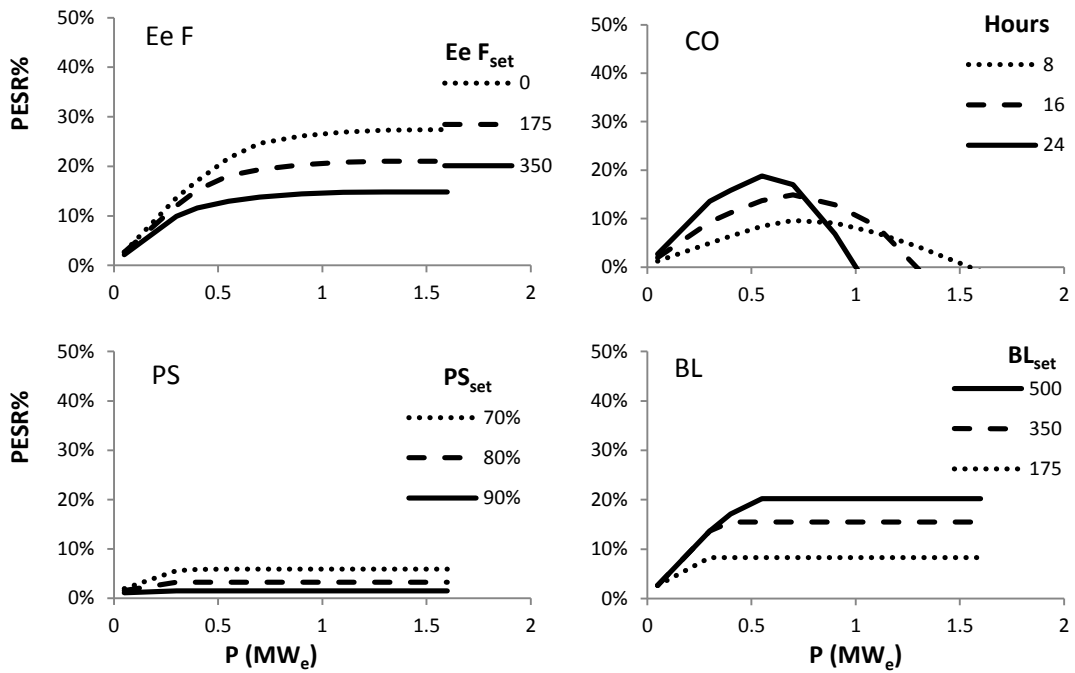
- Τα θερμικά φορτία που παράγονται από τον κινητήρα και χρησιμοποιούνται για τελική χρήση.
- Τα θερμικά φορτία που παράγονται από τον κινητήρα και χρησιμοποιούνται από τον ψύκτη απορρόφησης για την παραγωγή ψυκτικής ενέργειας τελικής χρήσης.
- Τα ηλεκτρικά φορτία που παράγονται από τον κινητήρα και τροφοδοτούνται στον ηλεκτρικό ψύκτη με σκοπό την παραγωγή ψυκτικής ενέργειας τελικής χρήσης.

Σχετικά με την κάλυψη των φορτίων μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

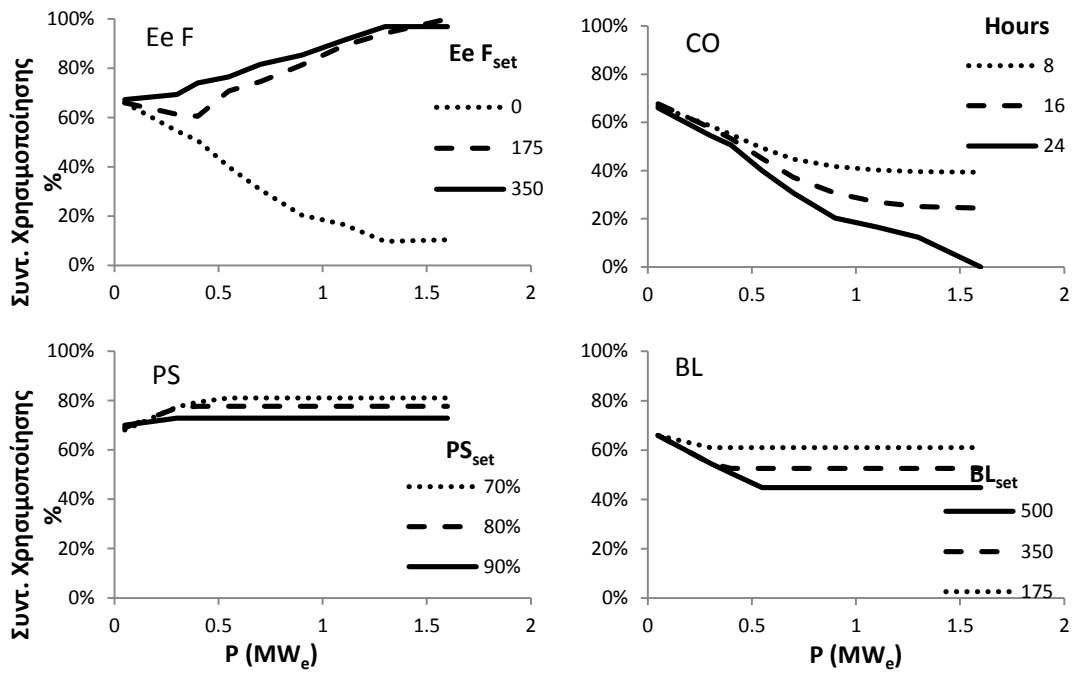
- Πάνω από 80% της ηλεκτρικής, θερμικής και ψυκτικής ζήτησης καλύπτονται μόνο στη στρατηγική ακολούθησης ηλεκτρικών φορτίων ($ELF_{set}=0$) και στη συνεχή λειτουργία με κινητήρα μεγέθους $0.75MW_e$.
- 100% κάλυψη της θερμικής ενέργειας μπορεί να γίνει μόνο με τη στρατηγική συνεχούς λειτουργίας για 24 ώρες.
- Η κάλυψη στις στρατηγικές κάλυψης φορτίων αιχμής ή θάσης είναι περιορισμένη καθώς—με βάση αυτές τις στρατηγικές—ο κινητήρας δεν λειτουργεί πάνω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Σε αυτή τη περίπτωση δεν υπάρχει λόγος για τη χρήση μεγαλύτερου κινητήρα.
- Ένας ψύκτης απορρόφησης δεν χρειάζεται σε κάθε περίπτωση αν εγκατασταθεί μικρός κινητήρας. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει περίσσεια θερμότητας για να τροφοδοτήσει τον ψύκτη.

Το Σχήμα 5.6 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο η επιλογή του ονομαστικού μεγέθους επηρεάζει το λόγο πρωτογενούς ενέργειας για διάφορα μεγέθη του εξοπλισμού. Το PESR είναι επιθυμητό να είναι πάνω από 10% για να οριστεί η εγκατάσταση ως συμπαραγωγή υψηλής απόδοσης και να είναι επιλέξιμη για επιδοτήσεις. Γι' αυτό το λόγο στρατηγικές που δεν μπορούν να πετύχουν αυτό το μέγεθος, όπως η peak shaving ή της συνεχούς λειτουργίας μιας θάρδιας, δεν είναι κατάλληλες και δεν εξετάζονται περαιτέρω.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης του δικτύου ως συνάρτηση της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7. Πριν την εγκατάσταση της νέας μονάδας ο ΣΧ ήταν 67%. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7, η B_1 είναι πιο αποδοτική για ΣΧ πάνω από 50%. Οι στρατηγικές που βασίζονται στη βελτίωση του συντελεστή χρησιμοποίησης, όπως η στρατηγική peak shaving, πρέπει να συνοδεύεται με τη χρήση του τιμολογίου B_1 .



Σχήμα 5.6: Συντελεστής εξοικονόμησης ενέργειας για διάφορες στρατηγικές και μεγέθη επένδυσης



Σχήμα 5.7: Επίδραση του μεγέθους του κινητήρα στο συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου

Οικονομική επίδοση

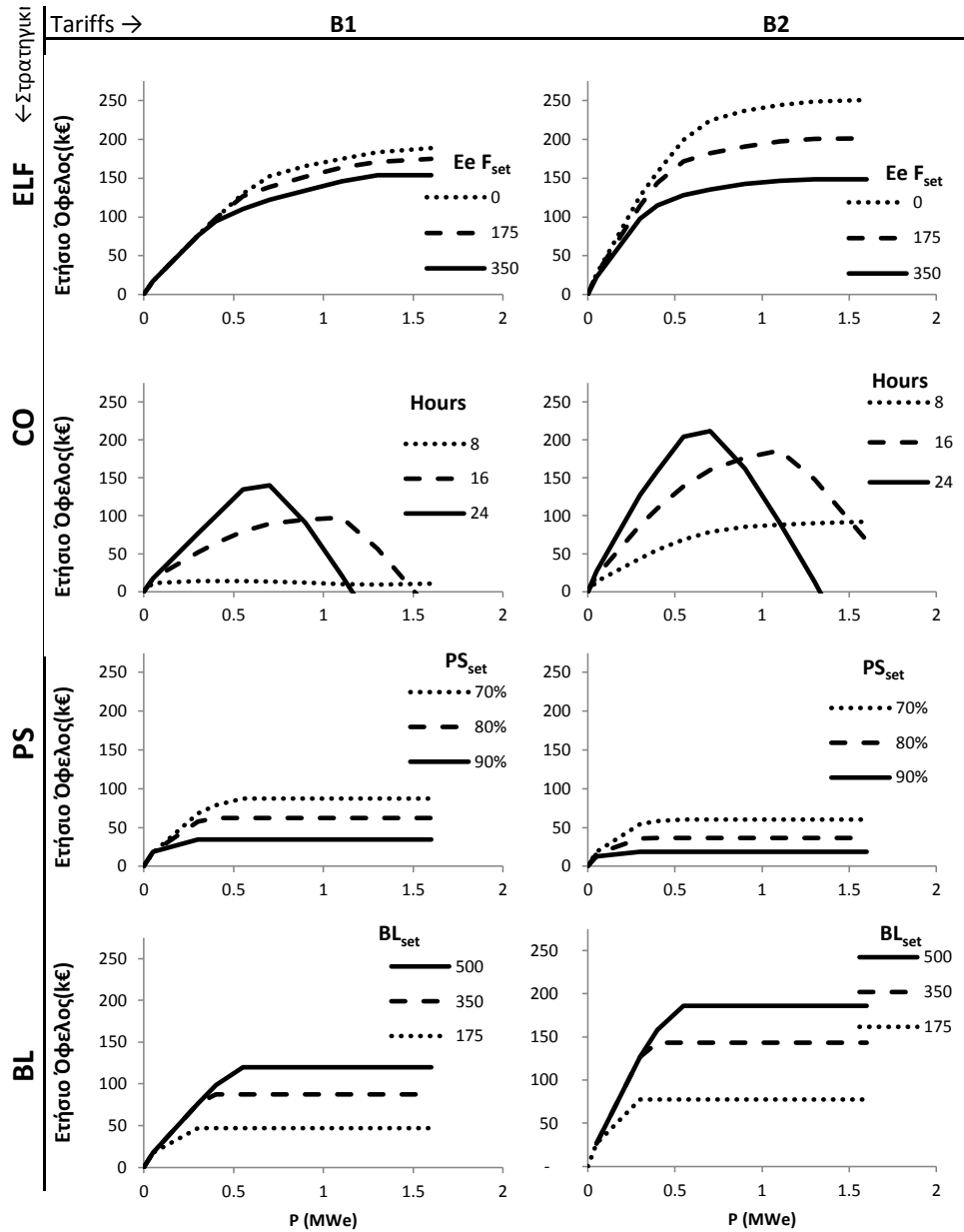
Τα Σχήματα 5.8, 5.9 δείχνουν την οικονομική απόδοση μιας τέτοιας επένδυσης για διάφορες στρατηγικές και τιμολόγια. Ως οικονομικό κριτήριο σε αυτό το στάδιο επιλέχτηκε ο ρυθμός επιστροφής κεφαλαίου (Return on Investment - ROI) ως απλό μέσο σύγκρισης εναλλακτικών επιλογών [68]. Παρ' όλο που δεν περιέχουν την επίδραση του επιτόκιου προ-εξόφλησης, όπως άλλες μέθοδοι (π.χ. καθαρά παρούσα αξία), είναι κατάλληλο στα πλαίσια της παραμετρικής ανάλυσης. Με βάση την ιδιαιτερότητα κάθε περίπτωσης π.χ. περιορισμοί προϋπολογισμού, επιδοτήσεις σε ενεργειακή εξοικονόμηση ή βελτιώσεις στο συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου, ο λήπτης απόφασης μπορεί να επιλέξει το βέλτιστο σχεδιασμό της εγκατάστασης σύμφωνα με τα δικά του κριτήρια.

Το καλύτερο ετήσιο κέρδος επιτυγχάνεται από την προτεινόμενη στρατηγική Ee F και το τιμολόγιο B2, αλλά η ίδια επιστροφή στην επένδυση με μικρότερο κέρδος μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μικρότερο εξοπλισμό και άλλη στρατηγική, όπως η κάλυψη των φορτίων βάσης. Η στρατηγική συνεχούς λειτουργίας σταματά να είναι κερδοφόρα μετά από συγκεκριμένο μέγεθος εξοπλισμού, καθώς παράγει ενέργεια που δεν χρειάζεται από την εγκατάσταση και το κόστος λειτουργίας μεγαλώνει. Το τιμολόγιο B₂ δίνει γενικά καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα και η απόδοση συνδέεται με το συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου (Σχήμα 5.7). Γι' αυτό το λόγο για ELF, $ELF_{set}=0$ είναι πιο αποδοτική στο B₂ ενώ η ELF, $ELF_{set}=175$ είναι πιο αποδοτική στο B₁. Η στρατηγική Peak shaving είναι πιο αποδοτική στο B₁ καθώς κόβει τις ακριβές αιχμές και επωφελείται των φτηνών τιμών ενέργειας αλλά γενικά δεν είναι πολύ κερδοφόρα καθώς ρυθμίζεται να λειτουργεί πολύ λίγες ώρες. Παρόλα αυτά είναι πιο κερδοφόρα από τη συνεχή λειτουργία μίας βάρδιας παρόλο που λειτουργεί λιγότερες ώρες.

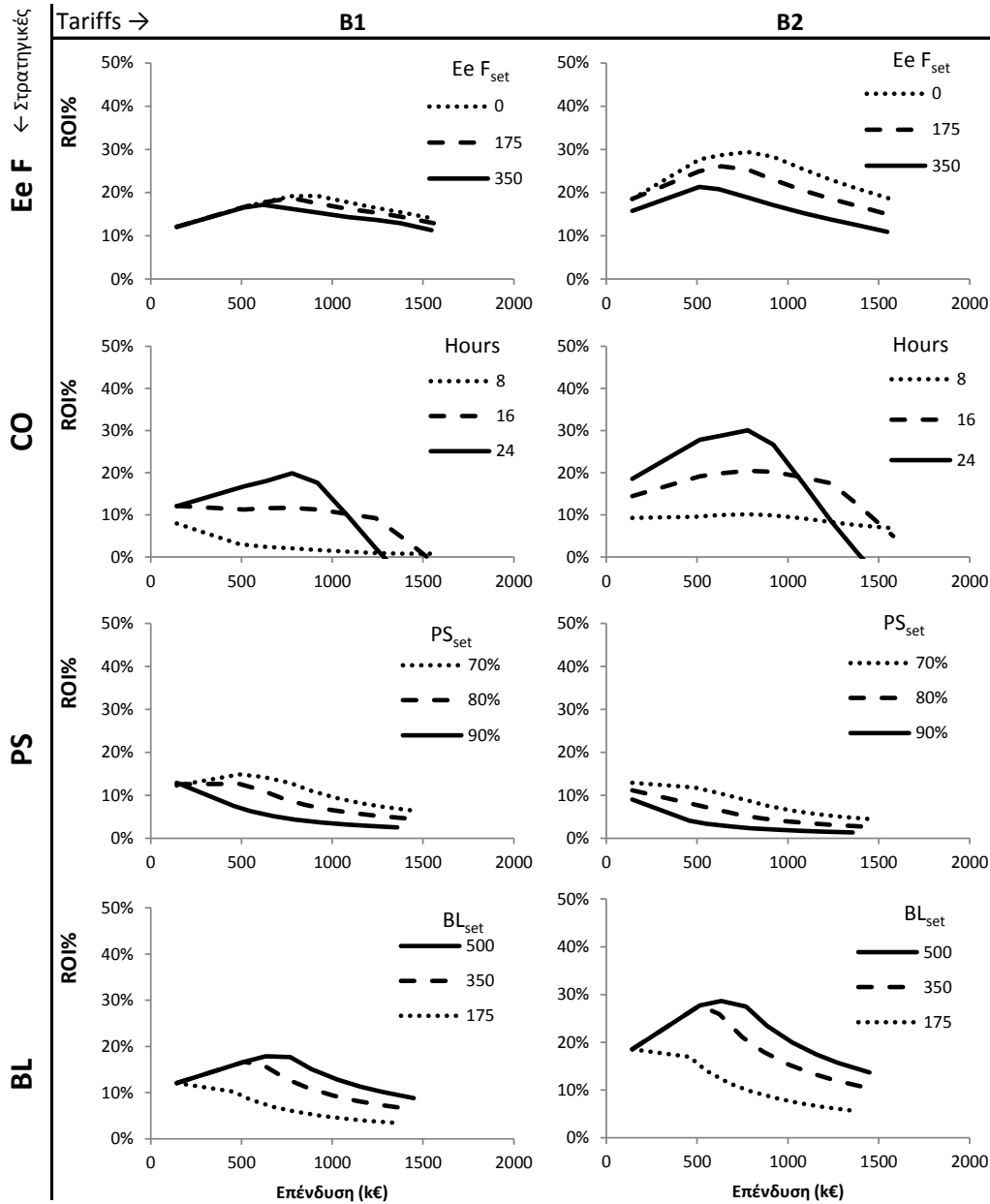
Το δοχείο αδρανείας επηρεάζει την οικονομία της εγκατάστασης τριπαραγωγής μόνο στην περίπτωση της στρατηγικής συνεχούς λειτουργίας, καθώς μόνο εκεί χρειάζεται να αποθηκευτεί μεγάλη ποσότητα περίσσειας θερμότητας. Το Σχήμα 5.10 απεικονίζει πως το μέγιστο ετήσιο κέρδος αυξάνεται με περισσότερες ώρες λειτουργίας, καθώς η θερμότητα που δεν χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν χρειαστεί.

5.3.2 Πολυστοχική αριστοποίηση

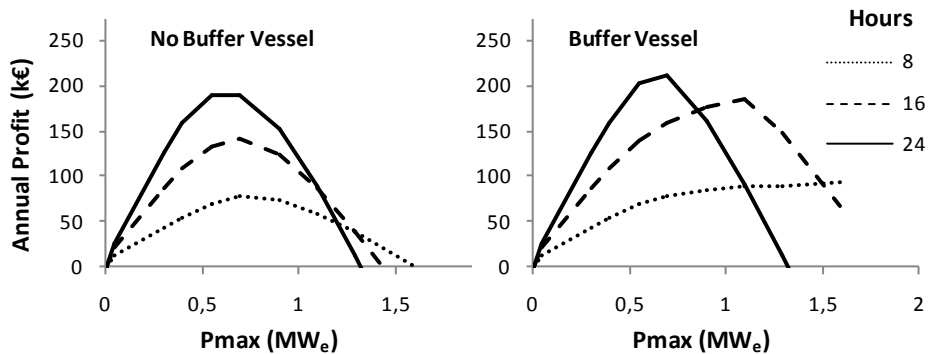
Από την προηγούμενη ενότητα διαπιστώθηκε ότι κάποιες στρατηγικές δεν χρειάζεται να αναλυθούν περαιτέρω καθώς καλύπτονται από τις νέες στρατηγικές ισοδύναμων φορτίων.



Σχήμα 5.8: Επίδραση της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα στο ετήσιο λειτουργικό κέρδος για διάφορες στρατηγικές και τιμολόγια



Σχήμα 5.9: Επίδραση του μεγέθους της επένδυσης στην επιστροφή της επένδυσης για διάφορες στρατηγικές και τιμολόγια



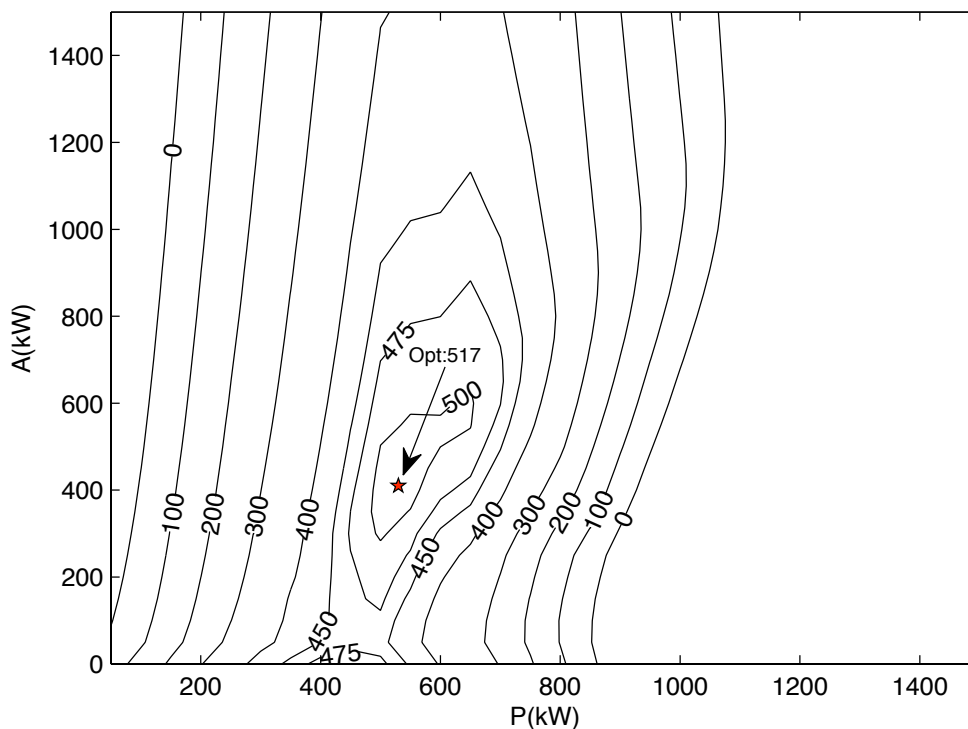
Σχήμα 5.10: Επίδραση του δοχείου αδρανείας στο συνολικό ετήσιο κέρδος με τη στρατηγική συνεχούς λειτουργίας

Πιο συγκεκριμένα, δεν θα εξεταστεί η στρατηγική κάλυψης φορτίων βάσης, καθώς ο αλγόριθμος αριστοποίησης θα επιλέξει το κατάλληλο μέγεθος σε περίπτωση που δεν χρειάζεται. Για τη στρατηγική κάλυψης αιχμών θα χρησιμοποιηθεί η στρατηγική κάλυψης ισοδύναμων ηλεκτρικών φορτίων ($E_e f$) με αγορά το 100% των φορτίων βάσης από το δίκτυο καθώς διαπιστώθηκε ότι προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη λογική των στρατηγικών "ξυρίσματος αιχμών" για εγκαταστάσεις τριπαραγωγής. Για τη δυαδική κωδικοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν 8 ψηφία για τα P, A που σύμφωνα με την εξίσωση (4.28) αντιστοιχούν σε διακριτό βήμα $7kW$. 2 ψηφία χρησιμοποιήθηκαν για τα S_w και S_s (2^2 εναλλακτικές) και ένα ψηφίο για την Ta (2^1 alternatives). Συνεπώς, ένα χρωμόσωμα των 21 δυαδικών ψηφίων ορίζει ρητά μια μοναδική λύση σχεδιασμού.

Τα Σχήματα 5.11, 5.12, 5.13 απεικονίζουν τις ισοϋψείς των μεταβλητών διαστασιολόγησης P, A για τις 3 αντικειμενικές συναρτήσεις αντίστοιχα. Απεικονίζονται μόνο οι βέλτιστες λειτουργικές παράμετροι (τιμολόγιο, στρατηγική) για κάθε ζεύγος $P - A$. Παρατηρείται ότι τα μεγέθη του εξοπλισμού είναι μικρότερα για το οικονομικό άριστο σε σχέση με το ενεργειακό άριστο, που με τη σειρά τους είναι μικρότερα από το περιβαλλοντικό άριστο. Το μέγεθος για τη σχετική μείωση των εκπομπών θα περίμενε κανείς ότι θα συνέπιπτε με αυτό του ενεργειακού άριστου, καθώς η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας συνεπάγεται και λιγότερες εκπομπές. Όμως, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, οι μειωμένες εκπομπές δεν είναι αποτέλεσμα μόνο της ενεργειακής εξοικονόμησης αλλά και της υποκατάστασης του ηλεκτρισμού από την καθαρότερη τεχνολογία της συμπαραγωγής (αποκλειστικά φυσικό αέριο) συγκριτικά με το ρυπογόνο ενεργειακό μείγμα του εθνικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής με βάση το λιγνίτη, (βλέπε Πίνακα 4.1). Γι' αυτό το λόγο το περιβαλλοντικό άριστο είναι μεγαλύτερο και αυξάνεται πέρα από τα όρια του ενεργειακού όταν η μηχανή ΣΗΘ λειτουργεί συνεχώς υποκαθιστώντας την ενέργεια του δικτύου ακόμα και όταν δεν εξοικο-

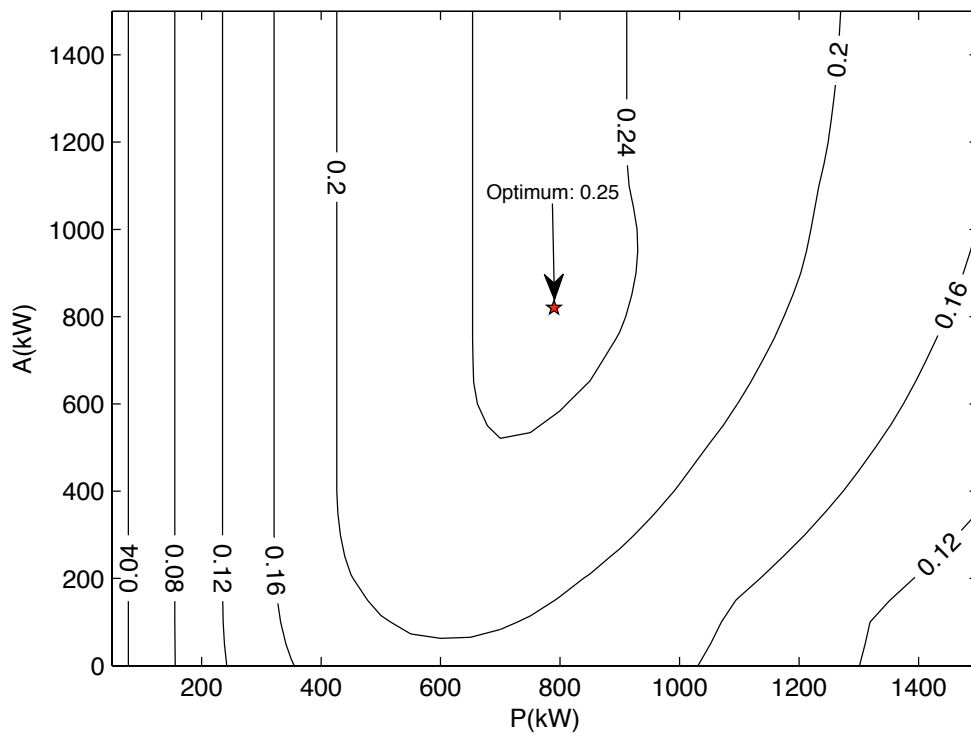
νομείται ενέργεια. Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται οι βέλτιστες στρατηγικές λειτουργίας ανά επιλεγμένο μέγεθος για δύο αντικειμενικά κριτήρια κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στους οποίους παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μεταβολή. Πρέπει να επισημανθεί ότι στην περίπτωση του οικονομικού άριστου, η στρατηγική PS που επιλέχθηκε ήταν παρόμοια σε μεγάλο βαθμό με τη στρατηγική ακολούθησης θερμικών, γι' αυτό και παρουσιάζονται οι εναλλαγές στο διάγραμμα. Για την περίπτωση του περιβαλλοντικού άριστου η βέλτιστη στρατηγική ήταν η ακολούθηση των ηλεκτρικών φορτίων.

Τα πλεονεκτήματα της τριπαραγωγής συγκριτικά με την απλή συμπαραγωγή μπορούν να εξαχθούν, αν παρατηρηθούν τα σημεία που είναι στον άξονα των x . Αυτά τα σημεία απεικονίζουν τις λύσεις που δεν έχουν εγκατεστημένο ψύκτη απορρόφησης ($A = 0$). Σε όλα τα αντικειμενικά κριτήρια υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο πριν από το οποίο η προσθήκη του ψύκτη απορρόφησης έχει μηδενική ή αρνητική επίδραση στην αντικειμενική συνάρτηση. Μετά από αυτό το σημείο, αυξάνοντας το μέγεθος του ψύκτη απορρόφησης, προσεγγίζεται η άριστη τιμή, π.χ. στο Σχήμα 5.12 το σημείο αυτό είναι $P = 600kW$. Η κλίση των ισοϋψών καθορίζει την ευαισθησία του ψύκτη απορρόφησης σε κάθε αντικειμενικό κριτήριο.

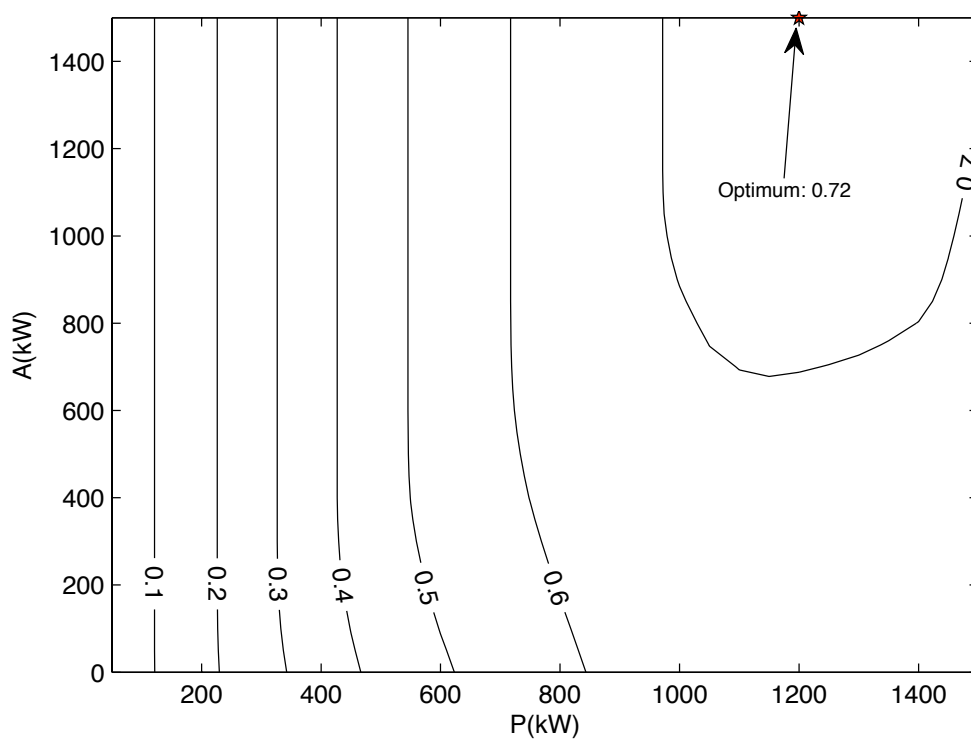


Σχήμα 5.11: Βέλτιστες ισοϋψείς για την καθαρά παρούσα αξία (NPV) (k€)

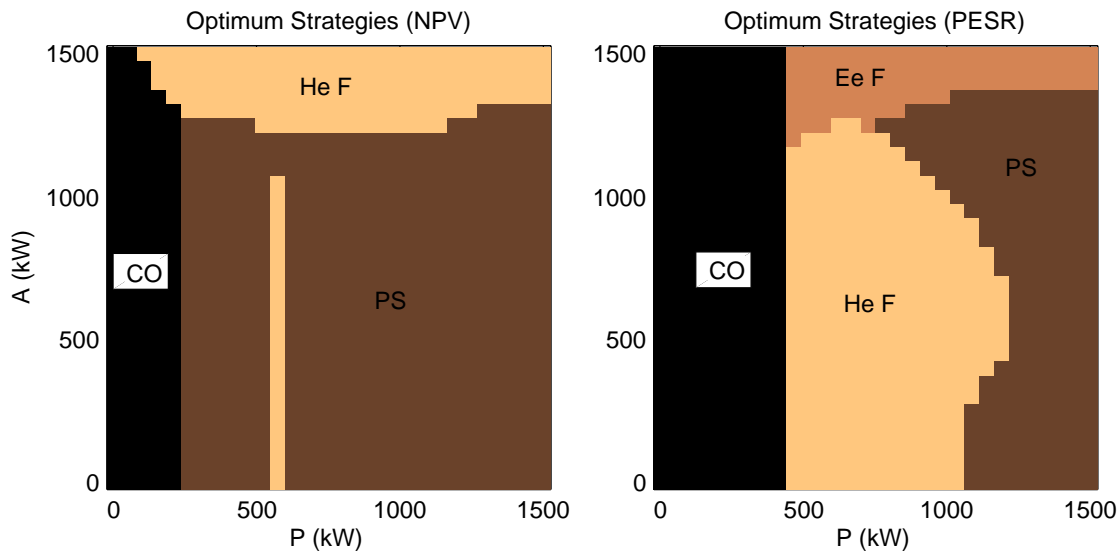
Οι άριστες κατά Pareto λύσεις του προβλήματος πολυστοχικής αριστοποίησης παρουσιάζονται στο διδιάστατο χώρο των μεταβλητών απόφασης στην καμπύλη του Σχήματος 5.15



Σχήμα 5.12: Βέλτιστες ισοϋψείς για το λόγο εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας (PESR)

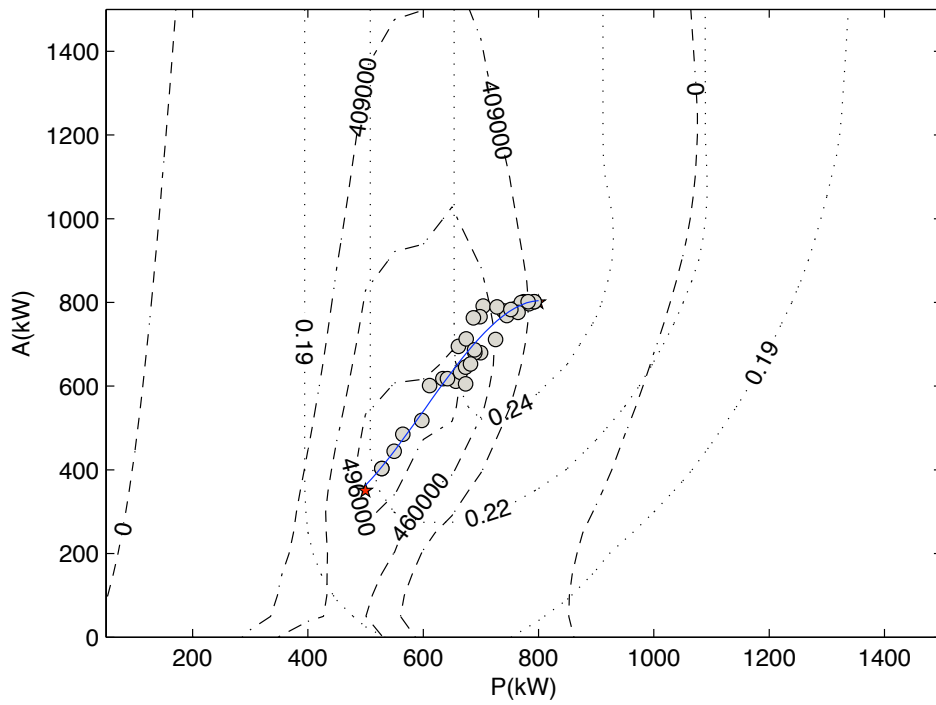


Σχήμα 5.13: Βέλτιστες ισοϋψείς για τη σχετική μείωση εκπομπών (ERR)

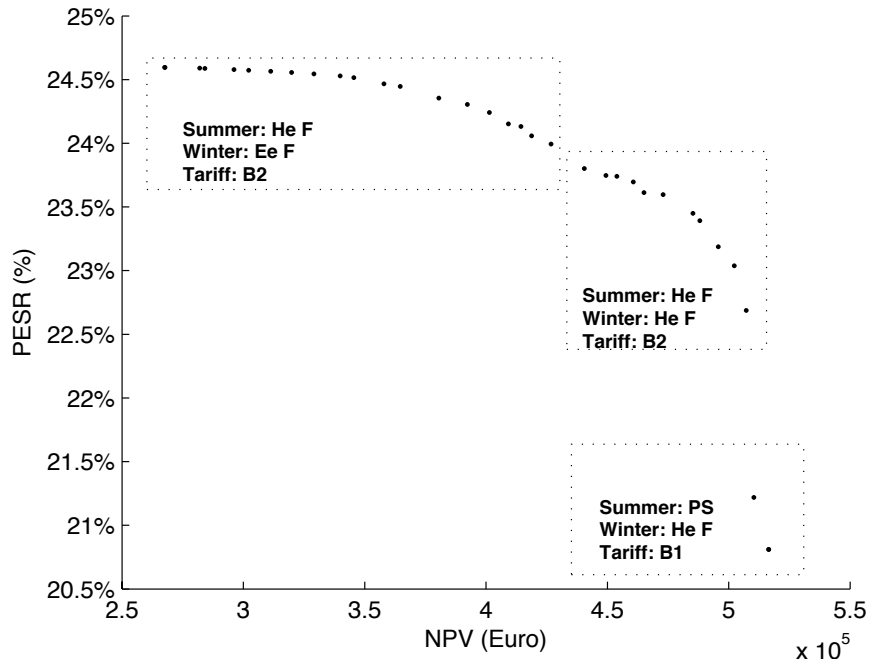


Σχήμα 5.14: Βέλτιστη στρατηγική λειτουργίας ανά μέγεθος για τους καλοκαιρινούς μήνες

επικαλυπτόμενες από τις ισοϋψείς των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου οι παράγωγοι των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι ίσοι, ή αλλιώς όπου οι ισοϋψείς έχουν μόνο ένα κοινό σημείο, αποτελεί το σύνολο των κατά Pareto άριστων λύσεων [98]. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί με αναλυτικό τρόπο μόνο όταν υπάρχουν οι παράγωγοι και μπορούν να υπολογιστούν εύκολα. Σε διαφορετική περίπτωση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί αλγόριθμος για την ταυτόχρονη επίλυση, όπως σε αυτή την περίπτωση. Τα σημεία που φαίνονται στο Σχήμα ανήκουν στις άριστες λύσεις όπως αυτές υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο NSGA-II. Τα σημεία της καμπύλης δείχνουν καθαρά το συμβιβασμό μεταξύ οικονομικού και ενεργειακού άριστου. Είναι φανερό ότι για την επίτευξη υψηλότερης ενεργειακής εξοικονόμησης πρέπει να εγκατασταθεί μεγαλύτερος εξοπλισμός από το οικονομικό άριστο. Η ίδια καμπύλη Pareto παρουσιάζεται στο χώρο αντικειμενικών συναρτήσεων μαζί με τις λειτουργικές μεταβλητές απόφασης στο Σχήμα 5.16. Ανιχνεύθηκαν τρεις ομάδες λύσεων. Τιμές κοντά στο οικονομικό άριστο προτιμώνται με τη στρατηγική *peak shaving* κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και με κάλυψη θερμικών το χειμώνα με το τιμολόγιο B1. Οι λύσεις κοντά στο ενεργειακό άριστο αποδίδουν καλύτερα όταν λειτουργούν με στρατηγικές κάλυψης θερμικών φορτίων το καλοκαίρι και ηλεκτρικών φορτίων το χειμώνα με το τιμολόγιο B2. Για την καλύτερη κατανόηση των εφαρμοσμένων στρατηγικών και των πλεονεκτημάτων της τριπαραγωγής σε κάθε περίπτωση, παρουσιάζονται οι καμπύλες διάρκειας φορτίων των δύο άριστων σημείων του μονοστοχικού προβλήματος στο Σχήμα 5.17. Πέρα από το μεγαλύτερο μέγεθος του κινητήρα στη λύση του ενεργειακού άριστου, φαί-

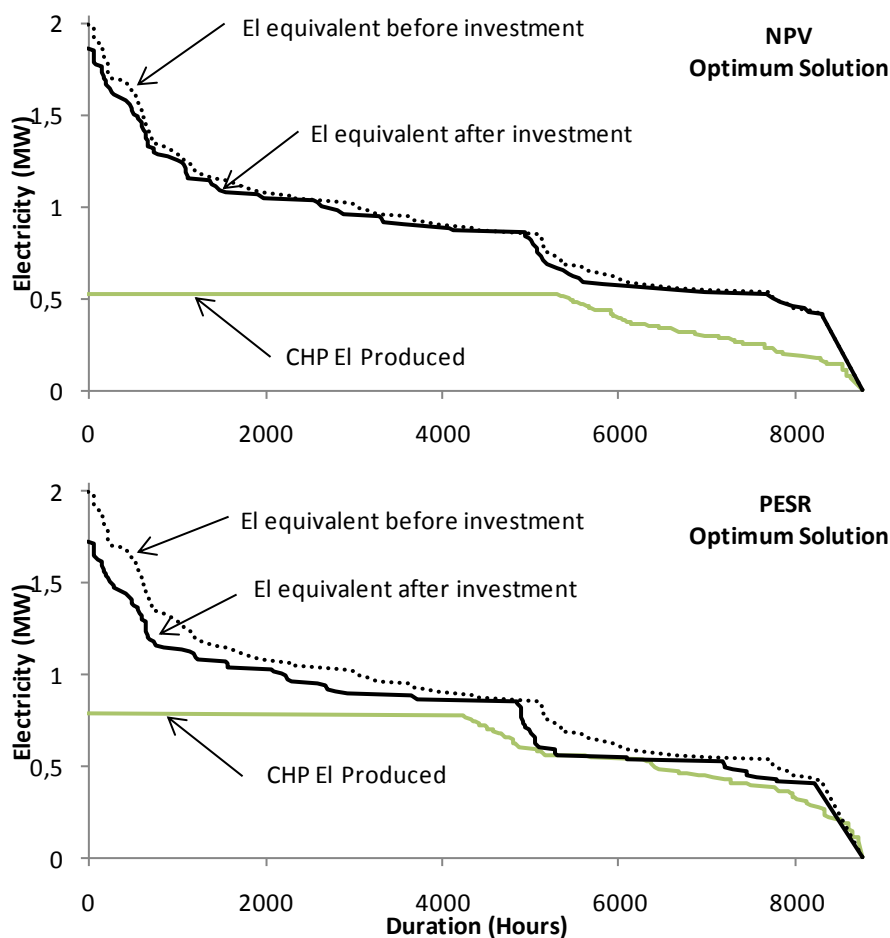


Σχήμα 5.15: Άριστες λύσεις κατά Pareto μεταξύ NPV και PESR στο χώρο μεταβλητών απόφασης



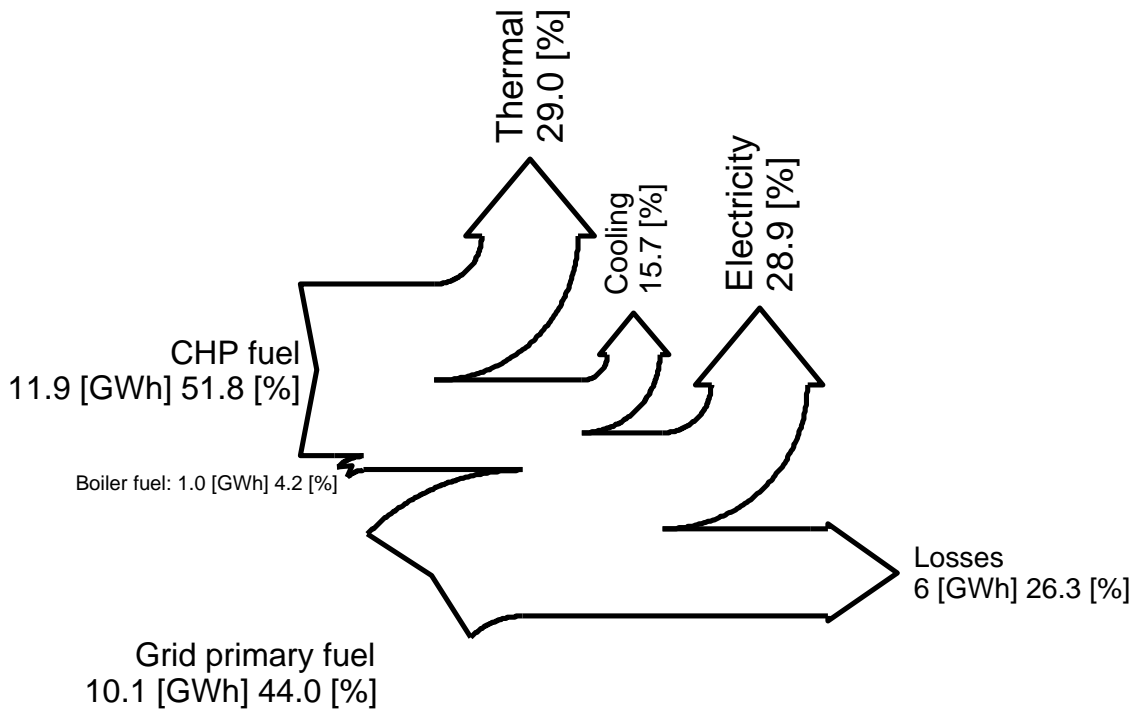
Σχήμα 5.16: Άριστες λύσεις κατά Pareto μεταξύ NPV και PESR στο χώρο αντικειμενικών συναρτήσεων

νεται και η επίδραση της εγκατάστασης ενός μεγαλύτερου ψύκτη απορρόφησης όπου τα ισοδύναμα ηλεκτρικά φορτία (δηλαδή ο ηλεκτρισμός συν τον ηλεκτρισμό για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων) μειώνονται σημαντικά ειδικά στις ώρες αιχμής. Είναι επίσης φανερό ότι οι αιχμιακές ζητήσεις θα πρέπει να καλύπτονται από το δίκτυο, πχ ένα λέβητα, αφού είναι αντιοικονομικό να διαστασιολογείται μια μονάδα ΣΗΘ με βάση τη ζήτηση αιχμής λίγων ωρών ανά έτος. Οι ενεργειακές ροές των δύο άριστων λύσεων παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων Sankey (Σχήματα 5.18 5.19)

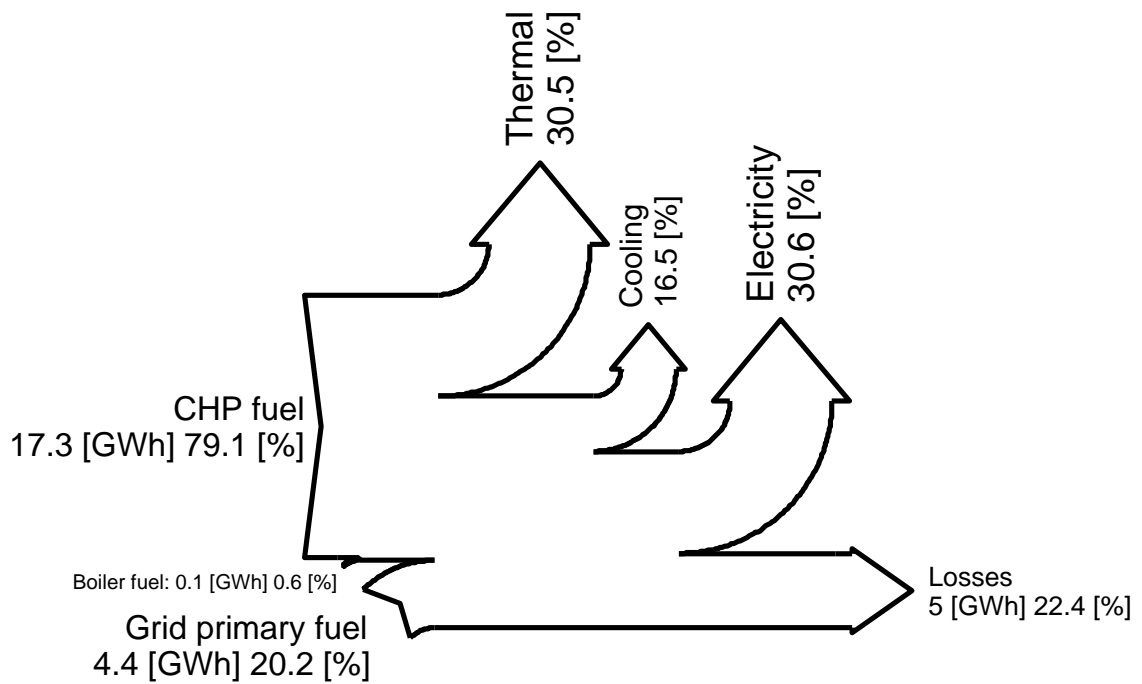


Σχήμα 5.17: Καμπύλες διάρκειας φορτίου για δύο άριστες λύσεις

Η επιλογή τιμολογίου, όπως συζητήθηκε στην ενότητα 3.4.2, είναι συνάρτηση του συντελεστή χρησιμοποίησης. Σύμφωνα με τα τιμολόγια της ελληνικής αγοράς ηλεκτρισμού που παρουσιάστηκαν στο Πίνακα 5.1 το τιμολόγιο B1 προτιμάται έναντι του τιμολογίου B2 όταν ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι πάνω από 50%, δηλαδή όταν τα μέσα φορτία αγοράζονται πιο κοντά στα φορτία αιχμής. Όσο πιο κοντά είναι ο UF στο 50% τόσο η επι-

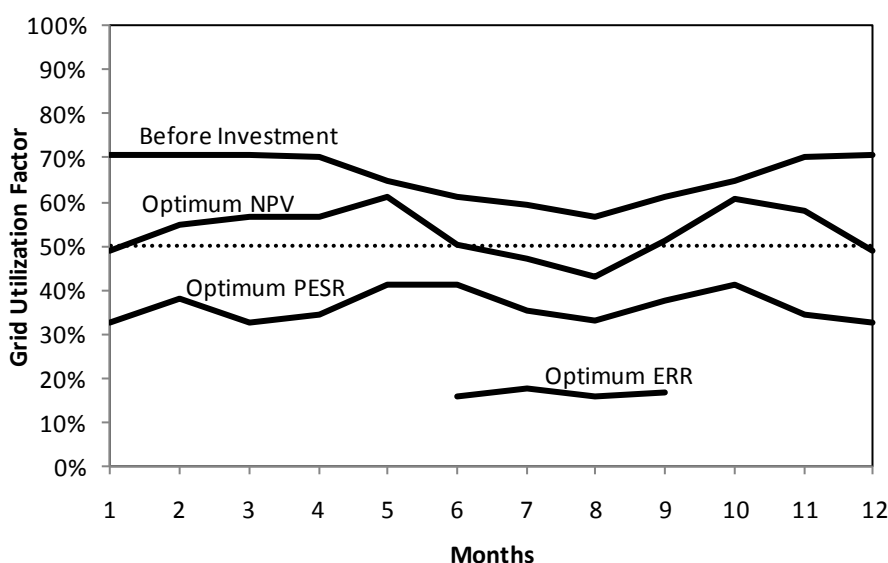


Σχήμα 5.18: Διάγραμμα Sankey για οικονομική άριστη λύση



Σχήμα 5.19: Διάγραμμα Sankey για ενεργειακή άριστη λύση

λογή του τιμολογίου δεν επηρεάζει την οικονομία της επένδυσης. Παρόλαυτα το τιμολόγιο B2 συνήθως προτιμάται καθώς περιέχει λιγότερο ρίσκο, δηλαδή λιγότερη ευαισθησία στο UF . Σε περίπτωση ανεπιθύμητης αιχμής στη ζήτηση, οι χρεώσεις ισχύος θα είναι μικρότερες. Το Σχήμα 5.20 απεικονίζει τις ετήσιες διακυμάνσεις του UF για τις 3 αντικειμενικές συναρτήσεις στο πρόβλημα μονοκριτηριακής αριστοποίησης. Είναι ξεκάθαρο ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησης γίνεται χειρότερος με την εγκατάσταση εξοπλισμού μεγαλύτερου μεγέθους. Το UF για τις άριστες λύσεις του ERR ορίζεται μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες καθώς ο ηλεκτρισμός του δικτύου δεν αγοράζεται κατά τους χειμερινούς μήνες.



Σχήμα 5.20: Σύγκριση του συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου του κτηρίου πριν και μετά την εγκατάσταση, για διαφορετικές άριστες λύσεις

Συνήθως η επιλογή του τιμολογίου μιας εγκατάστασης συμπαραγωγής εξαρτάται από τις τεχνικές διαχείρισης των φορτίων που είχαν εφαρμοστεί πριν την επένδυση. Καθώς ο σχεδιαζόμενος εξοπλισμός μεγαλώνει, ο συντελεστής χρησιμοποίησης UF μικραίνει γιατί ο νέος εξοπλισμός καλύπτει συνήθως ένα σταθερό μέρος των φορτίων (εκτός από την στρατηγική peak shaving). Ως αποτέλεσμα, πρέπει να αγοραστεί λιγότερη ενέργεια αλλά σε πιο ακριβή τιμή.

Η ολοκληρωμένη καμπύλη Pareto του συνολικού προβλήματος αριστοποίησης 3 μεταβλητών παρουσιάζεται στο Πίνακα 5.3. Οι άριστες λύσεις για το πρόβλημα δύο και τριών μεταβλητών δημιουργήθηκε μέσα σε λίγα λεπτά χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο NSGA-II σε έναν Pentium 4 2.2GHz. Για την ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στο άριστο μέτωπο Pareto, οι βέλτιστες λύσεις της μονοκριτηριακής αριστοποίησης συμπεριλαμβάνονται στον

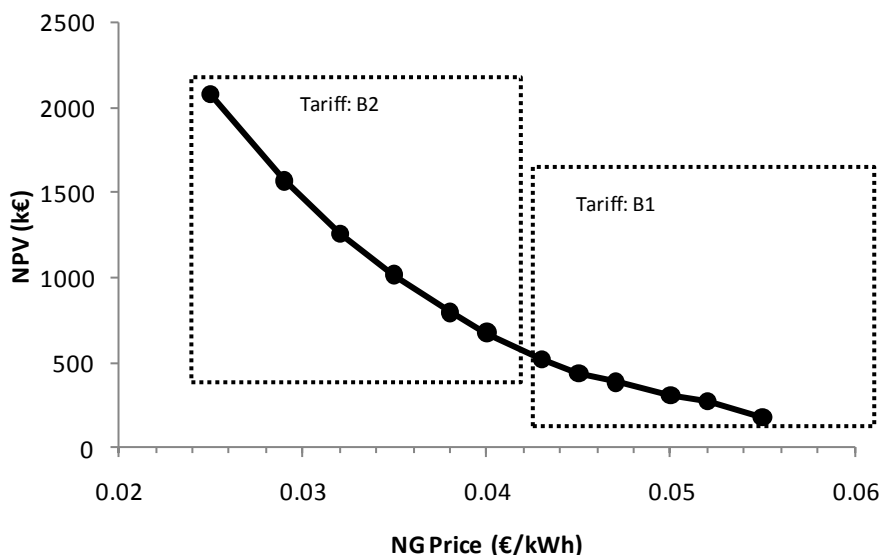
αρχικό πληθυσμό. Οι άριστες λύσεις για κάθε μία από τις τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις έχουν σημειωθεί με έντονα γράμματα. Τα άριστα PESR και ERR απαιτούν μεγαλύτερα μεγέθη του εξοπλισμού και συνήθως έξω από την περιοχή βιωσιμότητας της επένδυσης ($NPV > 0$).

Πίνακας 5.3: Άριστες λύσεις κατα Pareto για 3 αντικειμενικές συναρτήσεις

NPV (κ€)	Στόχος		Μέγεθος (MW)		Τιμολόγιο	Στρατηγική	
	PESR	ERR	P	A		Χειμώνας	Καλοκαίρι
517	20.8%	41.3%	0.53	0.41	B1	He F	PS
504	22.3%	45.8%	0.54	0.48	B2	He F	He F
491	23.4%	49.8%	0.63	0.59	B2	He F	He F
477	23.5%	50.7%	0.66	0.65	B2	He F	He F
457	23.7%	51.4%	0.68	0.75	B2	He F	He F
430	23.9%	54.1%	0.64	0.67	B2	Ee F	He F
409	24.0%	54.4%	0.65	0.85	B2	Ee F	He F
367	24.4%	57.7%	0.72	0.81	B2	Ee F	He F
317	24.5%	59.3%	0.76	0.83	B2	Ee F	He F
267	24.6%	60.7%	0.79	0.82	B2	Ee F	He F
222	23.5%	61.1%	0.74	1.00	B2	Ee F	Ee F
216	23.5%	61.5%	0.75	0.97	B2	Ee F	Ee F
190	23.5%	62.2%	0.76	1.02	B2	Ee F	Ee F
71	23.4%	65.1%	0.82	1.32	B2	Ee F	Ee F
38	23.4%	65.9%	0.83	1.35	B2	Ee F	Ee F
25	23.3%	66.7%	0.85	1.15	B2	Ee F	Ee F
-12	24.0%	64.8%	0.94	0.98	B2	Ee F	He F
-52	23.0%	68.1%	0.89	1.20	B2	Ee F	Ee F
-130	22.5%	69.0%	0.92	1.26	B2	Ee F	Ee F
-160	22.1%	69.4%	0.94	1.00	B2	Ee F	Ee F
-231	22.8%	68.5%	0.90	1.17	B1	Ee F	Ee F
-301	21.0%	70.4%	0.99	1.16	B2	Ee F	Ee F
-380	20.5%	70.8%	1.02	1.39	B2	Ee F	Ee F
-395	20.6%	70.7%	1.02	1.68	B2	Ee F	Ee F
-451	19.9%	71.2%	1.05	1.22	B2	Ee F	Ee F
-481	19.6%	71.3%	1.06	1.27	B2	Ee F	Ee F
-528	19.3%	71.4%	1.08	1.26	B2	Ee F	Ee F

Τέλος, για την κατανόηση της επίδρασης των τιμών του φυσικού αερίου έγινε ανάλυση ευαισθησίας. Είναι προφανές ότι η τιμολογιακή πολιτική επηρεάζει μόνο την οικονομική αντικειμενική συνάρτηση, καθώς το ενεργειακό και περιβλλοντικό άριστο δεν επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις των τιμών. Η περιγραφόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε επαναληπτικά μεταβάλλοντας τις τιμές του φυσικού αερίου. Ο ηλεκτρισμός του δικτύου θεωρήθηκε σταθερός καθώς δεν επηρεάζεται άμεσα από τις διακυμάνσεις των τιμών του πετρελαίου και προσαρμόζεται συνήθως μια φορά το χρόνο. Αυτή η παραδοχή βοήθησε στο συσχετισμό της επίδοσης της τριπαραγωγής με τη διαφορά των τιμών του καυσίμου-ηλεκτρισμού, γνω-

στή και ως spark spread. Καθώς το φυσικό αέριο πλησιάζει την τιμή του ηλεκτρισμού, το spark spread μικραίνει και τα πλεονεκτήματα της τριπαραγωγής εξαφανίζονται. Μετά από ένα σημείο η προσθήκη ενός ψύκτη απορρόφησης είναι μη οικονομική. Αυτή η συσχέτιση παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.21, 5.22. Σε υψηλότερες τιμές, το οικονομικό άριστο μετακινείται σε μικρότερα μεγέθη εξοπλισμού και με μικρότερο εξοπλισμό ο συντελεστής χρησιμοποίησης του δικτύου εισέρχεται στην άριστη περιοχή του τιμολογίου B1 (πάνω από 50% σύμφωνα με το Σχήμα 3.7). Όταν το spark spread γίνεται μεγαλύτερο, το οικονομικό άριστο μετακινείται πιο κοντά στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό άριστο επιτρέποντας την ευκολότερη επιλογή του κατάλληλου κριτηρίου για τη λήψη της απόφασης.

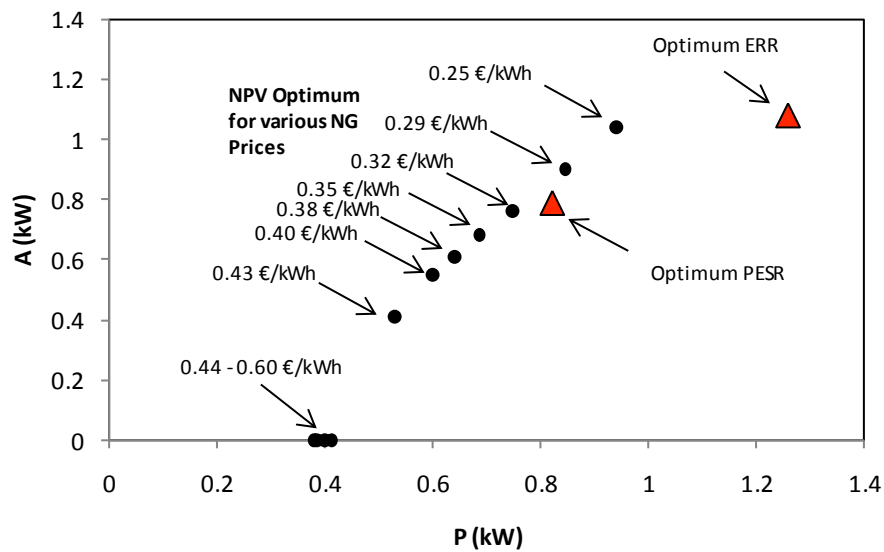


Σχήμα 5.21: Επίδραση της τιμής του φυσικού αερίου στη βιωσιμότητα της επένδυσης

5.3.3 Σχεδιασμός με θεώρηση αβεβαιοτήτων στις βασικές παραμέτρους

Για να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στην αριστοποίηση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες παραδοχές:

1. *Ετήσια μεταβολή ζήτησης:* Υπάρχει πιθανότητα η συνολική απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση, ψύξη και ηλεκτρισμό να μεταβληθεί λόγω πχ. εγκατάσταση νέου εξοπλισμού, άνοδος θερμοκρασίας, μείωση κύκλου εργασιών κλπ. Η πιθανότητα αυτή προσομοιάστηκε με τριγωνική κατανομή με τα εξής χαρακτηριστικά: Ελάχιστη τιμή $\pm 90\%$ πιθανότερη τιμή 100% (=καμία μεταβολή) και μέγιστη τιμή 120% της συνολικής ενέργειας.



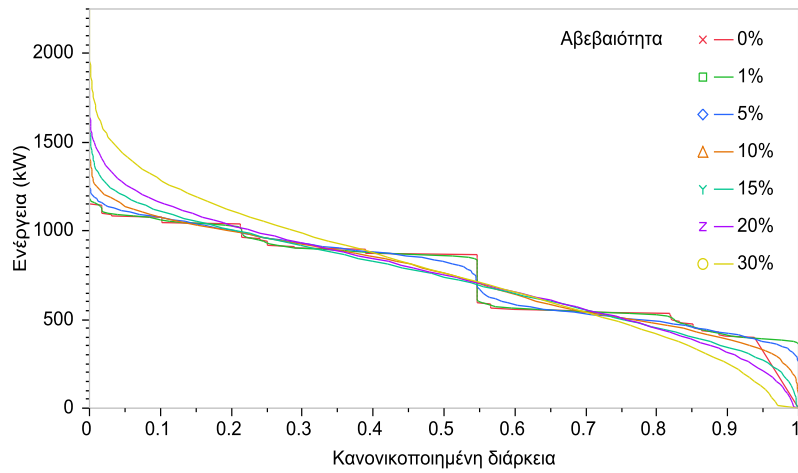
Σχήμα 5.22: Βέλτιστες λύσεις για διάφορες τιμές του φυσικού αερίου

2. *Ωριαία διακύμανση φορτίων*: Το φορτίο ανα πάσα χρονική στιγμή είναι πιθανό να αποκλίνει από τους ιστορικούς μέσους όρους για την ίδια μέρα κατά $\pm u\%$ του μέσου μηνιαίου φορτίου. Η συσχέτιση από ώρα σε ώρα λαμβάνεται επίσης υπόψιν, όπως περιγράφηκε στην εξίσωση Gauss-Markov (4.30). Μια τυπική μορφή της καμπύλης διάρκειας ηλεκτρικών φορτίων που προσομοιώθηκε για διάφορα επίπεδα αβεβαιότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.23. Είναι ξεκάθαρο πως, ενώ τα μέσα φορτία μένουν σταθερά, η αβεβαιότητα επηρεάζει τα φορτία αιχμής και τα φορτία βάσης. Για αυτή τη μελέτη περίπτωσης αυτή επιλέχθηκε $u = 20\%$.
3. *Διακύμανση τιμών φυσικού αερίου*: Η τιμή του φυσικού αερίου (ως το κύριο καύσιμο της εγκατάστασης) κυμαίνεται με βάση μια λογαριθμοκανονική κατανομή με τα εξής χαρακτηριστικά: Μέσος όρος = 0.045 και τυπική απόκλιση 30% από το μέσο όρο δηλαδή 0.0135. Τα χαρακτηριστικά της κατανομής παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.24 ².

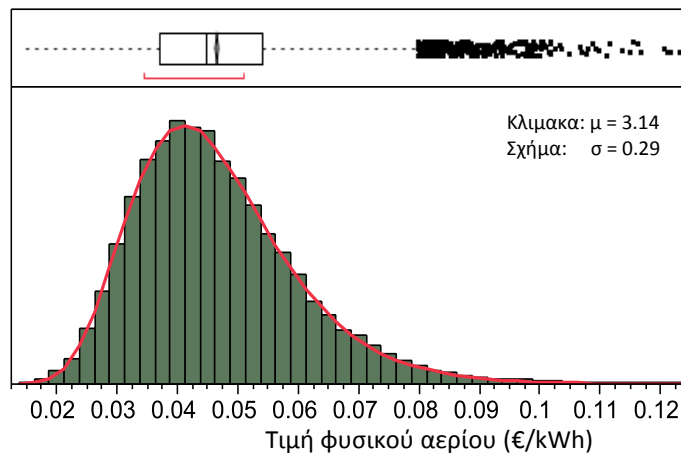
Αποτελέσματα

Για κάθε ενδεχόμενο που προσομοιώθηκε βρέθηκε το βέλτιστο μέγεθος και οι κατάλληλες μεταβλητές που μεγιστοποιούν την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης. Η κατανομή της τελευταίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.25

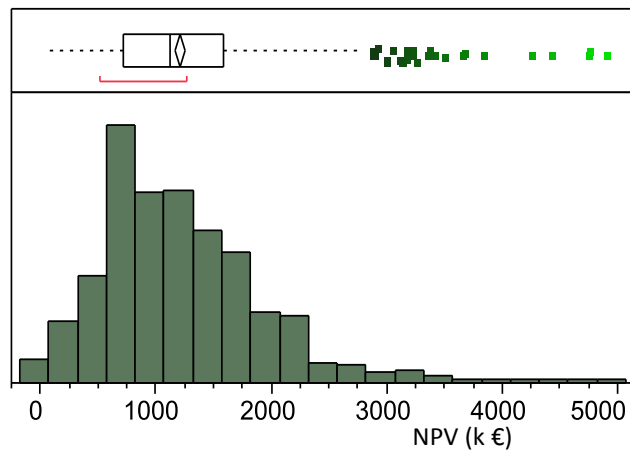
²Ο μετασχηματισμός των επιθυμητών τιμών στα χαρακτηριστικά της κατανομής γίνεται με τις σχέσεις: $\text{LOG}\mu = \ln(\mu) - \frac{1}{2} \ln(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2})$ και $\text{LOG}\sigma = \sqrt{\ln(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2})}$



Σχήμα 5.23: Καμπύλες διάρκειας φορτίων για προσομοιωμένα φορτία για διαφορετικά επίπεδα αβεβαιότητας

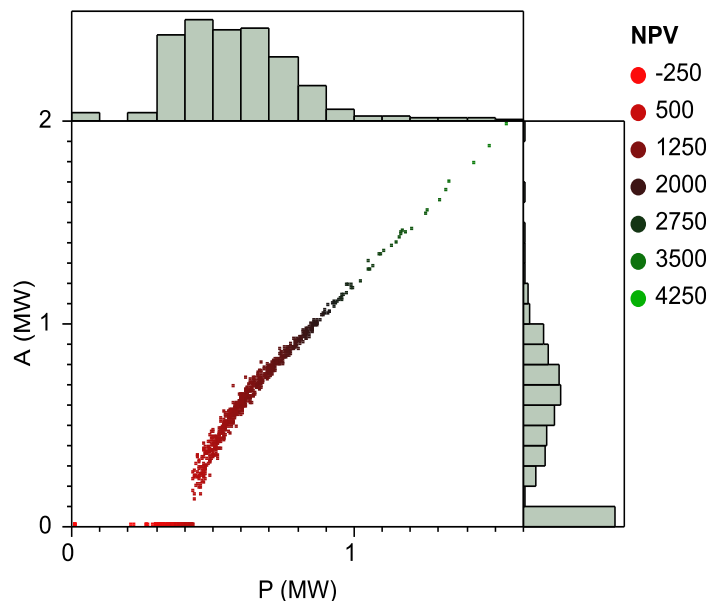


Σχήμα 5.24: Κατανομή τιμών φυσικού αερίου



Σχήμα 5.25: Κατανομή οικονομικής αποδοτικότητας NPV

Φαίνεται ότι η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης παρουσιάζει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας καθώς, όπως αναμενόταν, είναι πολύ ευαίσθητη στη ζήτηση, στα χαρακτηριστικά των ενεργειακών φορτίων και στην τιμή του φυσικού αερίου. Παρόλη την αβεβαιότητα των παραδοχών, μια επένδυση τριπαραγωγής εξακολουθεί να είναι οικονομικά αποδοτική με μέση αναμενόμενη καθαρή παρούσα αξία 1100 k€ και τυπική απόκλιση 690k€. Η πιθανότητα ζημίας είναι πολύ μικρή ($< 0.5\%$). Στο Σχήμα 5.26 απεικονίζονται τα βέλτιστα μεγέθη του εξοπλισμού για κάθε προσομοίωση. Παρατηρείται ότι σε ακραίες συνθήκες η εγκατάσταση



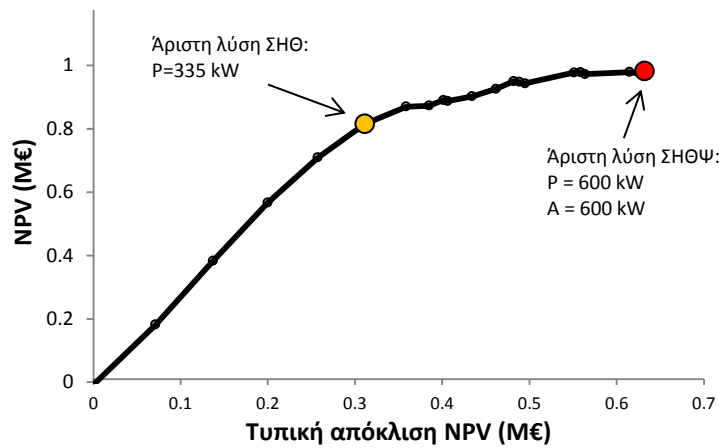
Σχήμα 5.26: Βέλτιστοι συνδυασμοί μεγέθους εξοπλισμού

του ψύκτη απορρόφησης δεν αποτελεί μέρος των βέλτιστων λύσεων. Από ένα σημείο και μετά, όπως αναμενόταν, ο λόγος των μεγεθών του εξοπλισμού ακολουθεί γραμμική σχέση που ανήκει στο γεωμετρικό τόπο των σημείων $\frac{P}{A} = HPR \cdot COP_{ab}$ δηλαδή όταν ο ψύκτης διαστασιολογείται έτσι ώστε να χρησιμοποιεί όλη την ανακτώμενη θερμότητα του κινητήρα. Η βέλτιστη στρατηγική λειτουργίας επηρεάζεται και αυτή από τις παραπάνω αβέβαιες παραδοχές. Για ακραίες τιμές της καθαρής παρούσας αξίας, που συνήθως είναι για ομαλά φορτία και φτηνή ενέργεια, η καλύτερη λύση είναι η λειτουργία σε στρατηγική συνεχούς λειτουργίας. Στο άλλο άκρο των λύσεων, όπου η εγκατάσταση ψύκτη απορρόφησης δεν είναι αποδοτική, η καλύτερη στρατηγική είναι η λειτουργία με ακολούθηση θερμικών φορτίων. Για τις μέσες λύσεις, η βέλτιστη στρατηγική εναλλάσσεται μεταξύ των στρατηγικών κάλυψης ισοδύναμων φορτίων (Eef και HeF). Αντίθετα με τα αποτελέσματα του αιτιοκρατικού σχεδιασμού της προηγούμενης παραγράφου, η στρατηγική peak shaving δεν αποτελεί μέρος των λύσεων που από ότι φαίνεται είναι κατάλληλη για ιδανικά φορτία.

Η επιλογή του κατάλληλου τιμολογίου ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο ξεκάθαρη. Σε όλες τις λύσεις το τιμολόγιο B2, δηλαδή φτηνή ισχύς-ακριβή ενέργεια, δίνει πιο αποδοτικές λύσεις. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς σε αυτό το τιμολόγιο ο συντελεστής χρησιμοποίησης του δικτύου επηρεάζει λιγότερο την τιμή του ηλεκτρισμού. Συνεπώς, η επίδραση των απροσδόκητων προσομοιωμένων αιχμών στη τιμή του ηλεκτρισμού μειώνεται.

Ενώ στο Σχήμα 5.26 φαίνεται καθαρά η κατανομή του βέλτιστου εξοπλισμού ανά περίπτωση, τίθεται το ερώτημα της επιλογής του βέλτιστου μεγέθους. Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί και η βέλτιστη λύση της τριπαραγωγής έναντι της απλής συμπαραγωγής (δηλαδή η βέλτιστη λύση με ή χωρίς τον ψύκτη απορρόφησης). Η επιλογή θα βασιστεί στο συμβιβασμό της επιθυμητής αναμενόμενης καθαρής παρούσας αξίας και στο ρίσκο που είναι διαθέσιμο να αναληφθεί. Είναι δηλαδή μια μορφή πολυστοχικής αριστοποίησης όπου το αναμενόμενο κέρδος και η τυπική διασπορά του είναι αντικρουόμενες μεταβλητές. Για το λόγο αυτό πρέπει να αναλυθεί το πρόβλημα της *λειτουργίας*: Έχοντας ως δεδομένο τα χαρακτηριστικά και το μέγεθος του εξοπλισμού αναλύεται η επίδραση στο λειτουργικό κόστος του κόστους ενέργειας και της διακύμανσης των φορτίων, όπως περιγράφηκαν με τις παραπάνω παραδοχές. Η λύση πρέπει να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς και οι μεταβλητές λειτουργίας να επιλεχθούν έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση κέρδους.

Για κάθε μία από τις λύσεις του Σχήματος 5.26 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Monte Carlo για να βρεθεί η κατανομή της καθαρής παρούσας αξίας. Το σύνολο βέλτιστων επιλογών (efficient frontier) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οριστεί ο συσχετισμός μεταξύ του



Σχήμα 5.27: Σύνορο βέλτιστων επιλογών

αναμενόμενου οφέλους και της αβεβαιότητας. Τα μεγέθη αυτά αναπαραστάθηκαν σε αυτή την περίπτωση με τη μέση τιμή της κατανομής και την τυπική απόκλιση. Στο Σχήμα 5.27 παρουσιάζονται οι βέλτιστοι συνδυασμοί απόδοσης-ρίσκου, δηλαδή η καλύτερη αναμενόμενη οικονομική απόδοση για κάθε επίπεδο αναλαμβανόμενου ρίσκου. Οποιοσδήποτε συνδυασμός κάτω από την καμπύλη δεν είναι κατα Pareto βέλτιστος, που σημαίνει ότι υπάρχει μια άλλη λύση που με το ίδιο ρίσκο έχει περισσότερα οφέλη. Έχει επίσης σημειωθεί η άριστη λύση ΣΗΘ και η άριστη λύση ΣΗΘΨ. Παρατηρείται ότι η επένδυση σε εξοπλισμό απλής συμπαραγωγής βρίσκεται στη μέση της καμπύλης, δηλαδή περιέχει λιγότερο κέρδος αλλά και ρίσκο σε σχέση με τη τριπαραγωγή. Αυτό εξηγείται καθώς σε περίπτωση υψηλών τιμών φυσικού αερίου ή χαμηλής ζήτησης ενέργειας (όπως προσομοιώθηκε από τις ανωτέρω κατανομές), θα αφήσει τον (ακριβότερο) εξοπλισμό αχρησιμοποίητο.

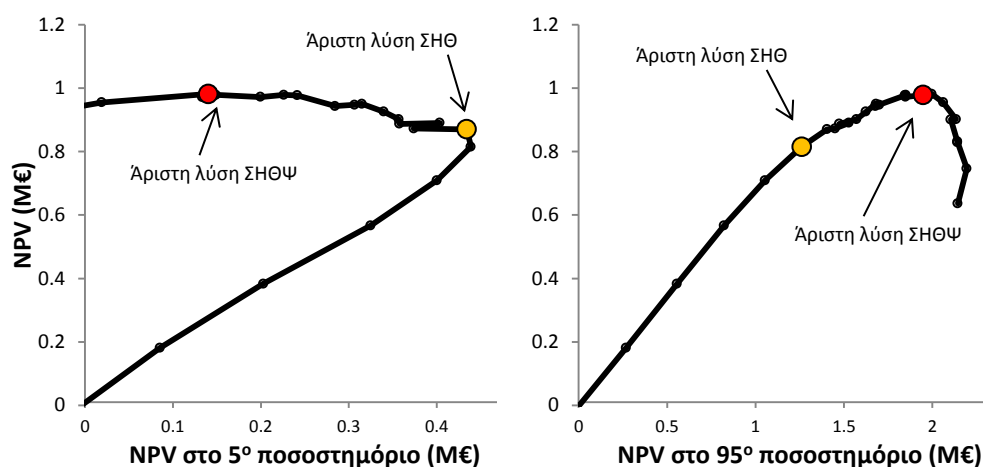
Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των κατανομών NPV για 4 χαρακτηριστικές λύσεις του συνόλου βέλτιστων επιλογών.

Πίνακας 5.4: Παράμετροι στατιστικών κατανομών για διάφορες άριστες λύσεις

P (MW)	A (MW)	NPV (M€)					
		μ	σ	Q 5%	Q 95%	Λοξότητα	Κυρτότητα
0.13	0	0.383	0.137	0.203	0.556	-1.83	8.94
0.33	0	0.815	0.311	0.439	1.262	-1.42	7.80
0.60	0.60	0.982	0.632	0.140	1.996	-0.40	3.81
0.87	0.90	0.747	0.832	-0.361	2.195	0.07	3.18

Το μέγεθος της λοξότητας και του πάχους των ουρών (κυρτότητας), δηλαδή της εμφάνισης ενδεχομένων μακριά από τη μέση τιμή ποικίλει για τις διάφορες λύσεις³. Ειδικά τα

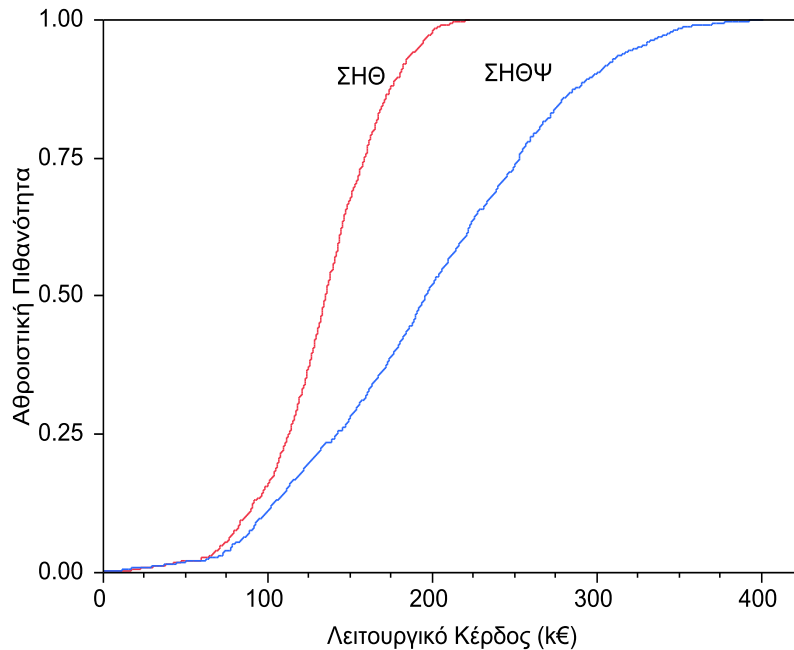
³Η λοξότητα είναι ένα μέτρο της ασυμμετρίας και η κυρτότητα ένα μέτρο της αιχμηρότητας και των "παχιών



Σχήμα 5.28: Σύνορο βέλτιστων επιλογών για ακραίες (θετικά ή αρνητικά) τιμές της NPV

χαρακτηριστικά των ουρών μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή. Για παράδειγμα, αν παρατηρηθούν οι λύσεις στη 3η και 4η σειρά του Πίνακα 5.4, διαπιστώνεται ότι, ενώ η λύση στη σειρά 4 έχει μεγαλύτερη αναμενόμενη οικονομική απόδοση και μικρότερο ρίσκο, έχει μεγαλύτερη λοξότητα και κυρτότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιέχουν ακραία ενδεχόμενα. Συνεπώς μια παχύτερη ουρά της κατανομής δείχνει ότι ακραία γεγονότα μπορούν να συμβούν πιο συχνά και με μεγαλύτερη επίδραση στην αναμενόμενη τιμή.

Το παραπάνω γεγονός, δηλαδή η απόφαση για την ανάληψη ρίσκου για ακραία αρνητικά (ή θετικά) ενδεχόμενα, καμιά φορά είναι πιο σημαντικό από την ίδια την αναμενόμενη (μέση) τιμή. Συνήθως χρησιμοποιείται ο όρος Value-at-Risk (VaR) όπου ποσοτικοποιείται η μέγιστη απώλεια για ένα αποδεκτό διάστημα εμπιστοσύνης. Στη δεδομένη περίπτωση, για την απεικόνιση ακραίων γεγονότων χρησιμοποιείται το άνω και κάτω 5^ο ποσοστημόριο. Από τις παραπάνω κατανομές της προσομοίωσης βρέθηκαν τα εν λόγω μεγέθη και αναπαράστηκαν με τη μορφή καμπύλης βέλτιστου συνόρου στο Σχήμα 5.28. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνονται τα εξαιρετικά αρνητικά ενδεχόμενα και στο δεύτερο τα θετικά. Για κάθε επιθυμητό επίπεδο της καθαρής παρούσας αξίας παρουσιάζεται η μεγαλύτερη καθαρή παρούσα αξία στο 5^ο (Q5) ποσοστημόριο και στο 95^ο (Q95) ποσοστημόριο. Όλα τα σημεία που είναι έξω από το "φάκελο" που σχηματίζεται είναι μη εφικτά, ενώ όσα είναι μέσα μη βέλτιστα, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Οι δύο άριστες λύσεις της καμπύλης 5.27 εξακολουθούν να είναι άριστες και με αυτά τα κριτήρια. Παρατηρείται όμως ότι η λύση της απλής συμπαραγωγής είναι πιο συντηρητική από την τριπαραγωγή καθώς παρουσιάζει μικρότερο πιθανό όφελος αλλά και μικρότερη πιθανή ζημία σε ακραία ενδεχόμενα. Αυτό ουρών" (fat tails). Η λοξότητα και η κυρτότητα μιας κανονικής κατανομής είναι 0 και 3 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.29: Στοχαστική επικράτηση της λύσης της τριπαραγωγής έναντι της απλής συμπαραγωγής

συμβαίνει γιατί υπάρχει περίπτωση να μην μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα οικονομικά και συνεπώς το επιπλέον κόστος της επένδυσης να μείνει αναξιοποίητο. Αν παρουσιαστεί όμως το καθαρό λειτουργικό όφελος από την εγκατάσταση της συμπαραγωγής, χωρίς να υπολογιστούν δηλαδή τα κεφαλαιουχικά κόστη, τότε η στοχαστική επικράτηση της λύσης της τριπαραγωγής είναι ολοφάνερη. Στο Σχήμα 5.29 παρουσιάζεται η αθροιστική κατανομή πιθανότητας για τις δύο άριστες λύσεις του Πίνακα 5.4. Υπάρχει πάνω από 95% πιθανότητα η εγκατάσταση τριπαραγωγής να έχει—μέχρι και 2 φορές—μεγαλύτερο λειτουργικό όφελος από την απλή εγκατάσταση συμπαραγωγής. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η σύγκριση των πλεονεκτημάτων και των επιπλοκών των διαφορετικών λύσεων.

Αυτά τα κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν τη διακύμανση της οικονομίας της εγκατάστασης και να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων σε συνθήκες υψηλού ρίσκου, όπως είναι ο τομέας της ενέργειας. Παρ'όλα αυτά, το αναλαμβανόμενο ρίσκο δεν μπορεί να αγνοηθεί και πρέπει να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα μείωσής του.

Κεφάλαιο 6

Απλοποιημένος σχεδιασμός και αξιολόγηση λειτουργικής βιωσιμότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μέθοδος για απλοποιημένο σχεδιασμό εγκαταστάσεων τριπαραγωγής. Για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε εμπειρικό μοντέλο βασισμένο στην καμπύλη διάρκειας φορτίου και το συγχρονισμό τους. Μελετάται η επίδραση αυτών των χαρακτηριστικών στο άριστο μέγεθος και στις βέλτιστες λειτουργικές παραμέτρους με τη χρήση παρένθετου προτύπου. Επίσης, συγκρίνεται η βιωσιμότητα των εγκαταστάσεων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής ως συνάρτηση των τιμών ενέργειας και εξάγονται εμπειρικοί κανόνες.

6.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι η ακρίβεια μιας μελέτης βιωσιμότητας μιας εγκατάστασης για οποιονδήποτε καταναλωτή μπορεί να βελτιωθεί, αν είναι γνωστή η σχέση των ενεργειακών φορτίων με το χρόνο. Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε και επιλύθηκε το πρόβλημα της αριστοποίησης για μια συγκεκριμένη εγκατάσταση, δηλαδή για δεδομένα φορτία με ορισμένο βαθμό αβεβαιότητας όσον αφορά στη συνολική ζήτηση ενέργειας. Για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε ένα ωριαίο πρότυπο, αφού κατά το σχεδιασμό τέτοιων εγκαταστάσεων δεν έχει σημασία μόνο η συνολική ετήσια ζήτηση ενέργειας αλλά και δύο ακόμη ποιοτικά χαρακτηριστικά της: Η κατανομή της ζήτησης στη διάρκεια του χρόνου και ο συγχρονισμός των φορτίων ηλεκτρισμού, θερμότητας, ψύξης.

Για να γίνει πιο κατανοητό το παραπάνω, υπενθυμίζεται το παράδειγμα των νοσοκομείων που, όπως αναφέρθηκε, είναι κατάλληλοι υποψήφιοι για εγκαταστάσεις τριπαραγωγής λόγω του πιο σταθερού ωράριου λειτουργίας και των συγχρονισμένων ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων. Η ακρίβεια των ενεργειακών επιλογών για έναν καταναλωτή μπορεί να βελτιωθεί αν ληφθεί υπόψη η σχέση μεταξύ ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας, πληροφορία που δεν

είναι συχνά διαθέσιμη. Είναι απαραίτητο λοιπόν, εκτός από τα ποσοτικά, να συνδεθούν τα παραπάνω ποιοτικά χαρακτηριστικά των ενεργειακών φορτίων με τους δείκτες επίδοσης που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο για τη γρήγορη αξιολόγηση της βιωσιμότητας. Επίσης στο δεύτερο μέρος αυτού του Κεφαλαίου, για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής ως συσκευές μετατροπής ενέργειας, αναπτύσσεται ένας θεωρητικός δείκτης για τη σύγκριση και τον καθορισμό της περιοχής βιωσιμότητας μιας δεδομένης επένδυσης κατά τη λειτουργία της, ανάλογα με τη διακύμανση των τιμών πρωτογενούς ενέργειας.

6.2 Απλοποιημένος σχεδιασμός

Σε προηγούμενα κεφάλαια, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε σε συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης ένα πρότυπο αριστοποίησης μονάδων τριπαραγωγής. Το πρότυπο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει και να αναλύσει οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, εφόσον τηρούνται οι βασικές παραδοχές, δηλαδή η ζήτηση ενέργειας να είναι στην ίδια ποιότητα (επίπεδα θερμοκρασίας για θέρμανση και ψύξη) και μέσα στο εύρος χωρητικότητας του εξοπλισμού, όπως έχει οριστεί στις εξισώσεις του προτύπου.

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η εξαγωγή ενός προτύπου με γενικευμένες μεταβλητές που περιγράφουν τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός καταναλωτή με σκοπό τον καθορισμό των κρίσιμων μεταβλητών για την οικονομική βιωσιμότητα και την ενεργειακή αριστεία του συστήματος. Το πρότυπο αυτό θα συνεισφέρει στη εξαγωγή εμπειρικών κανόνων για την κατανόηση της σχέσης των χαρακτηριστικών των φορτίων και της βιωσιμότητας της επένδυσης και τον προσδιορισμό των μεταβλητών σχεδιασμού.

6.2.1 Προτυποποίηση των φορτίων

Για την προτυποποίηση του προφίλ ενός ενεργειακού καταναλωτή χρησιμοποιούνται τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τα στατιστικά (ποιοτικά) χαρακτηριστικά των φορτίων, δηλαδή η κατανομή των φορτίων, ανά έτος.
- Ο συγχρονισμός των ηλεκτρικών θερμικών και ψυκτικών φορτίων μεταξύ τους.

Στατιστική περιγραφή φορτίων

Η πρόβλεψη των φορτίων είναι γενικά μια τυχαία διαδικασία που εξαρτάται από ξεχωριστά στοιχεία και έτσι το εύρος των δυνατών προσεγγίσεων είναι μεγάλο. Στα πλαίσια της πρόβλεψης της συμπεριφοράς των φορτίων για συστήματα συμπαραγωγής έχουν χρησιμοποιηθεί απλά πρότυπα, όπως απλές ημιτονοειδής σχέσεις με ημερήσια, εβδομαδιαία και εποχιακή εποχικότητα που όμως δεν λαμβάνουν υπόψιν κανένα επιπλέον παράγοντα. Ως επέκταση των προηγούμενων, αναπτύχθηκαν πρότυπα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης που συσχετίζουν την ωριαία ζήτηση με διάφορους αιτιοκρατικούς συντελεστές, όπως θερμοκρασία, ηλιοφάνεια, ταχύτητα ανέμου και υγρασία ή άλλα οικονομικά δεδομένα [99]. Μια άλλη μέθοδος που γίνεται όλο και πιο δημοφιλής είναι με μοντέλα στοχαστικών χρονοσειρών, όπως αυτοπαλινδρομούμενα μοντέλα ολοκληρωμένου κινητού μέσου όρου (ARIMA) [100, 101]. Με αυτές τις μεθόδους η πρόβλεψη της ζήτησης προτυποποιείται συναρτήσει των προγενέστερων τιμών του φορτίου και όχι βάσει κάποιων φυσικών παραμέτρων. Παρόλο που οι παραπάνω μέθοδοι είναι αρκετά ακριβείς και πολύ απλές στην εφαρμογή, δεν είναι κατάλληλες για χρήση στα πλαίσια αυτής της μελέτης. Στην παρούσα ενότητα απαιτείται μόνο η στατιστική περιγραφή των ετήσιων διανυσμάτων ζήτησης και θα χρησιμοποιηθεί η καμπύλη διάρκειας φορτίου (ΚΔΦ), όπως έχει ήδη περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3.4.1. Στις κανονικοποιημένες ΚΔΦ προς τον χρόνο (άξονας x), κάθε σημείο του άξονα αντιπροσωπεύει το ποσοστό της χρονικής περιόδου στην οποία το φορτίο είναι ίσο ή υπερβαίνει την αντίστοιχη ισχύ. Πηγαίνοντας ένα βήμα παρακάτω, ο άξονας των x μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστά την πιθανότητα μια συγκεκριμένη τιμή του φορτίου να είναι ίση ή μεγαλύτερη ανά πάσα χρονική στιγμή.

Στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν πολλές αναλυτικές και εμπειρικές προσεγγίσεις της ΚΔΦ. Το λογισμικό WASP (Wien Automatic System Planning) που χρησιμοποιείται εκτενώς για τον προγραμματισμό επέκτασης μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, προσαρμόζει την ΚΔΦ με μια πολυωνυμική εξίσωση 5ου βαθμού [102]. Η αντεστραμμένη αθροιστική λογαριθμο-κανονική κατανομή φαίνεται να έχει ίδια μορφή με μια ΚΔΦ και να την προσεγγίζει ικανοποιητικά [103] αλλά συνήθως υπάρχει δυσκολία στην προσαρμογή των φορτίων αιχμής, γεγονός που την καθιστά μη αποδεκτή για την παρούσα εφαρμογή. Ο Roulin et. al [26] προτείνει μια σχέση 6 εμπειρικών παραμέτρων που προσομοιώνει την συμπεριφορά των ειδικών χαρακτηριστικών, όπως τη διάρκεια φορτίων αιχμής ή την κλίση των φορτίων βάσης. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ευρείας τεχνολογικής ανάπτυξης, έχουν εισαχθεί νεότερες μέθοδοι πρόβλεψης, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, που επιτρέπουν και την ανάπτυξη και την εργασία σε πραγματικό χρόνο [104, 105].

Οι παραπάνω σχέσεις, ενώ προσεγγίζουν τη καμπύλη με ικανοποιητική ακρίβεια, είτε είναι πολύπλοκες στη χρήση τους είτε χρησιμοποιούν παραμέτρους που δεν μπορούν να εκφράσουν κάποιο φυσικό μέγεθος. Στα πλαίσια της διατριβής είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μια σχέση όπου όλες οι παράμετροι θα έχουν φυσικό νόημα έτσι ώστε να μπορούν να προσομοιώσουν τα επιθυμητά ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των φορτίων σε ετήσια βάση. Για τους παραπάνω λόγους, προτείνεται το αναλυτικό πρότυπο της εξίσωσης (6.1) για την αντίστροφη συνάρτηση της καμπύλης διάρκειας φορτίου (*ILDC*). Το πρότυπο αυτό αναπαριστά την *ILDC* ως συνάρτηση του μέγιστου φορτίου (αιχμής) P , του ελάχιστου φορτίου (βάσης) και της συνολικής ενέργειας E που καταναλώθηκε σε δεδομένο χρόνο h . Η συνολική ενέργεια αντιστοιχεί στο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη ενώ τα φορτία ισχύος και βάσης στο ποσοστημόριο 100% και 1% της συνολικής χρονοσειράς αντίστοιχα. Η εξίσωση αυτή έχει ως πεδίο ορισμού το $\{x \in \{0, P\}\}$ και πεδίο τιμών $\{f(x) \in \{0, 1\}\}$, όπου x η ισχύς σε δεδομένη στιγμή.

$$f(x; P, B, E, h) = \begin{cases} \frac{P-x}{P-B} \frac{\frac{P-E}{h}}{\frac{E}{h}-B} & , B < x < P \\ 1 & , x < B \\ 0 & , x > P \end{cases} \quad (6.1)$$

Για να γίνει η παραπάνω εξίσωση πιο γενικευμένη, τα φορτία και η συνολική ενέργεια κανονικοποιούνται ως εκφράσεις της ισχύος χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$CF = \frac{E}{P \cdot h} \quad (6.2)$$

$$BF = \frac{B}{P} \quad (6.3)$$

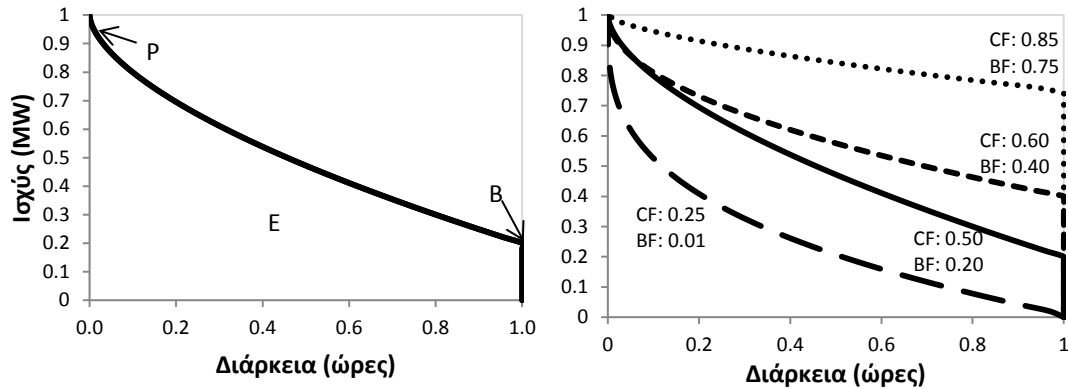
όπου CF ο ο συντελεστής φορτίου, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.4.1, και BF ο λόγος φορτίου βάσης προς μέγιστο φορτίο. Η εξίσωση (6.1) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$f(x; P, CF, BF) = \begin{cases} \frac{P-x}{P-BF \cdot P} \frac{CF-1}{BF-CF} & , BF \cdot P < x < P \\ 1 & , x < BF \cdot P \\ 0 & , x > P \end{cases} \quad (6.4)$$

Επειδή πάντα το μέσο φορτίο είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το ελάχιστο φορτίο σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, τίθεται ο εξής περιορισμός στην εξίσωση (6.4): ο λόγος φορτίων βάσης προς φορτία αιχμής να είναι μικρότερος από το λόγο των μέσων φορτίων προς τα

φορτία αιχμής ή αλλιώς $BF < CF$.

Η συνάρτηση επιστρέφει πάντα την πιθανότητα εμφάνισης ενός φορτίου ή αλλιώς την κανονικοποιημένη διάρκεια κάθε φορτίου. Για να βρεθεί ή συνολική διάρκεια του φορτίου, πολλαπλασιάζεται η παραπάνω συνάρτηση με τις ώρες λειτουργίας (h). Στο Σχήμα 6.1 πα-



Σχήμα 6.1: Πρότυπες κανονικοποιημένες καμπύλες διάρκειας φορτίου

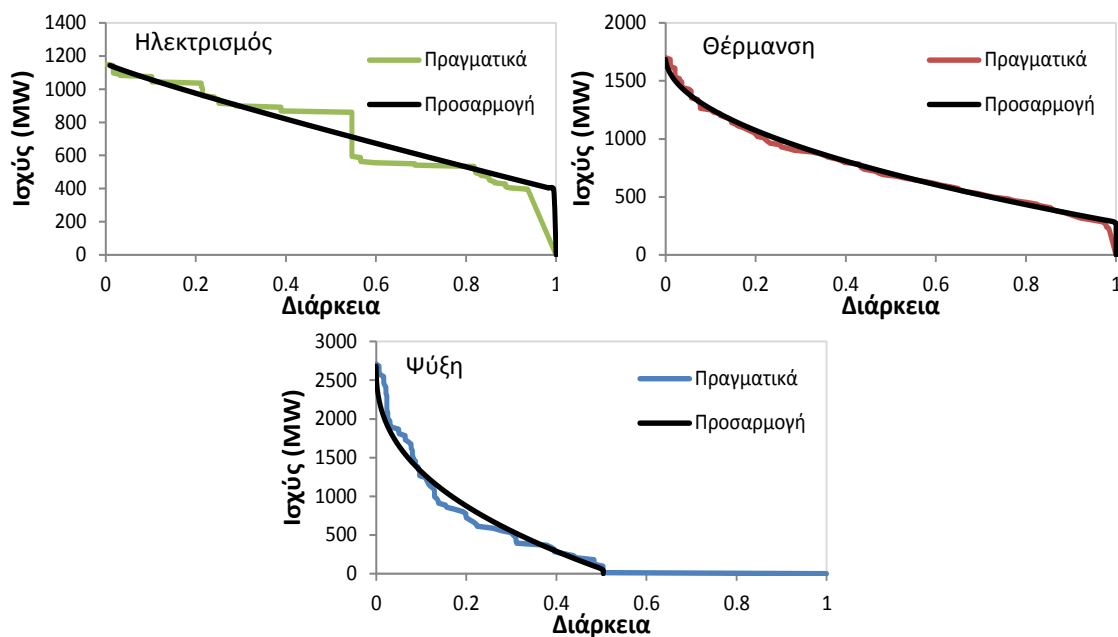
ρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της εξίσωσης (6.1) και μερικές τυπικές μορφές της (6.4). Για την επαλήθευση του μοντέλου εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά των φορτίων που χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η προσαρμογή στα φορτία έγινε με ικανοποιητική ακρίβεια (Σχήμα 6.2). Το σχετικό σφάλμα συνολικής ενέργειας κυμαίνεται γύρω στο 1%. Οι παράμετροι που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1 είναι ίδιες με αυτές που προκύπτουν από τον αναλυτικό υπολογισμό τους. Σημειώνεται ότι σε μη πρότυπα φορτία η προσαρμογή είναι ακόμα πιο ακριβής, καθώς η πραγματική καμπύλη είναι πιο ομαλή λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα τους (πχ. Σχήμα 5.23). Το πρότυπο που περιγράφηκε αφού έχει ίδια μορφή με

Πίνακας 6.1: Παράμετροι προσαρμογής

	Ηλεκτρισμός	Θερμότητα	Ψύξη
P	1155	1707	2722
CF	65.2%	44.5%	30.0% ¹
BF	34.0%	12.6%	4.8%
h	8760	8760	4416
$\delta E\%$	-0.10%	-1.60%	-1.80%

μια αθροιστική καμπύλη πιθανότητας (CDF) μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής $\mathcal{U}(0,1)$ για την αναπαραγωγή τυχαίων χρονοσει-

¹Ο συντελεστής χρησιμοποίησης αφορά μόνο τις ώρες λειτουργίας h και όχι όλο το χρόνο



Σχήμα 6.2: Προσαρμογή της εξίσωσης (6.4) σε πραγματικά φορτία

ρών με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Καθώς όμως η εξίσωση (6.4) δεν είναι αντιστρεπτή, πρέπει να χρησιμοποιηθεί αριθμητική μέθοδος για την επίλυσή της.

Συγχρονισμός φορτίων

Ο σχεδιασμός χρησιμοποιώντας μόνο την καμπύλη διάρκειας φορτίου σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ικανοποιητικός στα πλαίσια του προκαταρκτικού σχεδιασμού ενεργειακών συστημάτων. Στην περίπτωση του σχεδιασμού εγκαταστάσεων τριπαραγωγής όμως δεν είναι αρκετός καθώς η πληροφορία της συσχέτισης των φορτίων (ηλεκτρικών - θερμικών - ψυκτικών) χάνεται με τις ΚΔΦ [58]. Κατά τη λειτουργία μιας εγκατάστασης τα φορτία συσχετίζονται μεταξύ τους ανάλογα με το ωράριο λειτουργίας, την εποχικότητα και άλλους παράγοντες που περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Το σχεδιασμένο πρότυπο της προηγούμενης παραγράφου, ενώ περιγράφει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του φορτίου παράγει εντελώς ανεξάρτητες χρονοσειρές. Αυτό δεν είναι επιθυμητό επειδή μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα κατά την προσομοίωση της λειτουργίας της τριπαραγωγής, καθώς ο χρονικός συγχρονισμός των φορτίων είναι μια από τις βασικές παραμέτρους που καθορίζουν την αποτελεσματικότητά της. Για αυτό το λόγο προτείνεται να χρησιμοποιη-

ηθεί για την περιγραφή της συσχέτισης των φορτίων ο συντελεστής Pearson ρ :

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (6.5)$$

όπου , οι χρονοσειρές των δυο μεταβλητών, $\text{cov}()$ η διακύμανσή τους, E η αναμενόμενη τιμή μ ή μέση τιμή και σ η τυπική απόκλιση. Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμή 1 όταν υπάρχει απόλυτη θετική συσχέτιση (ταύτιση), -1 όταν υπάρχει αρνητική συσχέτιση, και 0 όταν δεν υπάρχει καμία απολύτως συσχέτιση. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζεται ανά ζεύγος ο συντελεστής Pearson των φορτίων του παραδείγματος του Κεφαλαίου 5. Όπως αναμενόταν

Πίνακας 6.2: Συσχετισμός ενεργειακών φορτίων

	Ηλεκτρισμός	Θερμότητα	Ψύξη
Ηλεκτρισμός	1	0.465	0.269
Θερμότητα	0.465	1	-0.459
Ψύξη	0.269	-0.459	1

φαίνεται η αρνητική συσχέτιση των φορτίων ψύξης και θέρμανσης (λόγω της καλοκαιρινής περιόδου) καθώς και η θετική συσχέτιση των φορτίων θέρμανσης ηλεκτρισμού (λόγω των ωραρίων λειτουργίας).

Μεθοδολογία συγχρονισμού Για να συσχετιστούν οι τυχαίες χρονοσειρές μεταξύ τους αρκεί τα 3 διανύσματα τυχαίων αριθμών που θα εισαχθούν στην εξίσωση συχνότητας (6.4) να έχουν την επιθυμητή συσχέτιση. Μαθηματικά αυτό μπορεί να διατυπωθεί χρησιμοποιώντας την παραγοντοποίηση Cholesky. Έστω πίνακας X με μέγεθος $[L \times N]$, όπου L το μήκος της κάθε χρονοσειράς και N ο αριθμός των ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών που ανήκουν στη κανονική κατανομή $\mathcal{N}(0, 1)$, και (συμμετρικός) πίνακας $A[N \times N]$ με τους επιθυμητούς συντελεστές συσχέτισης (π.χ. Πίνακας 6.2). Ίσχύει:

$$A = R' \cdot R \quad (6.6)$$

Ο πίνακας R είναι ένας άνω τριγωνικός πίνακας, και είναι γνωστός ως παράγοντας Cholesky². Με τον ακόλουθο μετασχηματισμό μετατρέπουμε τον ανεξάρτητο πίνακα X στον πίνακα Y

²Για να ορίζεται ο πίνακας R , ο πίνακας A πρέπει να είναι θετικά ορισμένος, δηλαδή όλες οι ιδιοτιμές του να είναι θετικές. Σε αντίθετη περίπτωση, αν οι επιθυμητές συσχετίσεις δεν μπορούν να διαμορφώσουν ένα θετικά ορισμένο πίνακα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός διάσπασης υπερσφαίρας (Hypersphere Decomposition) ή διάσπασης συχνοτήτων (Spectral Decomposition) για τη δημιουργία του "πλησιέστερου" θετικά ορισμένου πίνακα [106].

εξαρτημένων μεταβλητών [107, 108].

$$Y = R \cdot X \quad (6.7)$$

Οι τυχαίοι αριθμοί πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι και όχι κανονικά. Γι' αυτό το λόγο τροφοδοτούνται σε μια αντίστροφη αθροιστική καμπύλη πιθανότητας κανονικής κατανομής (CDF $\sim \mathcal{N}(0,1)$). Σε αυτή την περίπτωση ο πίνακας A πρέπει πρώτα να κανονικοποιηθεί με τη σχέση (6.8) (Εξίσωση Spearman) για να διορθωθεί η απόκλιση που θα προκαλέσει ο μετασχηματισμός από κανονική σε ομοιόμορφη κατανομή [109].

$$\rho^B = 2 \sin\left(\frac{\pi}{6} \rho^S\right) \quad (6.8)$$

Προσομοίωση φορτίων

Με τον παραπάνω τρόπο είναι δυνατόν να περιγραφεί μονοσήμαντα η συμπεριφορά ενός φορτίου με τις μεταβλητές του Πίνακα 6.3³. Για τη σύγκριση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των φορτίων επιλέγεται ως αναφορά η μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (*Power*). Με βάση αυτή επιλέγεται η ζήτηση ενέργειας θερμότητας και ψύξης στο επιθυμητό εύρος με τους λόγους θερμότητας προς ηλεκτρισμό (*HPR*) και ψύξης προς θερμότητα (*CPR*). Έπειτα με τα υπόλοιπα ποιοτικά χαρακτηριστικά δημιουργούνται οι χρονοσειρές των φορτίων. Οι ώρες λειτουργίας του ηλεκτρισμού θεωρούνται ότι καλύπτουν όλο το έτος (8760 ώρες) ενώ για τις χρονοσειρές των θερμικών και ψυκτικών ορίζεται το αντίστοιχο κλάσμα των ωρών λειτουργίας. Για τον ορισμό του λόγου τιμών ηλεκτρισμού και ΦΑ διατηρείται σταθερή η τιμή του ηλεκτρισμού και μεταβάλλεται ανάλογα η τιμή του ΦΑ.

6.2.2 Δημιουργία παρένθετου προτύπου

Προκειμένου να βρεθεί ο συσχετισμός των βέλτιστων μεταβλητών σχεδιασμού με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φορτίων αλλά και με την τιμή της πρωτογενούς ενέργειας επιχειρείται ο σχεδιασμός ενός παρένθετου προτύπου.

Τα παρένθετα πρότυπα είναι προσεγγιστικά μαθηματικά πρότυπα, γνωστά και ως μεταμοντέλα (*metamodels*), που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την απόκριση ενός συστήματος σε κάποιες μεταβλητές. Συνήθως χρησιμοποιούνται όταν μια αναλυτική συνάρτηση δεν είναι διαθέσιμη ή όταν μια τέτοια τιμή είναι υπολογιστικά πολύ ακριβή για να

³Για τη μείωση του βαθμού ελευθερίας, έπειτα από ανάλυση παλινδρόμησης σε τυπικά φορτία, θεωρήθηκε ότι τα φορτία βάσης είναι συνδεδεμένα με τα φορτία αιχμής με τη σχέση $BF = 1.04 \cdot CF^{2.1}$.

Πίνακας 6.3: Πειραματικός σχεδιασμός

	Μεταβλητή		Εύρος
Μέγιστη ισχύς	Ηλεκτρισμού	<i>Power</i>	0.05 – 8 MWe
Λόγος μέγιστης ισχύος	Θέρμανσης/Ηλεκτρισμού	<i>HPR</i>	0.25–3
	Ψύξης/Θέρμανσης	<i>CHR</i>	0.25–3
Συντελεστής συγχρονισμού	Ηλεκτρικών-Θερμικών	<i>ElvTh</i>	-1–1
	Θερμικών-Ψυκτικών	<i>ThvCo</i>	-1–1
	Ηλεκτρικών-Ψυκτικών	<i>ElvCo</i>	-1–1
Συντελεστής χρησιμοποίησης	Ηλεκτρισμού	<i>CF_e</i>	10%–95%
	Θέρμανσης	<i>CF_h</i>	10%–95%
	Ψύξης	<i>CF_c</i>	10%–95%
Κλάσμα ωρών λειτουργίας	Θέρμανσης	<i>Thrs</i>	0–1
	Ψύξης	<i>Chrs</i>	0–1
Λόγος τιμών ηλεκτρισμού/ΦΑ		<i>CR</i>	1–4

εξαχθεί. Τέτοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στο σχεδιασμό για τη δημιουργία εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης που θα οδηγήσουν σε απλοποιημένα μοντέλα εκτίμησης των άριστων τιμών. Εκτός από το γεγονός ότι δίνουν ικανοποιητικές λύσεις με ιδιαίτερα χαμηλό υπολογιστικό κόστος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή εμπειρικών κανόνων που είναι πολύτιμοι για την κατανόηση του προβλήματος και των αλληλεπιδράσεων των κρίσιμων μεταβλητών. Αυτή η προσέγγιση στην αριστοποίηση περίπλοκων συστημάτων μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες σε ερευνητές, μηχανικούς και διαχειριστές που είναι υπεύθυνοι για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των διεργασιών. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Δημιουργία σημείων πειραματικού σχεδιασμού για τη χρήση τους ως παραμέτρους σχεδιασμού στο πρόβλημα αριστοποίησης με άνω και κάτω όρια στις μεταβλητές. Ο αριθμός των σημείων εξαρτάται από το πρόβλημα αλλά γενικά πρέπει να είναι τουλάχιστον $3 \times N$ όπου N ο αριθμός των μεταβλητών. Περισσότερα σημεία συνήθως παράγουν πιο ακριβές μοντέλο. Στην προκειμένη περίπτωση, επειδή η δημιουργία φορτίων περιέχει και ένα στοχαστικό παράγοντα και το υπολογιστικό κόστος δεν είναι περιοριστικός παράγοντας, για τη μείωση του τυπικού σφάλματος επιλέγεται η δημιουργία 1000 σημείων.
2. Εύρεση της απόκρισης για κάθε σημείο. Ανά περίπτωση αυτό περιλαμβάνει είτε πειράματα είτε αναλυτικό πρότυπο είτε προσομοιώσεις, όπως σε αυτή την περίπτωση.
3. Δημιουργία του παρένθετου μοντέλου χρησιμοποιώντας μια από τις γνωστές τεχνικές, όπως response surface ή νευρωνικά δίκτυα. Ο έλεγχος σφάλματος μοντέλου γίνεται με το δείκτη μέσης τετραγωνικής απόκλισης (Root Mean Squared Error).

Μέθοδος δειγματοληψίας

Η μέθοδος δειγματοληψίας που θα χρησιμοποιηθεί για τη συστηματική συλλογή δεδομένων είναι σημαντική για τη λήψη ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος. Για να εξερευνηθεί ολόκληρος ο χώρος με το βέλτιστο δυνατό τρόπο για δεδομένο αριθμό δειγμάτων χρησιμοποιείται η μέθοδος Latin Hypercube Sampling (LHS). Η ιδέα πίσω από το LHS είχε προταθεί από τους MacKay et. al [110] για να μειώσουν το υπολογιστικό κόστος των μεθοδολογιών δειγματοληψίας τυχαίων αριθμών. Η LHS είναι μια μορφή στρωματοποιημένης δειγματοληψίας που μπορεί να δώσει πιο ακριβείς εκτιμήσεις από μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Η στατιστική αυτή δειγματοληψία βασίζεται στην εξής λογική: ένας χώρος δύο μεταβλητών (διαστάσεων) όπου σχηματίζει ένα τετράγωνο πλέγμα είναι λατινικό τετράγωνο αν και μόνο αν υπάρχει μόνο ένα μοναδικό δείγμα σε κάθε σειρά και σε κάθε στήλη. Η γενίκευση αυτής της ιδέας σε έναν τυχαίο αριθμό διαστάσεων m αποτελεί το λατινικό υπερκύβο της διάστασης m , όπου κάθε δείγμα είναι μοναδικό στο υπερεπίπεδο που το περιέχει.

Το πλεονέκτημα λοιπόν έγκειται στο ότι οι τυχαίες τιμές δημιουργούνται από το εύρος όλων των πιθανών τιμών με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλο τον πιθανό υπερδιάστατο χώρο για δεδομένο αριθμό δειγμάτων σε σχέση με την τυχαία δειγματοληψία Monte Carlo. Ενώ η τελευταία μέθοδος επιλέγει τυχαία σημεία μέσα σε ένα πεδίο ορισμού, η LHS το κάνει πιο συστηματικά. Έτσι όλος ο χώρος παραμέτρων μπορεί να εξεταστεί πιο αξιόπιστα με λιγότερα δείγματα, βελτιώνοντας τη σύγκλιση και βελτιώνοντας το χρόνο εκτέλεσης. Η LHS γενικά αναγνωρίζεται ως η πιο αποδοτική τεχνική μείωσης μεγέθους και χρησιμοποιείται πολύ συχνά, εκτός από τη δημιουργία μεταμοντέλων, και για την ανάλυση ευαισθησίας αφού σε σχέση με της τεχνικές Once-at-a-time (OAT) εξερευνούν όλο το χώρο και δε περιστρέφονται γύρω από μια κεντρική τιμή.

Το εύρος των μεταβλητών εισόδου καθορίζεται στον Πίνακα 6.3. Επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι κατάλληλο για την περιγραφή φορτίων εμπορικών κτηρίων ή μεγαλύτερων κατοικιών με τη χρήση του εξοπλισμού που περιγράφηκε στα προηγούμενα Κεφάλαια. Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία δημιουργούνται τα αντίστοιχα φορτία και το σύστημα αριστοποιείται ξεχωριστά για εγκατάσταση τριπαραγωγής και για εγκατάσταση συμπαραγωγής ελαχιστοποιώντας την καθαρά παρούσα αξία. Οι μεταβλητές του Πίνακα 6.4 αποτελούν τα αποτελέσματα του σχεδιαζόμενου προτύπου.

Πίνακας 6.4: Μεταβλητές αριστοποίησης

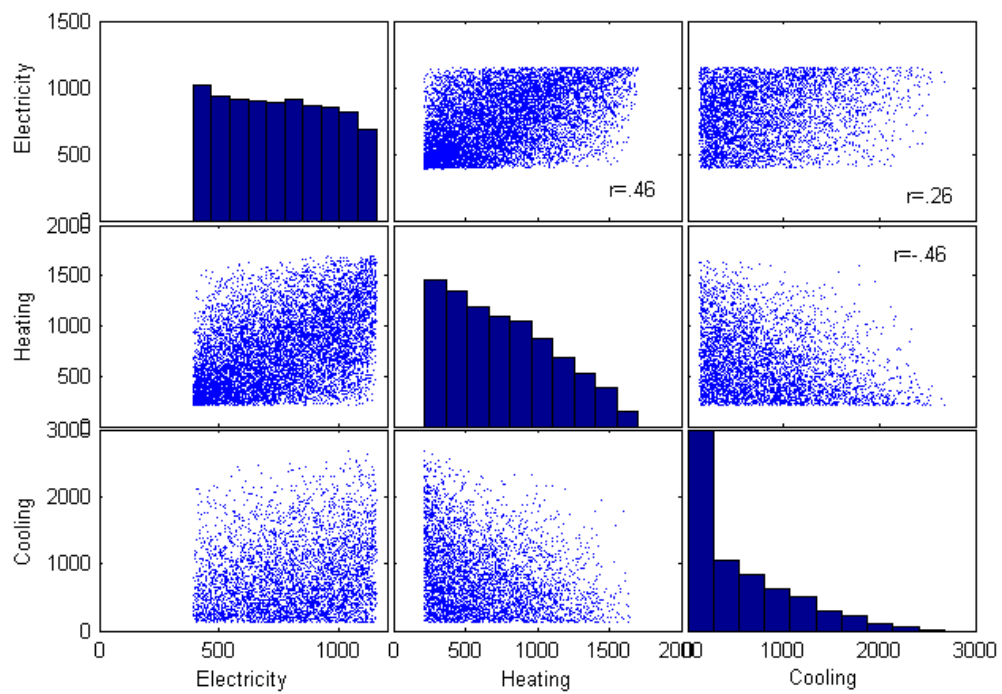
Μεταβλητή		
Υφιστάμενη Κατάσταση	Κόστος Λειτουργίας	<i>OpCost</i>
Τριπαραγωγή	Καθαρή Παρούσα Αξία	<i>NPV</i>
	Μέγεθος Κινητήρα	<i>P</i>
	Μέγεθος Ψύκτη	<i>A</i>
	Βέλτιστη Στρατηγική	<i>S</i>
	Βέλτιστο Τιμολόγιο	<i>T</i>
Συμπαραγωγή	Καθαρή Παρούσα Αξία	<i>NPV0</i>
	Μέγεθος Κινητήρα	<i>P0</i>
	Βέλτιστη Στρατηγική	<i>S0</i>
	Βέλτιστο Τιμολόγιο	<i>T0</i>

Επαλήθευση

Για την επίδειξη του προτύπου δημιουργήθηκαν φορτία με τη συμπεριφορά που ορίζεται στον Πίνακα 6.1 και του Πίνακα 6.2. Η συσχέτιση και η κατανομή τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2.2. Τα φορτία αυτά προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των φορτίων του Κεφαλαίου 5. Για την επαλήθευση τους επιχειρήθηκε η αριστοποίηση του συστήματος με τα προσομοιωμένα φορτία και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από την προσομοίωση των πρότυπων χρονοσειρών, όπως υπολογίστηκαν σε προηγούμενο Κεφάλαιο. Πρώτα ελέγχθηκε κατά πόσο η στοχαστική μεθοδολογία δημιουργίας των χρονοσειρών μεταβάλλει το άριστο, δηλαδή κατά πόσο η μέθοδος είναι επαναλήψιμη, και δεύτερον κατά πόσο η άριστη λύση διαφέρει από αυτήν των πρότυπων χρονοσειρών. Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της επαλήθευσης. Η τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων σε κάθε δειγματοληψία δεν ξεπερνά το 1% της μέσης τιμής, γεγονός που την καθιστά επαναλήψιμη μέθοδο. Το λειτουργικό κόστος (πριν την επένδυση) και το άριστο μέγεθος του εξοπλισμού για συμπαραγωγή και τριπαραγωγή απέχει ελάχιστα από αυτό που υπολογίστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο (Πίνακας 5.3).

Πίνακας 6.5: Σύγκριση άριστων λύσεων προσομοιωμένων και πρότυπων φορτίων

	Τριπαραγωγή			Συμπαραγωγή		
	Μέση τιμή	Τυπ. απόκλιση	Πρότυπα	Μέση τιμή	Τυπ. απόκλιση	Πρότυπα
<i>OpCost</i>	1086	3.6	1067			
<i>P</i>	0.55	0.007	0.53	0.42	0.006	0.41
<i>A</i>	0.45	0.023	0.41	-	-	-
<i>S</i>	He F	-	He F	He F	-	He F
<i>T</i>	B2	-	B2	B2	-	B2
<i>NPV</i>	751	15	517	609	14	480



Σχήμα 6.3: Παράδειγμα προσομοιωμένων φορτίων

Σημειώνεται ότι οι προσομοιωμένες χρονοσειρές φορτίων δεν έχουν την απαιτούμενη χρονική αλληλουχία και εποχικότητα (πχ όλα τα ψυκτικά φορτία την καλοκαιρινή περίοδο), αφού αυτή η πληροφορία χάνεται με τη δημιουργία της ΚΔΦ, αλλά διατηρούν το συγχρονισμό τους και όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κατανομής τους, γεγονός που το καθιστά επαρκές για την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων. Λόγω του παραπάνω δεν υπολογίζεται η εποχικότητα, η μηνιαία χρέωση ηλεκτρισμού και η εναλλαγή στρατηγικών λειτουργίας ανά εποχή. Συνέπεια αυτής της αναγκαίας παραδοχής που έγινε στα πλαίσια του απλοποιημένου τρόπου περιγραφής των φορτίων είναι ότι η καθαρά παρούσα αξία εμφανίζεται αρκετά μεγαλύτερη από τη πραγματική. Αυτό καθιστά τη μεθοδολογία μη επαρκή για την πρόβλεψη της ακριβούς τιμής της καθαρής παρούσας αξίας αλλά θα χρησιμοποιηθεί ως σύγκριση μεταξύ των διαφόρων λύσεων και για να προσεγγίσει τις αλληλεπιδράσεις των μεταβλητών.

Προσαρμογή αποτελεσμάτων

Στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω μέθοδο δειγματοληψίας προσαρμόστηκε μια καμπύλη επιφάνειας απόκρισης δευτέρου βαθμού (second order Response surface model):

$$\phi(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_{j>i} \beta_{ij} x_i x_j \quad (6.9)$$

Οι παράμετροι β της εξίσωσης υπολογίστηκαν με τη γνωστή μεθοδολογία των ελαχίστων τετραγώνων. Το κριτήριο για τον καθορισμό της πολυπλοκότητας του μοντέλου, όπως ορίζεται από τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν το Bayesian Information Criterion ⁴. Το πλεονέκτημα της χρήσης ενός πολυωνύμου χαμηλής τάξης είναι ότι περιέχουν σχετικά μικρό αριθμό παραμέτρων και επιτρέπουν την κατανόηση της συμπεριφοράς του προτύπου και τον προσδιορισμό των σημαντικότερων δράσεων. Μπορεί να έχουν μικρότερη ακρίβεια από άλλες μεθόδους, όπως νευρωνικά δίκτυα ή μεθόδους που έχουν ακτινική βάση, αλλά είναι ικανοποιητικά στα πλαίσια του απλοποιημένου σχεδιασμού για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων των μεταβλητών και πιο απλά στην εφαρμογή τους.

6.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της προσαρμογής συνοψίζονται στον Πίνακα 6.6, όπου $RMSE$ η μέση τετραγωνική απόκλιση της μεταβλητής απόκρισης, και R^2 ο συντελεστής προσδιορισμού

⁴ $BIC = -2 \log \text{likelihood} + k \ln(n)$, όπου k ο αριθμός των παραμέτρων και n το μέγεθος του δείγματος.

που απεικονίζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής που εξηγείται από τη διακύμανση των ανεξάρτητων μεταβλητών, μέση τιμή η μέση τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής στο δείγμα που εξετάστηκε, αν δεν υπήρχε καθόλου επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών στο πρότυπο, και k ο αριθμός παραμέτρων του σχεδιαζόμενου προτύπου με βάση το κριτήριο BIC .

Πίνακας 6.6: Σύνοψη χαρακτηριστικών προσαρμογής

Μεταβλητή	R^2	$RMSE$	Μέση τιμή	k	BIC
$OpCost$	0.98	316	4092	33	4384
P	0.90	0.65	2.60	35	7706
A	0.86	0.96	3.07	42	10948
NPV	0.88	1472	3657	37	52551
$P0$	0.85	0.44	1.64	30	7031
$NPV0$	0.85	932	1972	36	50674

Τα αποτελέσματα της προσαρμογής είναι ικανοποιητικά στα πλαίσια ενός απλοποιημένου σχεδιασμού, για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων των χαρακτηριστικών των φορτίων στο μέγεθος και τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Στο Παράρτημα Α' παρουσιάζονται οι συντελεστές του προτύπου καθώς και οι αποκρίσεις και αλληλεπιδράσεις των μεταβλητών σχεδιασμού. Στις ακόλουθες παραγράφους αναλύονται οι πιο σημαντικές επιδράσεις των χαρακτηριστικών των φορτίων και των τιμών ενέργειας στη συμπεριφορά των μεταβλητών σχεδιασμού και της οικονομικής απόδοσης.

Βιωσιμότητα Στις προσομοιώσεις που έγιναν, η καθαρά παρούσα αξία μιας επένδυσης τριπαραγωγής ήταν κατά μέσο όρο 35% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη καθαρά παρούσα αξία της συμπαραγωγής, ανάλογα με συγκεκριμένες μεταβλητές. Η σχέση μεταξύ της αιχμής ηλεκτρισμού και θερμότητας HPR έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην κερδοφορία και στο βέλτιστο μέγεθος για δεδομένη αιχμή ηλεκτρισμού. Η καθαρά παρούσα αξία της συμπαραγωγής ($NPV0$) όσο και της τριπαραγωγής (NPV) επηρεάζεται έντονα από την συσχέτιση των φορτίων ηλεκτρισμού θερμότητας ψύξης. Σημειώνεται ότι η συσχέτιση θερμικών-ψυκτικών ($ThvCo$) επηρεάζει θετικά τη $NPV0$ αλλά αρνητικά την NPV , καθώς όσο πιο πολύ αυτά τα φορτία ταυτίζονται ($ThvCo \rightarrow 1$) τόσο λιγότερη περίσσεια θερμότητας υπάρχει και δε μπορεί να αξιοποιηθεί ο ψύκτης απορρόφησης. Αντίθετα στην συμπαραγωγή η συσχέτιση ψυκτικών-θερμικών είναι επιθυμητή καθώς τα πρώτα καλύπτονται από τον ηλεκτρικό ψύκτη.

Οι ώρες λειτουργίας των θερμικών φορτίων έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή σε σχέση με της ψύξης αλλά και τις περισσότερες αλληλεπιδράσεις με τις άλλες μεταβλητές. Αξίζει να

σημειωθεί ότι υπάρχει ένα σημείο που η επένδυση δεν είναι αποδοτική. Αυτό είναι μεγαλύτερο για την επένδυση τριπαραγωγής, δηλαδή η τελευταία έχει μεγαλύτερη ευελιξία και κυμαίνεται γύρω στο 0,2 – 0,5 ανάλογα με τις τιμές των άλλων μεταβλητών και κυρίως των *HPR*, και *CostRatio*. Η *Chrs* δεν έχει τόσο μεγάλη επιρροή αλλά στη περίπτωση της ΣΗΘ παρατηρείται μια ελαφρώς αρνητική συσχέτιση. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στο λόγο συνολικής ψύξης-θερμότητας. Οι συντελεστές φορτίου των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων περιστρέφουν την καμπύλη διάρκειας φορτίου· όσο μεγαλύτερος, τόσο μικρότερη η απόσταση των φορτίων βάσης και αιχμής, ή αλλιώς τόσο τα φορτία είναι πιο καλά διαχειρισμένα. Άρα ένας μεγαλύτερος κινητήρας ΣΗΘ 'χωράει καλύτερα' και συνεπώς έχει μεγαλύτερη οικονομική απόδοση.

Ενδιαφέρον έχει η αλληλεπίδραση των ωρών λειτουργίας (ειδικά της θερμότητας) και του συντελεστή συσχέτισης φορτίων. Όταν οι ώρες λειτουργίας της θερμότητας τείνουν προς το 1, τότε ο συντελεστής συσχέτισης δεν έχει σχεδόν καμία επίδραση στη βιωσιμότητα. Αυτό συμβαίνει γιατί, εφόσον υπάρχει ζήτηση θερμότητας όλο το χρόνο, ο εξοπλισμός διαστασιοποιείται έτσι ώστε να καλύπτει τα φορτία βάσης ανεξάρτητα από το συγχρονισμό των αιχμών. Αντίθετα όσο λιγότερες είναι οι ώρες λειτουργίας τόσο περισσότερη σημασία έχει ο συντελεστής συσχέτισης.

Βέλτιστο μέγεθος Στις προσομοιώσεις που έγιναν στο επιλεγμένο δείγμα το μέγεθος του κινητήρα τριπαραγωγής ήταν κατά μέσο όρο 25% μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο της συμπαραγωγής για το ίδιο σύστημα καθώς χρειάζεται επιπλέον θερμότητα για την αξιοποίησή της από τον ψύκτη. Το βέλτιστο μέγεθος του κινητήρα που επιλέχθηκε για συμπαραγωγή και τριπαραγωγή είχε παρόμοια απόκριση σε όλες τις μεταβλητές εκτός από αυτές που αφορούν την ψύξη. Για παράδειγμα οι ώρες ψύξης (*Chrs*) επηρεάζουν θετικά το μέγεθος του κινητήρα για ΣΗΘ και αρνητικά για ΣΗΘΨ, καθώς στην πρώτη περίπτωση η ψύξη καλύπτεται από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του κινητήρα ενώ στη δεύτερη από την περίσσεια θερμότητας. Αυτή έχει έντονη αλληλεπίδραση με το λόγο θερμότητας ηλεκτρισμού. Το βέλτιστο μέγεθος έχει επίσης μεγάλη ευαισθησία στο συντελεστή των θερμικών φορτίων ειδικά σε μεγάλα *HPR*.

Η πιο σημαντική παρατήρηση όσον αφορά στο μέγεθος του εξοπλισμού είναι η έντονη επίδραση του συντελεστή συσχέτισης θερμικών-ηλεκτρικών φορτίων στο μέγεθος του ψυκτικού απορρόφησης. Όπως αναμενόταν, όσο πιο συγχρονισμένα είναι τα φορτία θερμότητας-ηλεκτρισμού τόσο μικρότερο είναι το βέλτιστο μέγεθος του ψυκτικού, γιατί δεν υπάρχει περίσσεια θερμότητας προς αξιοποίηση. Η μεταβλητή αυτή έχει έντονες αλληλεπιδράσεις με τις ώρες λειτουργίας θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Αντίστοιχα το μέγεθος του κινη-

τήρα για ΣΗΘΨ (σε σχέση με απλή ΣΗΘ που είναι αντιστρόφως ανάλογο) είναι μεγαλύτερο για συντελεστές συσχέτισης κοντά στο -1 καθώς αξιοποιείται η περίσσεια θερμότητας. Ο συντελεστής συσχέτισης θερμικών ηλεκτρικών, όπως αναμενόταν, έχει και στις δύο περιπτώσεις την ίδια συμπεριφορά: όσο πιο ετεροχρονισμένα είναι τα θερμικά και ηλεκτρικά φορτία τόσο μικρότερος κινητήρας χρειάζεται.

Συνοψίζοντας, εγκαταστάσεις με απαιτήσεις για θερμότητα άνω των 2000 ωρών ανά έτος, χαμηλό κόστος καυσίμων, υψηλή ζήτηση αιχμής και μη συγχρονισμένα ηλεκτρικά με ψυκτικά φορτία αποτελούν ιδανικούς υποψήφιους για την εγκατάσταση συστημάτων τριπαραγωγής.

6.3 Λειτουργική βιωσιμότητα

Ο πρωταρχικός σκοπός μιας εγκατάστασης συμπαραγωγής σε κτήρια δεν είναι η πώληση ενέργειας στο δίκτυο αλλά η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Συνεπώς, η οικονομική βιωσιμότητα μιας εγκατάστασης (αποκεντρωμένης) συμπαραγωγής δεν εξαρτάται μόνο από το οικονομικό περιβάλλον αλλά κυρίως από την υποκατάσταση του υφιστάμενου εξοπλισμού. Κρίνεται σκόπιμο σε αυτό το σημείο, στα πλαίσια του απλοποιημένου σχεδιασμού, να μελετηθεί η ικανή και αναγκαία συνθήκη που επιτρέπει τη βιώσιμη λειτουργία μιας εγκατάστασης ΣΗΘΨ μέσω μιας απλής παραμέτρου ελέγχου. Το βασικό κίνητρο για τη βιώσιμη λειτουργία μιας εγκατάστασης που θα οδηγήσει στην εξοικονόμηση ενέργειας συνοψίζεται στην ακόλουθη φράση:

Όταν η θερμότητα και ο ηλεκτρισμός μπορούν να παραχθούν τοπικά σε μικρότερο κόστος από τον ηλεκτρισμό του δικτύου και την παραγωγή ξεχωριστής θερμότητας, τότε και μόνο τότε υπάρχει θετική αποπληρωμή της επένδυσης.

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκε ο σχεδιασμός του συνολικού συστήματος για ένα χρόνο λαμβάνοντας υπόψιν τα ετήσια στατιστικά χαρακτηριστικά των φορτίων. Από την ανάλυση του κεφαλαίου 5 (Σχήματα 5.22, 5.26) παρατηρήθηκε ότι η λειτουργία και εγκατάσταση του ψύκτη απορρόφησης δεν είναι αποδοτική μετά από μια ορισμένη τιμή του φυσικού αερίου.

Στη βιβλιογραφία έχουν γίνει ανάλογες προσπάθειες για τη δημιουργία μιας παραμέτρου ελέγχου επενδύσεων συμπαραγωγής. Ένα εμπειρικό κριτήριο που χρησιμοποιείται συχνά για τον προσδιορισμό της λειτουργίας της ΣΗΘ είναι είτε η διαφορά είτε ο λόγος τιμών των ανταγωνιστικών καυσίμων, δηλαδή φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού. Και τα δύο

αναφέρονται στη βιβλιογραφία με τον όρο *spark spread*. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το US Department of Energy Midwest CHP Application Center προτείνει μια διαφορά τουλάχιστον 0.04 \$/kWh μεταξύ των τιμών ΦΑ και ηλεκτρισμού για να είναι η λειτουργία ενός συστήματος ΣΗΘ κερδοφόρα. Αυτό το μέγεθος αναφέρεται μόνο σε συστήματα ΣΗΘ και δεν λαμβάνει υπόψη τον τον υποκαθιστούμενο εξοπλισμό. Οι Cardona et al. [37, 95] χρησιμοποίησαν το λόγο τιμών για να φτιάξουν μια στρατηγική λειτουργίας, όπου σε ωριαία βάση μπορεί να αποφασίζει αν πρέπει να λειτουργήσει η ΣΗΘ ή όχι. Οι Graves et al. [111] ανέπτυξαν μια μέθοδο που περιλαμβάνει την απόδοση του κινητήρα, το βαθμό ανάκτησης θερμότητας και το κόστος εξοπλισμού ως ένδειξη της βιωσιμότητας συστημάτων ΣΗΘ. Οι Smith et al. [112, 113] ανέπτυξαν μια παρόμοια παράμετρο που βασίζεται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της ΣΗΘ αλλά δεν εξέτασαν την περίπτωση της τριπαραγωγής.

Η ανασκόπηση της πρόσφατης βιβλιογραφίας δεν επιδεικνύει καμία γενικευμένη παράμετρο που να συσχετίζει το λόγο τιμών ενέργειας με συγκεκριμένο εξοπλισμό τριπαραγωγής ανεξάρτητα από τα φορτία. Συνεπώς, ο σκοπός αυτής της ενότητας είναι να αναπτυχθεί μια σχέση μεταξύ των τιμών ενέργειας και των χαρακτηριστικών του νέου και συμβατικού υφιστάμενου εξοπλισμού. Μέσω αυτής της σχέσης θα επιχειρηθεί να χαρτογραφηθεί η λειτουργική βιωσιμότητα ενός συγκεκριμένου εξοπλισμού ΣΗΘ ή ΣΗΘΨ και να δοθεί μια ξεκάθαρη εικόνα για την ευαισθησία των επενδύσεων συμπαραγωγής στη τιμή του φυσικού αερίου και τη σημασία της στη χάραξη ενεργειακής τιμολογιακής πολιτικής για επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας.

6.3.1 Περιγραφή προτύπου

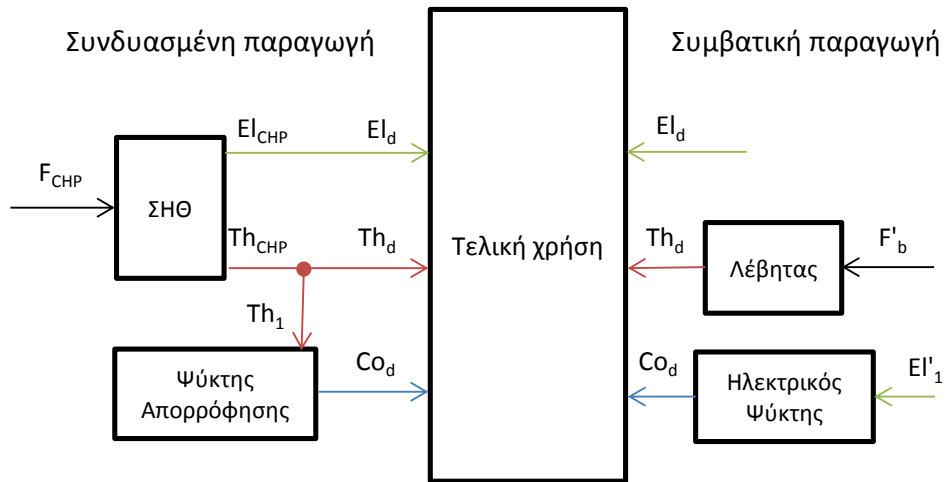
Το Σχήμα 6.4 απεικονίζει το ενεργειακό σύστημα αναφοράς. Στο πλαίσιο αυτής της σύγκρισης αγνοείται η κάλυψη ενέργειας από άλλες πηγές (πχ δίκτυο, λέβητας, ηλεκτρικός ψύκτης) και συγκρίνεται μόνο η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα ΣΗΘ (με το συγκεκριμένο μέγεθος, στρατηγική λειτουργίας κλπ) για συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Έστω ότι πρέπει να καλυφθούν δεδομένες ανάγκες για ηλεκτρισμό (El_d), θέρμανση (Th_d) και ψύξη (Co_d). Τα φορτία αυτά μπορούν να καλυφθούν με δύο τρόπους: είτε με συμπαραγωγή είτε με συμβατική παραγωγή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4.

Υπενθυμίζονται οι σχέσεις που ισχύουν για τη μετατροπή ενέργειας, όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3. Για το τμήμα της ΣΗΘ ισχύει:

$$Th_{CHP} = Th_d + Th_1 \quad (6.10)$$

$$Co_d = COP_{ab} \cdot Th_1 \quad (6.11)$$



Σχήμα 6.4: Σύστημα αναφοράς για την κάλυψη δεδομένων ενεργειακών απαιτήσεων με ΣΗΘΨ ή ξεχωριστή παραγωγή

Απο τις παραπάνω εξισώσεις και τον ορισμό της συνολικής απόδοσης της ΣΗΘ (4.23) προκύπτει:

$$\eta_{CHP} = \frac{El_{CHP}}{F_{CHP}} + \frac{Th_{CHP}}{F_{CHP}} = \frac{El_{CHP}}{F_{CHP}} + \frac{Th_d}{F_{CHP}} + \frac{Co_d}{F_{CHP} \cdot COP_{ab}} \quad (6.12)$$

Για συμβατική παραγωγή ισχύει:

$$Co_d = COP_{el} \cdot El'_1 \quad (6.13)$$

$$Th_d = \eta_b \cdot F'_b \quad (6.14)$$

Το λειτουργικό κόστος της τριπαραγωγής ορίζεται από την εξίσωση:

$$C_{CHP} = C_f \cdot F_{CHP} \quad (6.15)$$

ενώ για το σύστημα ξεχωριστής παραγωγής από την εξίσωση:

$$C_{SHP} = C_f \cdot F'_b + C_e \cdot (El_d + El'_1) \quad (6.16)$$

όπου C_f η τιμή του καυσίμου και C_e η τιμή του ηλεκτρισμού. Αναγκαία παραδοχή που πρέπει να γίνει σε αυτό το στάδιο είναι να θεωρηθεί ότι το κόστος ηλεκτρισμού και καυσίμου για συμβατική παραγωγή και για συμπαραγωγή είναι το ίδιο, γεγονός που συνήθως δεν ισχύει γιατί υπάρχουν ευνοϊκές ρυθμίσεις για την περίπτωση της ΣΗΘ. Αυτή η παραδοχή όμως θα επιτρέψει την παρουσίαση της πραγματικής ανταγωνιστικότητας των τεχνολογιών

αυτών. Για να είναι κερδοφόρα η λειτουργία της εγκατάστασης τριπαραγωγής ανά πάσα χρονική στιγμή πρέπει το λειτουργικό κόστος της ΣΗΘ να είναι μικρότερο ή ίσο από το λειτουργικό κόστος χωριστής παραγωγής για δεδομένα ενεργειακά φορτία:

$$C_{SHP} - C_{CHP} \geq 0 \quad (6.17)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (6.16), (6.15) και αντικαθιστώντας το F_{CHP} από την (6.12), F'_b από την (6.14) το El'_1 από την (6.13), και το Co_d από την (6.11), η εξίσωση (6.17) γίνεται:

$$C_f \cdot \frac{Th_{CHP} - Th_1}{\eta_b} + C_e \cdot (El_{CHP} + \frac{El_{CHP} Th_1 \cdot COP_{ab}}{COP_{el}}) - C_f \cdot \frac{El_{CHP} + Th_{CHP}}{\eta_{CHP}} \geq 0 \quad (6.18)$$

Ορίζεται ο λόγος τιμής ηλεκτρισμού προς την τιμή φυσικού αερίου $CostRatio = \frac{C_e}{C_f}$, ο λόγος θερμότητας προς τον ηλεκτρισμό του κινητήρα $HPR = \frac{Th_{CHP}}{El_{CHP}}$ και το κλάσμα της ανακτώμενης θερμότητας του κινητήρα που χρησιμοποιείται για ψύξη $\alpha = \frac{Th_1}{Th_{CHP}}$. Αντικαθιστώντας τα παραπάνω μεγέθη στην εξίσωση (6.18), διαιρώντας δια Th_{CHP} , απλοποιώντας και επιλύοντας ως προς $CostRatio$ προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$CostRatio \geq \frac{COP_{el}[\eta_b + HPR(\eta_b - \eta_{CHP} + a \cdot \eta_{CHP})]}{\eta_b \cdot \eta_{CHP}(COP_{el} + COP_{ab}HPR \cdot \alpha)} \quad (6.19)$$

Μια άλλη λύση που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί ειδικά σε ρυθμιζόμενες/επιδοτούμενες αγορές είναι η εξής: Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός πωλείται στο δίκτυο σε εγγυημένη τιμή και η ίδια ποσότητα αγοράζεται σε χαμηλότερη τιμή για την κάλυψη των αναγκών του κτηρίου. Με αυτό το τιμολόγιο πώλησης ηλεκτρισμού από ΣΗΘ στο σύστημα και το δίκτυο, μεταβαλλόμενο ανάλογα με τις διεθνείς τιμές καυσίμων, εξασφαλίζεται ότι το έσοδο αυτό θα ισούται με το κόστος καυσίμου, συν τα λοιπά έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, συν το πάγιο σκέλος απόσβεσης της εγκατάστασης ΣΗΘ. Αποτελεί δηλαδή μια διαφορετική μορφή επιδότησης.

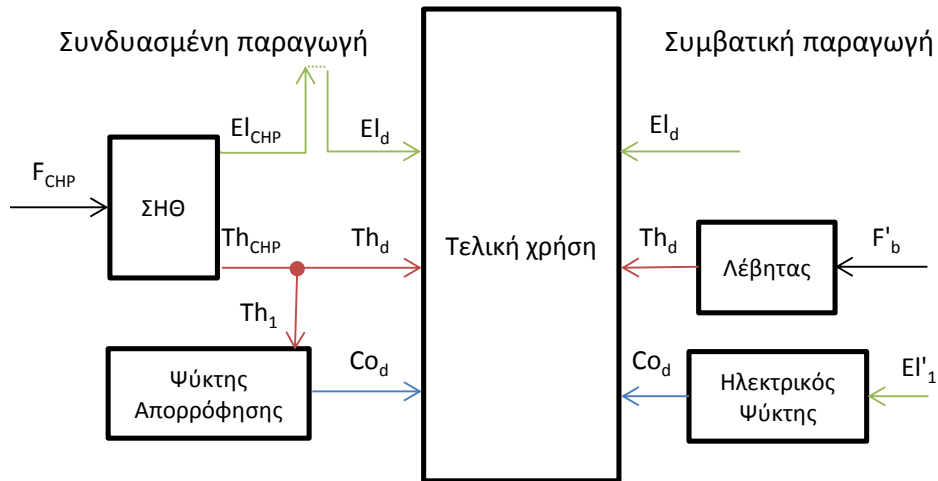
Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα περιγράφεται από το Σχήμα 6.5 και ισχύουν όλες οι παραπάνω εξισώσεις με τη μόνη διαφορά ότι η εξίσωση (6.15) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$C_{CHP} = C_f \cdot F_{CHP} + El_d(C_e - C_{e.sell}) \quad (6.20)$$

όπου $C_{e.sell}$ η τιμή πώλησης του ηλεκτρισμού. Ορίζοντας το λόγο τιμής πώλησης προς την τιμή αγοράς ηλεκτρισμού ($ElRatio = \frac{C_{e.sell}}{C_e}$) και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία καταλή-

γουμε στη γενικευμένη πλέον εξίσωση:

$$CostRatio \geq \frac{COP_{el}[\eta_b + HPR(\eta_b - \eta_{CHP} + a \cdot \eta_{CHP})]}{\eta_b \cdot \eta_{CHP}(COP_{el} \cdot ElRatio + COP_{ab}HPR \cdot \alpha)} \quad (6.21)$$



Σχήμα 6.5: Σύστημα αναφοράς για την κάλυψη δεδομένων ενεργειακών απαιτήσεων εκμεταλλευόμενο τη διαφορά τιμών ηλεκτρισμού στην αγορά

Χωρίς την επίδραση του αρμπιτράζ δηλαδή όπου $ElRatio = 1$ η παραπάνω εξίσωση είναι όμοια με την (6.19). Για $\alpha = 1$, δηλαδή όταν όλη η θερμότητα χρησιμοποιείται στον ψύκτη απορρόφησης η εξίσωση απλοποιείται ως εξής:

$$CostRatio \geq \frac{COP_{el}(HPR + 1)}{\eta_{CHP}(COP_{el} + COP_{ab}HPR)} \quad (6.22)$$

ενώ για $\alpha = 0$, δηλαδή για απλή συμπαραγωγή χωρίς τον ψύκτη απορρόφησης, η εξίσωση απλοποιείται ως εξής:

$$CostRatio \geq \frac{HPR + 1}{\eta_{CHP}} - \frac{HPR}{\eta_b} \quad (6.23)$$

Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας

Εφαρμόζεται παρόμοια μέθοδος για την εύρεση του θεωρητικού λόγου εξοικονόμησης ενέργειας $PESR$. Ός λόγος εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας έχει οριστεί η σχετική μείωση του πρωτογενούς καυσίμου για ξεχωριστή και για την περίπτωση συνδυασμένης παραγωγής (Εξίσωση (4.24)). Ισχύει το σύστημα του Σχήματος 6.5 και όλες οι εξισώσεις που ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα με την εξής προσθήκη: το πρωτογενές καύσιμο για την ξεχωριστή παραγωγή είναι το άθροισμα του καυσίμου του λέβητα και του καυσί-

μου που καταναλώνεται σε έναν κεντρικό σταθμό για την παραγωγή του ηλεκτρισμού που καταναλώνεται για την κάλυψη των κτιριακών αναγκών:

$$F_{SP} = F'_b + \frac{El_d + El'_1}{\eta_{pp}} \quad (6.24)$$

όπου η_{pp} η απόδοση του κεντρικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ή η μέση απόδοση του δικτύου. Το πρωτογενές καύσιμο για τη συνδυασμένη παραγωγή ορίζεται από την σχέση (6.12). Εφαρμόζοντας τις αντικαταστάσεις και απλοποιήσεις από την προηγούμενη ενότητα ο θεωρητικός λόγος εξοικονόμησης ενέργειας λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PESR = \frac{F_{SP} - F_{CHP}}{F_{SP}} \quad (6.25)$$

$$= 1 - \frac{COP_{el} \cdot \eta_{pp} \cdot \eta_b (HPR + 1)}{\eta_{CHP} [COP_{el} (\eta_b + HPR \cdot \eta_{pp} - HPR \cdot \eta_{pp} \cdot a) + COP_{ab} \cdot HPR \cdot a \cdot \eta_b]} \quad (6.26)$$

Η παραπάνω σχέση, όπως και στην περίπτωση της προηγούμενης παραγράφου, ισχύει μόνο για την ενέργεια που καλύπτει το σύστημα συμπαραγωγής, δηλαδή για τα φορτία που μπορούν να καλυφθούν από τη ΣΗΘΨ.

6.3.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η ανισότητα (6.19) δεν είναι συνάρτηση των φορτίων αλλά μόνο των χαρακτηριστικών της ΣΗΘΨ και του συμβατικού εξοπλισμού. Μέσω αυτής της ανισότητας μπορεί να 'χαρτογραφηθεί' για δεδομένο εξοπλισμό η περιοχή βιωσιμότητας της ΣΗΘΨ, ανάλογα με το λόγο των τιμών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου. Όπως αποδείχθηκε, η βιωσιμότητα είναι συνάρτηση όχι της διαφοράς αλλά του λόγου τιμών ηλεκτρισμού/ΦΑ. Αν μετατραπεί η ανισοτική σχέση σε ισότητα, υπολογίζεται ο ελάχιστος λόγος *CostRatio* για να είναι η λειτουργία της ΣΗΘΨ αποδοτική, δηλαδή να έχει μικρότερο κόστος λειτουργίας από τη συμβατική παραγωγή. Αυτό δεν συνεπάγεται ότι η συνολική λειτουργία θα είναι αποδοτική πάνω από αυτή την τιμή καθώς εξαρτάται από όλες τις παραμέτρους του συστήματος, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Ορίζεται όμως αμφιμονοσήμαντα το όριο μη βιωσιμότητας, δηλαδή ο ελάχιστος αναγκαίος λόγος κάτω από τον οποίο η ΣΗΘΨ δε μπορεί να παράγει φθηνότερη ενέργεια από τη συμβατική συμπαραγωγή. Η χρησιμότητα μιας τέτοιας σχέσης είναι φανερή καθώς επιτρέπει στον χειριστή του συστήματος να ρυθμίζει τη λειτουργία της ΣΗΘΨ και στους λήπτες απόφασης να διασφαλίζουν μια ελάχιστη επιδότηση για να προωθήσουν όλα τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών συμπαραγωγής.

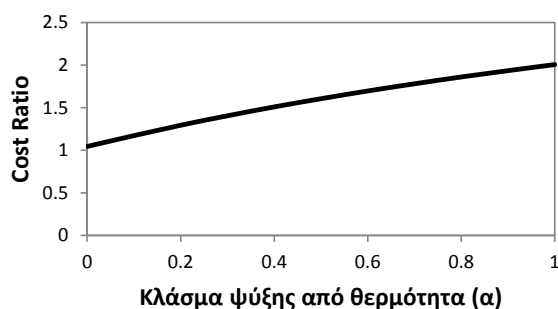
Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση είναι παρόμοιες με αυτές του Κεφαλαίου 4 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7: Παράμετροι της εξίσωσης (6.19)

Μεταβλητή	Κεντρική τιμή
COP_{el}	3
COP_{ab}	0.8
η_b	0.85
η_{CHP}	0.89
HPR	1.5
η_{pp}	0.37

Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η επίδραση των μεταβλητών εξοπλισμού η_{CHP} , η_b , COP_{el} , COP_{ab} στον ελάχιστο λόγο $CostRatio$. Η μεταβλητή α μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει την επίδραση της εποχικότητας. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου μεγάλο ποσό της θερμότητας πηγαίνει στον ψύκτη απορρόφηση το α τείνει προς τη μονάδα. Αντίθετα το χειμώνα το α τείνει στο μηδέν καθώς σχεδόν όλη η θερμότητα χρησιμοποιείται για τελική χρήση.

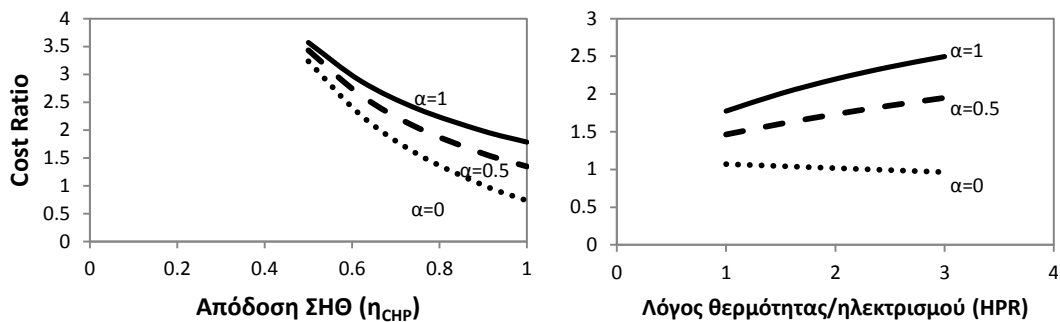
Στο Σχήμα 6.6 παρατηρείται ότι όσο περισσότερη θερμότητα χρησιμοποιείται για ψύξη, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το $CostRatio$, δηλαδή τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η τιμή του φυσικού αερίου σε σχέση με τον ηλεκτρισμό. Η συσχέτιση αυτή εξηγείται λόγω της μη αποδοτικής μετατροπής της θερμότητας στον ψύκτη απορρόφησης ενός σταδίου (με COP μικρότερο της μονάδας). Αυτό συνεπάγεται ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου οι ανάγκες ψύξης είναι μεγαλύτερες, η ανάγκη για φτηνότερο φυσικό αέριο είναι μεγαλύτερη. Αν αυτό δε συμβαίνει, τότε πρέπει να μειωθεί ο συντελεστής α καλύπτοντας μέρος των ψυκτικών φορτίων με άλλους τρόπους.



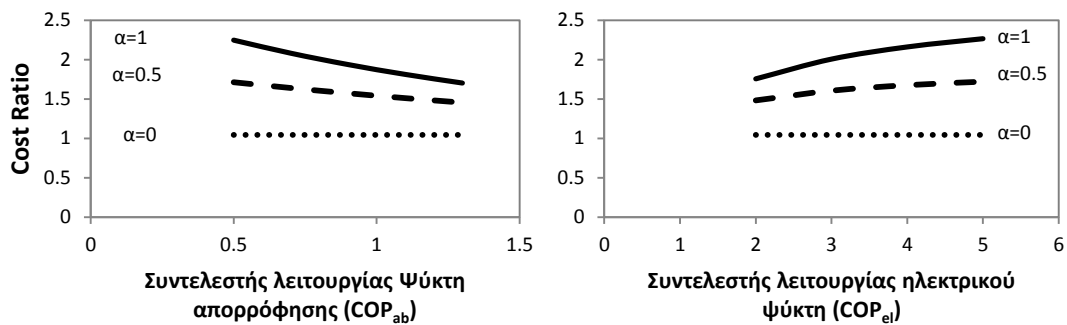
Σχήμα 6.6: Επίδραση του κλάσματος ψύξης από ανακτώμενη θερμότητα στον ελάχιστο λόγο τιμών $CostRatio$

Τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού συμπαραγωγής επηρεάζουν θετικά τον ελάχιστο λόγο,

ενώ τα χαρακτηριστικά του συμβατικού (υποκαθιστούμενου) εξοπλισμού αρνητικά. Όσο πιο αποδοτικός ο καινούριος εξοπλισμός και όσο λιγότερο αποδοτικός ο υποκαθιστούμενος, τόσο μικρότερη είναι η απαίτηση για υψηλό λόγο τιμών ηλεκτρισμού-ΦΑ (Σχήμα 6.7). Κινητήρες που παράγουν περισσότερη θερμότητα από ηλεκτρισμό (για δεδομένη συνολική απόδοση) είναι πιο ευαίσθητοι στις διακυμάνσεις των τιμών ενέργειας. Σε λειτουργία απλής συμπαραγωγής ο λόγος θερμότητας/ηλεκτρισμού δεν έχει καμία επίδραση.



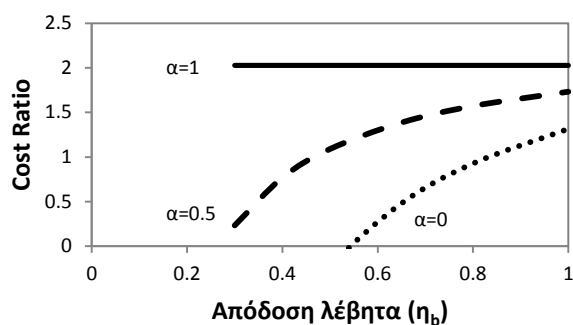
Σχήμα 6.7: Επίδραση χαρακτηριστικών κινητήρα ΣΗΘ στον ελάχιστο λόγο τιμών *CostRatio*



Σχήμα 6.8: Επίδραση συντελεστή λειτουργίας των ψυκτών στον ελάχιστο λόγο τιμών *CostRatio*

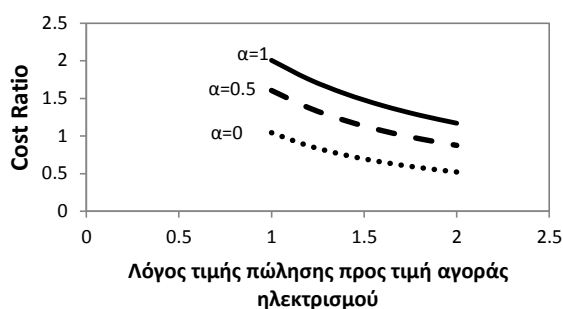
Η απόδοση του συμβατικού λέβητα είναι ίσως η σημαντικότερη μεταβλητή (Σχήμα 6.9), ειδικά για συνθήκες λειτουργίας με μικρό α . Αν ο εξοπλισμός υποκαθιστά παλιό μη αποδοτικό εξοπλισμό τα περιθώρια κέρδους είναι πολύ μεγάλα. Ο *CostRatio* μπορεί να πέσει ακόμα και κάτω από τη μονάδα, δηλαδή η ΣΗΘ να είναι βιώσιμη ακόμα και για τιμές του ηλεκτρισμού μικρότερες του φυσικού αερίου, ενώ σε ιδιαίτερα παλαιό μη αποδοτικό εξοπλισμό ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί για οποιαδήποτε τιμή του φυσικού αερίου, ανάλογα βέβαια με το βαθμό υποκατάστασης, όπως ορίζεται από το συντελεστή α .

Τέλος η επίδραση των εγγυημένων τιμών πώλησης ηλεκτρισμού από ΣΗΘΥΑ στο δίκτυο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10. Φαίνεται πως η τιμή μειώνει τον ελάχιστο λόγο και λειτουρ-



Σχήμα 6.9: Επίδραση απόδοσης υποκαθιστούμενου συμβατικού λέβητα στον ελάχιστο λόγο τιμών *CostRatio*

γεί ως επιδότηση για τη λειτουργία ΣΗΘ. Είναι φανερό ότι η επιδότηση για την εγγυημένη λειτουργία της ΣΗΘ μπορεί να έχει δύο μορφές. Είτε με εγγυημένη τιμή αγοράς ηλεκτρισμού είτε με επιδοτούμενη χαμηλή τιμή πώλησης του ΦΑ για ΣΗΘ.



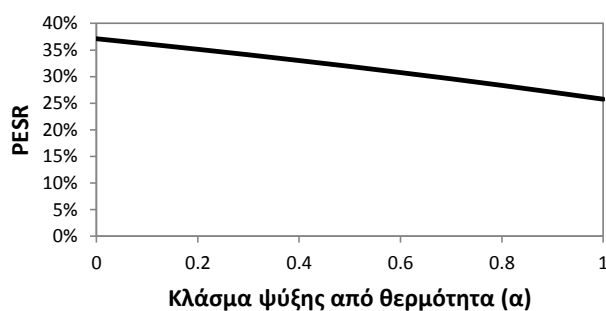
Σχήμα 6.10: Επίδραση λόγου τιμών αγοράς προς πώληση ηλεκτρισμού στον ελάχιστο λόγο τιμών *CostRatio*

Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας

Η εφαρμογή της σχέσης (6.25) για συμπαραγωγή και τριπαραγωγή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11. Όσο πιο πολλή θερμότητα χρησιμοποιείται για ψύξη τόσο λιγότερη ενέργεια εξοικονομείται. Αυτό είναι επακόλουθο του πολύ χαμηλού συντελεστή συμπεριφοράς του ψύκτη απορρόφησης σε σχέση με τον ηλεκτρικό ψύκτη.

Για υποκατάσταση λοιπόν συμβατικού εξοπλισμού τελευταίας τεχνολογίας με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 6.7 από ΣΗΘ/ΣΗΘΨ, η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί κυμαίνεται από 25% για ΣΗΘΨ μέχρι 37% για ΣΗΘ. Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η ευαισθησία του *PESR* στα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού. Ισχύει ό,τι ίσχυε και για την περίπτωση της προηγούμενης παραγράφου, δηλαδή όσο πιο αποδοτικός είναι

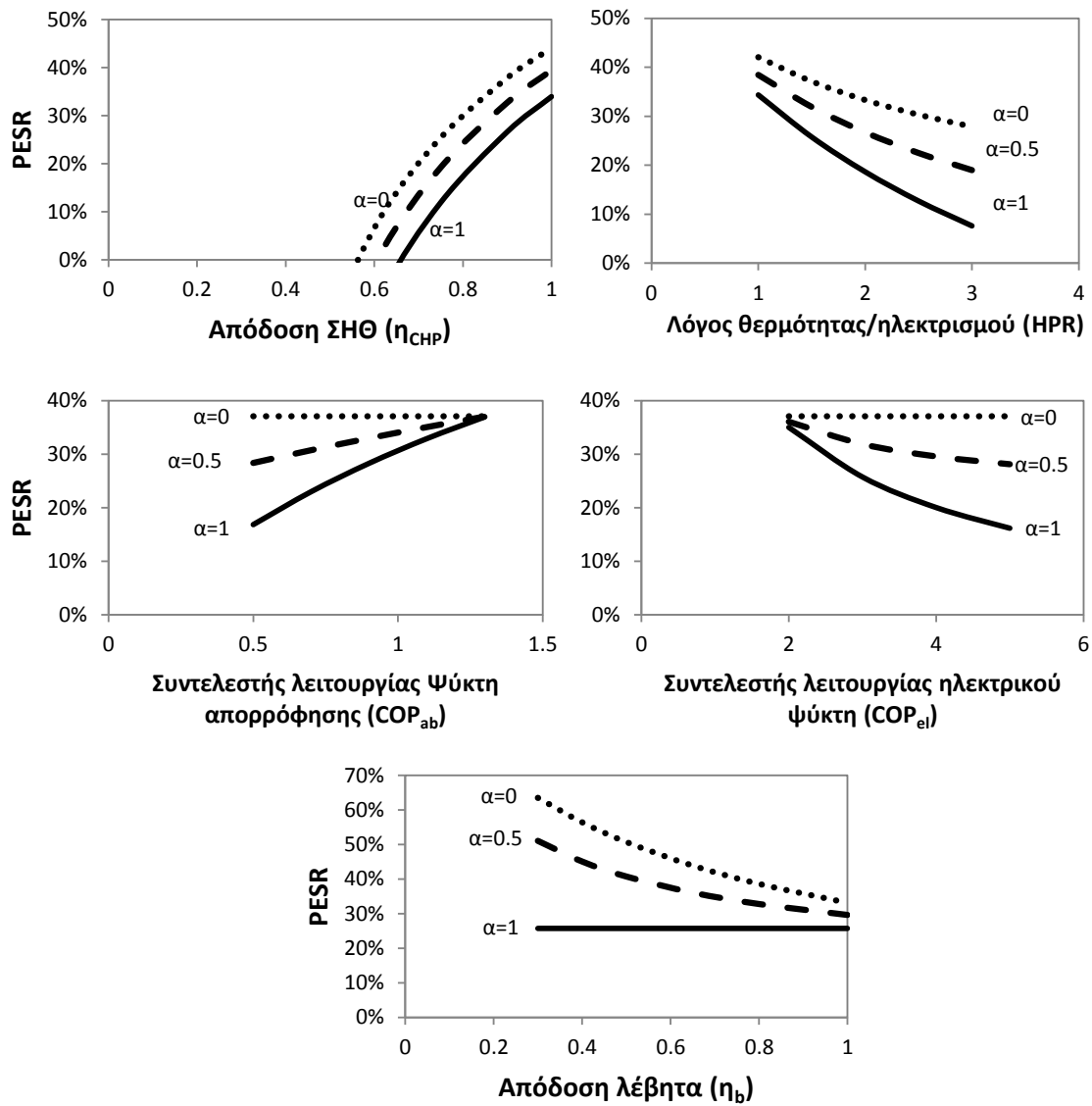
ο υποκαθιστούμενος εξοπλισμός και όσο λιγότερο αποδοτικός είναι ο εξοπλισμός συμπαραγωγής τόσο περισσότερο μικραίνει η εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχήμα 6.11: Επίδραση του κλάσματος ψύξης από ανακτώμενη θερμότητα στο λόγο εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι οι σχέσεις αυτής της ενότητας αφορούν μόνο στο κομμάτι που καλύπτεται από ΣΗΘ. Ο βαθμός που θα επιτευχθεί αυτή η εξοικονόμηση εξαρτάται κυρίως από την ομαλότητα των φορτίων και το ποσοστό κάλυψής τους από το σύστημα. Η σχέση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι υπολογίζει το μέγιστο λόγο εξοικονόμησης ενέργειας, αν όλη η ενέργεια μπορεί να καλυφθεί από το σύστημα ΣΗΘ. Το μέρος ΣΗΘ μιας μονάδας συμπαραγωγής μπορεί να είναι συμπαραγωγή "υψηλής αποδοτικότητας" (PESR τουλάχιστον ίσο με 10%), αλλά η μονάδα ως σύνολο μπορεί να έχει ακόμα και αρνητική εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Ακόμη και ένα σύστημα υψηλού ονομαστικού βαθμού απόδοσης, όπως ένα σύστημα συνδυασμένου κύκλου, μπορεί να έχει περιόδους λειτουργίας όπου τα φορτία δεν μπορούν να καλυφθούν αποδοτικά ή η επιλεγμένη στρατηγική για αυτή τη περίοδο να προκαλεί μεγάλες απώλειες πρωτογενούς ενέργειας. Είναι τότε ενδεχόμενο η ετήσια εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας να είναι χαμηλότερη του 10% και επομένως να χάνονται τα ευεργετήματα που έχει η συμπαραγωγή υψηλής αποδοτικότητας. Για το λόγο αυτόν, ο βέλτιστος σχεδιασμός και η βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής είναι κρίσιμης σημασίας.

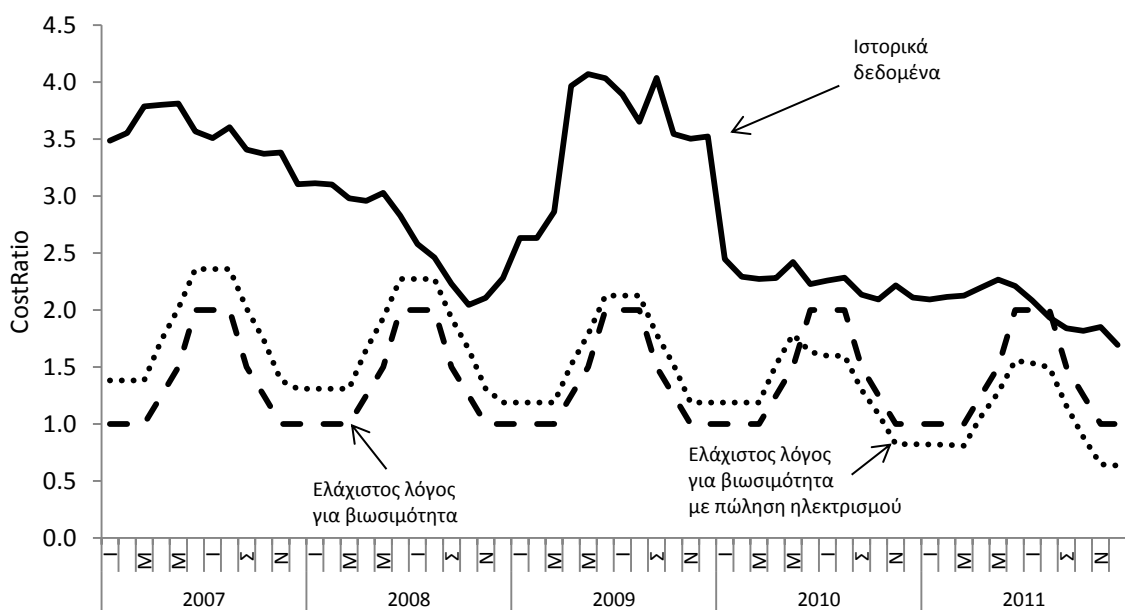
Είναι ξεκάθαρο ότι το συγκριτικό πλεονέκτημα της ΣΗΘΨ έναντι της ΣΗΘ δεν οφείλεται στην εγγενή τεχνολογική υπεροχή και μεγαλύτερη απόδοση της δεύτερης έναντι της πρώτης αλλά στη μεγαλύτερη ευελιξία και πεδίο εφαρμογής της. Για αυτόν το λόγο παρόλο που θεωρητικά η εξοικονόμηση ενέργειας είναι μεγαλύτερη στη ΣΗΘ, ένα βέλτιστο σύστημα ΣΗΘΨ μπορεί να πετύχει μεγαλύτερο βαθμό κάλυψης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μελέτη περίπτωσης του Κεφαλαίου 5 όπου ο λόγος PESR της βέλτιστης λύσης είναι μεγαλύτερος για ΣΗΘΨ σε σχέση με ΣΗΘ (25% έναντι 19% από Σχήμα 5.12).



Σχήμα 6.12: Επίδραση των χαρακτηριστικών του νέου και υφιστάμενου εξοπλισμού στο λόγο εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας

6.3.3 Ρυθμιστικό πλαίσιο στην Ελλάδα

Η παράμετρος ελέγχου για τη βιώσιμη λειτουργία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επισκόπηση της προοπτικής κερδοφορίας των συστημάτων τριπαραγωγής σε μια ανταγωνιστική ή ρυθμιζόμενη αγορά. Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη του λόγου τιμών ηλεκτρισμού/ ΦΑ (*Costratio*) στην Ελλάδα. Η τιμή του φυσικού αερίου που χρησιμοποιήθηκε είναι ίση με τις τιμές που ανακοινώνει η ΔΕΠΑ για παραγωγούς ΣΗΘ (μέση τιμή των ΕΠΑ) ενώ η τιμή ηλεκτρισμού λήφθηκε ίση με την τιμή πώλησης της ΔΕΗ που έχει ένας καταναλωτής με συντελεστή χρησιμοποίησης κοντά στο 60%, τιμή που είναι τυπική για καταναλωτές που διαχειρίζονται σωστά τα φορτία τους. Έχει επίσης σχεδιαστεί ο ελάχιστος λόγος για να είναι η λειτουργία της ΣΗΘ κερδοφόρα, σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας για συμβατικό εξοπλισμό με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 6.7. Αυτός εναλλάσσεται περιοδικά, όπου στους χειμερινούς μήνες γίνεται η υπόθεση ότι δεν χρειάζονται ψυκτικά φορτία και η μονάδα λειτουργεί σε απλή συμπαραγωγή ($\alpha = 0$), ενώ κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η μονάδα λειτουργεί σχεδόν σε πλήρη τριπαραγωγή ($\alpha = 0.95$).



Σχήμα 6.13: Ιστορική εξέλιξη του *Costratio* για την ελληνική αγορά

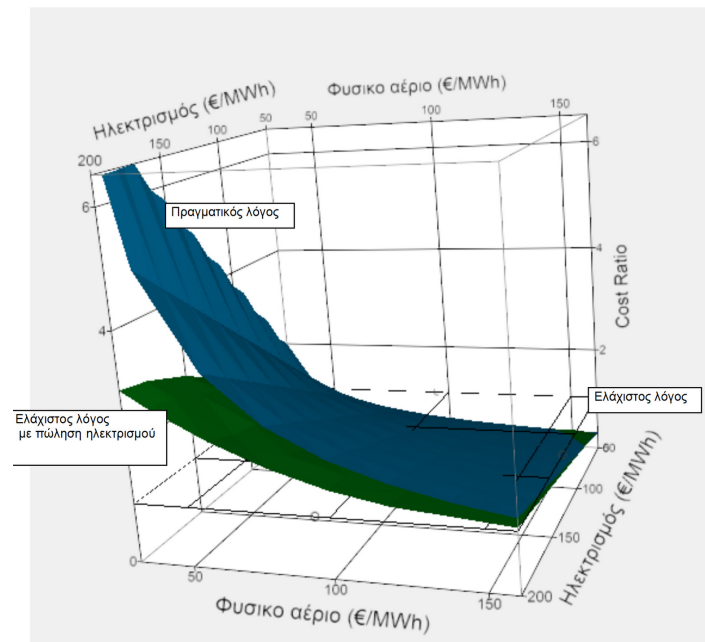
Φαίνεται ότι λόγω της αυξανόμενης τιμής του φυσικού αερίου στην Ελλάδα, που βασίζεται στην αυξανόμενη τιμή των πετρελαιοειδών και τη ρυθμιζόμενη τιμή της αγοράς ηλεκτρισμού, ο λόγος αυτός βαίνει μειούμενος σε σημείο που η κερδοφορία, πόσο μάλλον η

αποπληρωμή της επένδυσης τίθεται υπό αμφισβήτηση.

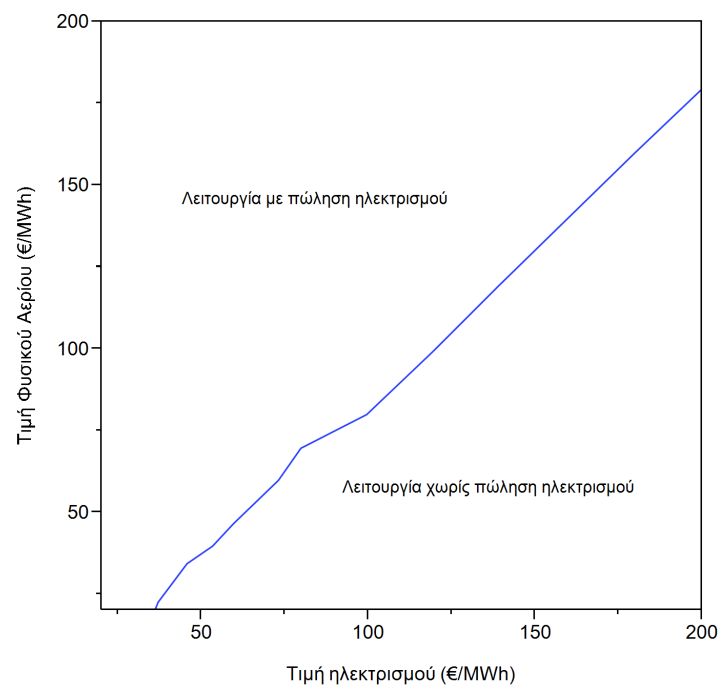
Στο ίδιο διάγραμμα έχει σχεδιαστεί και ο ελάχιστος λόγος που απαιτείται για να είναι η ΣΗΘ κερδοφόρα, αν ο ηλεκτρισμός πωλείται στο δίκτυο στην εγγυημένη τιμή όπως ορίζεται κάθε φορά από τη νομοθεσία. Η εγγυημένη τιμή αγοράς που χρησιμοποιήθηκε σε αυτόν τον υπολογισμό είχε παρουσιαστεί στο Σχήμα 3.11. Από την άνοιξη του 2010 και έπειτα, είναι φανερή η επίδραση του συντελεστή ρήτρας που έχει εισαχθεί με το νόμο 3851/10, ο οποίος συνέδεσε τις τιμές αγοράς του ΦΑ με την εγγυημένη τιμή πώλησης του ηλεκτρισμού. Μετά από αυτήν τη ρύθμιση και σε συνδυασμό με τις πολύ υψηλές τιμές του ΦΑ, αυτή η στρατηγική αποτελεί το μόνο τρόπο με τον οποίο μια εγκατάσταση τριπαραγωγής μπορεί να λειτουργήσει βιώσιμα. Σήμερα, οι μονάδες συμπαραγωγής σε κτήρια διοχετεύουν τη συμπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο Δίκτυο, ώστε να επωφεληθούν από την υψηλή τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, αγοράζουν την απαιτούμενη για τη λειτουργία τους ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο ενώ αξιοποιούν όλη τη χρήσιμη θερμότητα που παράχθηκε από τον κινητήρα για την κάλυψη των θερμικών / ψυκτικών αναγκών στο κτήριο.

Τέλος, εξετάζεται το κατά πόσον ο συντελεστής ρήτρας (Κεφάλαιο 3.4.2) αποτελεί επαρκές κίνητρο για τη λειτουργία των μονάδων τριπαραγωγής. Για το σκοπό αυτό έγινε η παρακάτω ανάλυση βασισμένη στη συσχέτιση των τιμών αγοράς ηλεκτρισμού από το δίκτυο με τις τιμές φυσικού αερίου και την θεωρητική σχέση που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Για διάφορες τιμές του φυσικού αερίου (C_f) ορίζεται η τιμή πώλησης ηλεκτρισμού στο δίκτυο ($C_{e,sel}$) με τον τύπο που ορίζει ο ανωτέρω νόμος και για διάφορες τιμές ηλεκτρισμού (C_e) υπολογίζεται ο ελάχιστος λόγος με αγορά του ηλεκτρικού ρεύματος σύμφωνα με τη σχέση (6.21). Ο τελευταίος σχεδιάζεται στο διάγραμμα 6.14 μαζί με τον πραγματικό λόγο τιμών ($\frac{C_e}{C_f}$). Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται ο ελάχιστος λόγος για λειτουργία χωρίς πώληση ενέργειας, που είναι σταθερός με 1, όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Φαίνεται ότι με το συντελεστή ρήτρας σε κάθε περίπτωση ο λόγος τιμών είναι μεγαλύτερος από τον ελάχιστο απαιτούμενο καλύπτοντας τις περιπτώσεις στις οποίες η λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής δεν ήταν βιώσιμη χωρίς αυτόν, κυρίως όταν το φυσικό αέριο ήταν ακριβό.

Από την τομή του ελάχιστου λόγου λειτουργίας με και χωρίς πώληση λαμβάνονται οι περιοχές αποδοτικής λειτουργίας που εμφανίζονται στο Σχήμα 6.15. Στην περιοχή που το φυσικό αέριο είναι φτηνό και ο ηλεκτρισμός ακριβός συμφέρει η πώληση του συμπαραγόμενου ηλεκτρισμού ενώ σε αντίθετη περίπτωση, όταν ο ηλεκτρισμός είναι ακριβός και το φυσικό αέριο φτηνό, συμφέρει η λειτουργία χωρίς την πώληση του ηλεκτρισμού. Συμπεραίνεται από τα παραπάνω ότι αυτός ο συντελεστής θεωρείται ότι παρέχει το απαραίτητο κίνητρο για την οικονομική λειτουργία των συστημάτων ΣΗΘ.



Σχήμα 6.14: Ανάλυση ευαισθησίας ελάχιστου λόγου τιμών για βιώσιμη λειτουργία στην ελληνική αγορά



Σχήμα 6.15: Επιλογή τρόπου λειτουργίας μονάδων ΣΗΘ στην ελληνική αγορά

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Βασικός στόχος της διατριβής, που τέθηκε εξαρχής, ήταν η επιλογή του κατάλληλου συστήματος συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρισμού και η ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης μεθόδου σχεδιασμού και αριστοποίησης ενός συστήματος συνδυασμένης παραγωγής μελετώντας την επίδραση όλων των κρίσιμων παραμέτρων. Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε αφορά στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών εμπορικών κτηρίων. Γι' αυτό το σκοπό δημιουργήθηκε ένα αναλυτικό ωριαίο πρότυπο που προσομοιώνει τις ενεργειακές ροές και τη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος.

Με το παραπάνω μελετήθηκε η διακύμανση διάφορων οικονομικών (καθαρά παρούσα αξία, λειτουργικό κέρδος) και λειτουργικών παραμέτρων (κάλυψη φορτίων, πρωτογενής εξοικονόμηση ενέργειας, συντελεστής χρησιμοποίησης φορτίου) ως συνάρτηση του μεγέθους του κινητήρα για διαφορετικές διατάξεις και λειτουργικές παραμέτρους (στρατηγική λειτουργίας, επιλογή τιμολογίου). Ο σχεδιασμός ενός συστήματος τριπαραγωγής διατυπώθηκε ως ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής αριστοποίησης, όπου τα τελικά κριτήρια είναι οικονομικοί, ενεργειακοί και περιβαλλοντικοί δείκτες και οι μεταβλητές απόφασης εκφράζουν χαρακτηριστικά μεγέθους και λειτουργικών παραμέτρων. Το σύνολο των μη κυριαρχουσών λύσεων (λύσεις Pareto) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αποφάσεων καθώς δείχνει ξεκάθαρα τους αντικρουόμενους στόχους και την επίδρασή τους στην επίδοση του συστήματος. Ποσοτικοποιήθηκε τόσο η αβεβαιότητα της ζήτησης ενέργειας με στοχαστικά πρότυπα όσο και το ρυθμιστικό και γεωπολιτικό ρίσκο εισαγάγοντας κατανομές στις τιμές πρωτογενούς ενέργειας. Με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo συγκρίθηκαν οι βέλτιστες λύσεις και δημιουργήθηκε ένα κριτήριο επιλογής με βάση το επιθυμητό αναλαμβανόμενο ρίσκο ή την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων ακραίων ενδεχομένων.

Επιπλέον, επιχειρήθηκε η δημιουργία εμπειρικών κανόνων για τη γενίκευση του σχεδιασμού και τη βιώσιμη λειτουργία του συστήματος. Ο υπολογισμός ενός εμπειρικού προτύπου για το σχεδιασμό που προέκυψε από την αναλυτική επίλυση του προτύπου και μιας θεωρητικής παραμέτρου ελέγχου βιωσιμότητας επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των αλ-

ληλεπιδράσεων των κρίσιμων παραμέτρων στην επίδοση του συστήματος.

7.1 Σύνοψη της συνεισφοράς

Η διατριβή αυτή προσέφερε σημαντική εμπειρία στην κατανόηση των συστημάτων τριπαραγωγής και στο σημερινό επίπεδο γνώσης που αφορούν στη χρήση εργαλείων προσομοίωσης και αριστοποίησης για την ανάλυση παρόμοιων συστημάτων. Επίσης συνδύασε με πρωτότυπο τρόπο θεωρίες, όπως πολυστοχική αριστοποίηση με εξελικτικούς αλγορίθμους και αριστοποίηση με θεώρηση αβεβαιοτήτων και μεθόδους ανάπτυξης παρένθετων προτύπων. Με κάποιους περιορισμούς και παραδοχές, που ήταν απαραίτητοι για να διατηρήσουν την ανάλυση του συστήματος σε ένα λογικό βαθμό πολυπλοκότητας, η προτεινόμενη μεθοδολογία παρήγαγε αποτελέσματα που επέτρεψαν την ανάλυση διαφόρων εξωγενών παραγόντων στην επίδοση των συστημάτων τριπαραγωγής.

Το πρόβλημα αριστοποίησης του συγκεκριμένου συστήματος έχει μερικά μοναδικά χαρακτηριστικά που καθιστούν την επίλυσή του αρκετά περίπλοκη και πιο συγκεκριμένα είναι ο μεγαλύτερος βαθμός ελευθερίας σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα συμπαραγωγής και η εξάρτηση του από εξωγενείς παράγοντες.

Οι επεκτάσεις που έγιναν στη μελέτη των συστημάτων αυτών σε σχέση με τα αντίστοιχα πρότυπα της βιβλιογραφίας αφορούν στην:

1. Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ωριαία αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος ως λειτουργική υπερδομή.
2. Ανάπτυξη νέας στρατηγικής λειτουργίας που εκμεταλλεύεται τα συστήματα τριπαραγωγής.
3. Ανάπτυξη οικονομικού, ενεργειακού και περιβαλλοντικού κριτηρίου για την αξιολόγηση των συστημάτων τριπαραγωγής και την εύρεση του συνόλου των μη κυριαρχούσων λύσεων.
4. Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη συγκριτική αξιολόγηση της αβεβαιότητας που ενέχουν τα συστήματα αποκεντρωμένης παραγωγής και την επιλογή του συστήματος με το ελάχιστο αναλαμβανόμενο ρίσκο.
5. Γενίκευση της μεθόδου αριστοποίησης με εφαρμογή απλοποιημένης μεθόδου προτυποποίησης ενεργειακών φορτίων.
6. Ανάπτυξη θεωρητικής παραμέτρου ελέγχου για τον έλεγχο της βιωσιμότητας ανάλογα με τις τιμές των ανταγωνιστικών καυσίμων και τον υπολογισμό της μέγιστης εξοικονόμησης ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί.

Απο την εφαρμογή του προτύπου έγινε δυνατή η εξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων τα οποία χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες: Ειδικά συμπεράσματα ως προς την λειτουργία των συστημάτων τριπαραγωγής, όπως διαπιστώθηκαν και στη μελέτη περίπτωσης, και γενικά που αφορούν σε προτάσεις για τη διεύθυνση των συστημάτων αυτών και γενικότερα τη χάραξη πολιτικής στο τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας.

7.2 Ειδικά συμπεράσματα

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:

Αποτελέσματα αριστοποίησης Σε κάθε περίπτωση τα συστήματα τριπαραγωγής ήταν πιο οικονομικά, με μεγαλύτερο ενεργειακό όφελος και πιο φιλικά στο περιβάλλον απο το συμβατικό εξοπλισμό που υποκατέστησαν αλλά και απο τα συμβατικά συστήματα συμπαραγωγής.

Διαστασιολόγηση εξοπλισμού Για μικρές επενδύσεις το μέγεθος του κινητήρα είναι μικρό, και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ψύκτης. Το βέλτιστο μέγεθος στην τριπαραγωγή είναι πάντα μεγαλύτερο για την επιπλέον αξιοποίηση της θερμότητας για ψύξη. Το επιπλέον κόστος που χρειάζεται για την προσέγγιση του ενεργειακού αρίστου δεν μπορούν να το επωμίζονται οι επενδυτές αλλά απαιτείται η χρήση κάποιου οικονομικού κινήτρου.

Επιλογή στρατηγικής λειτουργίας Η προτεινόμενη στρατηγική κάλυψης των "ισοδύναμων" φορτίων φαίνεται να είναι η κατάλληλη για τη λειτουργία της μονάδας στις περισσότερες περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο όφελος στην ενεργειακή εξοικονόμηση γίνεται συνήθως όταν εφαρμόζεται η στρατηγική ακολουθήσεως θερμικών ισοδύναμων φορτίων καθώς τότε μειώνεται η περίσσεια θερμότητας. Η μέγιστη μείωση των εκπομπών γίνεται όταν το σύστημα ακολουθεί τα ηλεκτρικά ισοδύναμα φορτία καθώς υποκαθιστάται ο ηλεκτρισμός δικτύου που προέρχεται απο ρυπογόνο μείγμα καυσίμου σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό προκαλώντας αντίστοιχη μείωση στις εκπομπές. Περιπτώσεις όπου η στρατηγική μείωσης των αιχμών είναι η βέλτιστη είναι περιορισμένες και συνήθως αφορούν στους καλοκαιρινούς μήνες.

Επιλογή τιμολογίου Τα χαρακτηριστικά των τιμολογίων μπορούν να περιγραφούν, βάσει της συμπεριφοράς τους, με μία παράμετρο: το συντελεστή χρησιμοποίησης δικτύου.

Κατα κανόνα, όσο πιο μεγάλος κινητήρας χρησιμοποιείται τόσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης του δικτύου και συνεπώς το βέλτιστο τιμολόγιο είναι αυτό που προσφέρει χαμηλότερες τιμές ηλεκτρισμού για μικρούς συντελεστές χρησιμοποίησης (π.χ. Β2 της ΔΕΗ).

Επίδραση αβεβαιότητας Λήφθηκε υπόψιν η αβεβαιότητα μεταβολών τόσο στη συνολική αναμενόμενη ζήτηση, όσο και στο ημερήσιο προφίλ των φορτίων αλλά και στις διακυμάνσεις στην τιμή του καυσίμου. Συνυπολογίζοντας το ρίσκο, η τριπαραγωγή έχει μεγαλύτερη αναμενόμενη απόδοση αλλά και μεγαλύτερο αναλαμβανόμενο ρίσκο από ένα αντίστοιχο σύστημα συμπαραγωγής. Εξακολουθεί να βρίσκεται πάνω στο όριο βέλτιστων αποδόσεων και να επικρατεί στοχαστικά από τη μηδενική λύση αλλά και τη λύση της συμπαραγωγής.

7.3 Γενικά συμπεράσματα

Οι επενδύσεις συμπαραγωγής ή τριπαραγωγής ως δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας οδηγούν σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στην παραγωγική διαδικασία με επακόλουθη μείωση του κόστους των προϊόντων ή υπηρεσιών. Αυτή η αύξηση στη ζήτηση μπορεί να ωθήσει τη δραστηριότητα και την απασχόληση και να ωφεληθεί η τοπική οικονομία.

Επίδραση χαρακτηριστικών των φορτίων Από την ανάλυση του παρένθετου προτύπου που αναπτύχθηκε έγινε ξεκάθαρο ότι σημαντικότερος παράγοντας για την εγκατάσταση συστημάτων τριπαραγωγής έναντι συμπαραγωγής είναι ο συγχρονισμός ψυκτικών-θερμικών φορτίων, που πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Οι ώρες λειτουργίας θερμικών και ψυκτικών φορτίων έχουν επίσης μεγάλη σημασία. Μία ακόμη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη λειτουργία ψυκτών απορρόφησης είναι ο συντελεστής των θερμικών φορτίων, όπου όσο πιο ομαλά είναι τα φορτία τόσο περισσότερο ευνοείται η λειτουργία των ψυκτών απορρόφησης. Τα παραπάνω επιβεβαιώνουν τη σημασία των μέτρων διαχείρισης των φορτίων πριν από κάθε επένδυση εξοικονόμησης ενέργειας.

Συσχέτιση τιμών ανταγωνιστικών καυσίμων/παροχών Η κερδοφορία συσχετίζεται με το λόγο τιμών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου και όχι με τη διαφορά τους, με την έννοια ότι όσο μεγαλύτερη η τιμή του ΦΑ τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η διαφορά μεταξύ τους. Βάσει αυτής της λογικής, ο συντελεστής ρήτρας που εφαρμόζεται σήμερα ως επιδότηση είναι προς τη σωστή κατεύθυνση. Για τη οικονομική λειτουργία του συστήματος—βασιζόμενοι

στις συνήθεις τιμές για συμβατικό εξοπλισμό των κτηρίων χωρίς τον υπολογισμό των αποσβέσεων—φάνηκε ότι η τιμή του ηλεκτρισμού πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση (για την περίπτωση της απλής συμπαραγωγής) ή μία φορά μεγαλύτερη από την τιμή του φυσικού αερίου. Για να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα της επένδυσης αυτός ο δείκτης πρέπει να είναι ακόμα μεγαλύτερος. Όσο ανοίγει η ψαλίδα τιμών τόσο θα ωφελείται η τριπαραγωγή. Συνεπώς για να αξιοποιηθούν πλήρως τα οφέλη από την επιπλέον εξοικονόμηση μιας επένδυσης τριπαραγωγής προτείνεται να υπάρχει διαφορετική (μεγαλύτερη) εγγυημένη τιμή αγοράς έναντι της απλής συμπαραγωγής.

Σύγκριση συμπαραγωγής – τριπαραγωγής Λόγω του χαμηλότερου συντελεστή συμπεριφοράς, η λειτουργία της τριπαραγωγής χρειάζεται μεγαλύτερη διαφορά στη τιμή ΦΑ και ηλεκτρισμού. Για τον ίδιο λόγο, η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας είναι μικρότερη για την περίπτωση της τριπαραγωγής: η τιμή αυτή είναι 25% για τριπαραγωγή και 37% για συμπαραγωγή (για υποκατάσταση σύγχρονου συμβατικού εξοπλισμού). Παρόλο που ισχύει αυτό, η πρώτη έχει μεγαλύτερη κάλυψη λόγω της ευελιξίας της και στην περίπτωση αυτή η συνολική εξοικονόμηση του συστήματος είναι μεγαλύτερη, όπως στην περίπτωση του Κεφαλαίου 5 όπου η άριστη λύση για την περίπτωση της τριπαραγωγής είναι 25% και για συμπαραγωγή 19%. Με λίγα λόγια, το συγκριτικό πλεονέκτημα της ΣΗΘΨ έναντι της ΣΗΘ δεν οφείλεται στην εγγενή τεχνολογική υπεροχή και μεγαλύτερη απόδοση της δεύτερης έναντι της πρώτης αλλά στη μεγαλύτερη ευελιξία και στο ευρύτερο πεδίο εφαρμογής της.

Αξιολόγηση κινήτρων για διείσδυση στην ελληνική αγορά Απο την ανάλυση του Κεφαλαίου 6.3 διαπιστώθηκε ότι ο νόμος 3851/2010 έθεσε τα κατάλληλα κίνητρα για την εγγυημένη βιώσιμη λειτουργία. Ο συντελεστής ρήτρας καλύπτει επαρκώς την περίπτωση όπου το σύστημα δεν μπορούσε να λειτουργήσει γιατί η τιμή του ηλεκτρισμού ήταν πολύ χαμηλή ενώ η τιμή του καυσίμου της ΣΗΘ υψηλή. Επίσης υπολογίστηκε θεωρητικά το όριο των δύο τύπων λειτουργίας ανάλογα με τις τιμές του καυσίμου.

7.4 Προτάσεις χάραξης πολιτικής για τη διάδοση τεχνολογιών συμπαραγωγής

Με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα και με βέβαιη πρόβλεψη για αρκετές ακόμη δεκαετίες, τα αυτόνομα ενεργειακά συστήματα με καύσιμο ΦΑ είναι οι βέλτιστες δυνατές επιλογές τόσο από πλευράς κόστους παραγωγής όσο και ενεργειακής απόδοσης και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η ρυθμιστική υποστήριξη προς τις τεχνολογίες συμπαραγωγής είναι απαραίτητη για να συμβάλει στη μικρότερη χρήση πρωτογενούς ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών των αέριων του θερμοκηπίου. Πρέπει να παρασχεθούν τα κατάλληλα κίνητρα ώστε τα οικονομικά, περιβαλλοντικά και ενεργειακά οφέλη να συμβαδίζουν, δηλαδή το οικονομικό άριστο να μετακινηθεί κοντά στο ενεργειακό/ περιβαλλοντικό. Η σημερινή πολιτική κινείται προς τη σωστή κατεύθυνση με τη μείωση του κόστους κρατικής ενίσχυσης και την αύξηση της επιδότησης των τιμών καυσίμων με τις εξής δύο μορφές: Μείωση της τιμής του φυσικού αερίου ή την επιδότηση της τιμής αγοράς του από τις μονάδες ΣΗΘ, την αύξηση της τιμής αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από το διαχειριστή του δικτύου. Άλλες μορφές επιδότησης μπορεί να είναι η επιδότηση του κόστους σύνδεσης των μονάδων ΣΗΘ με το δίκτυο φυσικού αερίου και το ηλεκτρικό δίκτυο, ή η εξαιρέση των καυσίμων των μονάδων αυτών από επιβαρύνσεις και επιπλέον φόρους. Με την εξασφάλιση μιας σταθερής διαφοράς του καυσίμου της συμπαραγωγής έναντι των ανταγωνιστικών καυσίμων μπορεί να μειωθεί η αβεβαιότητα της επένδυσης, γεγονός που θα λειτουργήσει ως κίνητρο για τη διάδοση της τεχνολογίας. Το σημαντικότερο βήμα που κρίνεται αναγκαίο να γίνει είναι η απλοποίηση της αδειοδοτικής διαδικασίας και η πιο ευνοϊκή μεταχείριση των τεχνολογιών συμπαραγωγής.

Συνοψίζοντας, η επένδυση σε τεχνολογίες συνδυασμένης παραγωγής θα ωφελήσει σίγουρα τον καταναλωτή, ο οποίος—εκτός από την ενεργειακή του αυτονομία—θα απολαμβάνει και σημαντικό λειτουργικό όφελος. Η λεπτομερής εκτίμηση όλων των παραμέτρων είναι επιβεβλημένη για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος, τη μεγιστοποίηση του κέρδους και των υπόλοιπων ενεργειακών και περιβαλλοντικών οφελών. Σε κάθε περίπτωση, οι τεχνολογίες συνδυασμένης παραγωγής αναμφίβολα θα πρωταγωνιστήσουν στο ενεργειακό σκηνικό, αφενός συντελώντας στη δημιουργία ενός ανοιχτότερου συστήματος αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας, αφετέρου ελαχιστοποιώντας τα μειονεκτήματα του σημερινού συστήματος και από τρίτου λειτουργώντας ως εργαλείο ευαισθητοποίησης των καταναλωτών ενέργειας στη μείωση του ρυθμού χρησιμοποίησης των φυσικών πόρων, καθώς πλέον αναδεικνύονται σε αναγκαίο μέσο επίτευξης των περιβαλλοντικών δεσμεύσεων της χώρας.

Παράρτημα Α΄

Προσαρμογή παρένθετου προτύπου

Παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες οι συντελεστές της εξίσωσης επιφάνειας απόκρισης του παρένθετου προτύπου του Κεφαλαίου 6.2.3. Οι Πίνακες είναι ταξινομημένοι ως προς την σημαντικότητα των συντελεστών και περιέχουν τις εξής πληροφορίες:

- *Παράμετρος*: Περιγράφει τις παραμέτρους του γραμμικού προτύπου. Η εξίσωση πρόβλεψης είναι ο γραμμικός συνδυασμός των παραμέτρων.
- *Τυπικό σφάλμα*: Περιγράφει τις εκτιμήσεις του τυπικού σφάλματος των παραμέτρων. Χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των διαστήματων εμπιστοσύνης.
- *t-ratio*: Περιγράφει τα στατιστικά τέστ της μηδενικής υπόθεσης ότι η κάθε παράμετρος είναι 0. Αν αυτή η υπόθεση είναι αληθής τότε το μέγεθος αυτό ακολουθεί μια κατανομή t-student.
- *Prob>|t|*: Περιγράφει την παρατηρούμενη πιθανότητα όπως υπολογίζεται από τον t-ratio. Αφορά στην πιθανότητα να έχει υπολογιστεί t-ratio ίσο ή μεγαλύτερο (σε απόλυτη τιμή) καθαρά από τύχη, δεδομένου ότι η μηδενική υπόθεση είναι αληθής. Συνήθως μια τιμή κάτω από το 0.05 θεωρείται ικανοποιητική για να ακυρώσει τη μηδενική υπόθεση ότι η συγκεκριμένη παράμετρος είναι στατιστικά διαφορετική από το 0.

Πίνακας Α.1: Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής *OpCost*

Συντελεστής	Παράμετρος	Τυπ. Σφάλμα	t-ratio	Prob> t	
	Power	3751.6167	16.19	231.6700	<0.0001
	HPR	1700.6199	16.70	101.8300	<0.0001
	Intercept	4456.6708	61.00	73.0600	<0.0001
	Power*HPR	1853.2539	25.62	72.3400	<0.0001
	CFe	961.6195	15.33	62.7100	<0.0001
	CHR	889.9297	14.26	62.4000	<0.0001
	Chrs	585.3824	14.59	40.1400	<0.0001
	CFc	569.8592	14.36	39.6700	<0.0001
	CFh	644.9688	16.33	39.5000	<0.0001
	Power*CHR	887.3502	25.46	34.8500	<0.0001
	Thrs	658.0866	19.35	34.0100	<0.0001
	Power*CFe	908.1079	26.76	33.9300	<0.0001
	Power*CFh	863.7284	26.49	32.6100	<0.0001
	HPR*CHR	821.2134	26.44	31.0700	<0.0001
	HPR*CFh	711.9761	25.95	27.4400	<0.0001
	HPR*CFc	595.7739	25.71	23.1800	<0.0001
	Power*CFc	585.9674	25.71	22.7900	<0.0001
	Power*CR	-449.5495	20.05	-22.4200	<0.0001
	Chrs*CHR	567.8901	25.52	22.2500	<0.0001
	Power*Thrs	647.4422	30.06	21.5400	<0.0001
	CHR*CFc	546.3268	25.52	21.4100	<0.0001
	Power*Chrs	555.0050	26.05	21.3100	<0.0001
	Chrs*HPR	567.4612	26.95	21.0600	<0.0001
	HPR*CR	-422.2006	20.05	-21.0600	<0.0001
	Thrs*HPR	562.9695	31.59	17.8200	<0.0001
	Thrs*CFh	559.2296	31.57	17.7100	<0.0001
	Chrs*CFc	406.8071	25.24	16.1200	<0.0001
	CFh*CR	-296.2513	20.68	-14.3300	<0.0001
	CR	-282.1466	20.74	-13.6000	<0.0001
	CR*CR	221.4758	17.28	12.8200	<0.0001
	Thrs*CR	-229.6172	24.96	-9.2000	<0.0001
	CR*CR*CR	-104.8286	12.71	-8.2500	<0.0001
	CHR*CFe	150.0887	26.47	5.6700	<0.0001

Πίνακας Α΄.2: Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής P_0

Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t-ratio	Prob> t
Power	1.3064	0.03	44.5100	<0.0001
Thrs	1.3662	0.03	41.5800	<0.0001
CR	1.1291	0.03	41.0600	<0.0001
HPR	1.0536	0.03	34.8100	<0.0001
Power*HPR	1.2111	0.05	25.9100	<0.0001
Power*CR	0.9086	0.04	25.0500	<0.0001
HPR*CFh	1.1877	0.05	24.9800	<0.0001
Power*CFh	1.1672	0.05	24.2600	<0.0001
Power*Thrs	1.2379	0.05	22.7300	<0.0001
Intercept	-2.0133	0.09	-22.5500	<0.0001
Thrs*HPR	0.8715	0.06	15.2600	<0.0001
CFe	0.4714	0.03	15.2200	<0.0001
Thrs*CR	-0.5828	0.04	-14.5000	<0.0001
HPR*CR	0.4635	0.04	12.6900	<0.0001
Thrs*CFh	0.6976	0.06	12.1500	<0.0001
CFh	0.7657	0.07	11.2100	<0.0001
CFe*CR	0.3622	0.04	9.7700	<0.0001
ThvCo*CR	-0.4242	0.04	-9.5100	<0.0001
CFh*CR	0.3407	0.04	8.9500	<0.0001
ThvCo	0.3168	0.04	8.7900	<0.0001
Power*CFe	0.3976	0.05	8.1300	<0.0001
Chrs*CFc	-0.3430	0.05	-7.4800	<0.0001
ThvCo*HPR	0.4249	0.06	6.5400	<0.0001
ElvTh	0.2030	0.03	6.5200	<0.0001
Power*ThvCo	0.3646	0.06	5.6800	<0.0001
CFh*CFh	0.2891	0.05	5.5500	<0.0001
CFc	-0.1278	0.03	-4.8900	<0.0001
Chrs	-0.0987	0.03	-3.7200	0.0002
Thrs*CFe	-0.1578	0.06	-2.8300	0.0046

Πίνακας Α'.3: Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής *P*

Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t-ratio	Prob> t
Power	2.3653	0.03	70.5100	<0.0001
CR	1.4112	0.03	55.3800	<0.0001
HPR	1.7225	0.03	49.9200	<0.0001
CFh	1.0726	0.03	35.5600	<0.0001
Power*HPR	1.8112	0.05	34.1300	<0.0001
Power*CR	1.3466	0.04	32.3600	<0.0001
CHR	0.7472	0.03	25.1700	<0.0001
Chrs	0.7244	0.03	23.9500	<0.0001
Thrs	0.8173	0.04	23.0300	<0.0001
Intercept	-1.5478	0.08	-20.4500	<0.0001
CHR*CR	0.7594	0.04	19.1600	<0.0001
HPR*CR	0.7878	0.04	18.9500	<0.0001
Power*CFh	1.0293	0.05	18.7300	<0.0001
CFe	0.6463	0.03	18.7000	<0.0001
CFc	0.5178	0.03	17.3600	<0.0001
CFc*CR	0.6673	0.04	17.3100	<0.0001
Chrs*CR	0.6144	0.04	15.7000	<0.0001
HPR*CFh	0.7666	0.05	14.2400	<0.0001
Power*CHR	0.7454	0.05	14.0800	<0.0001
CFe*CR	0.5785	0.04	13.7000	<0.0001
Power*CFe	0.7271	0.06	13.0700	<0.0001
Power*Thrs	0.7828	0.06	12.5700	<0.0001
Chrs*CFc	0.6571	0.05	12.5300	<0.0001
Power*Chrs	0.6694	0.05	12.3800	<0.0001
Chrs*CHR	0.5798	0.05	10.9800	<0.0001
Power*CFc	0.5808	0.05	10.8800	<0.0001
HPR*CHR	0.5498	0.05	10.0200	<0.0001
Chrs*HPR	0.5147	0.06	9.1900	<0.0001
HPR*CFc	0.4851	0.05	9.0700	<0.0001
Thrs*HPR	0.5896	0.07	9.0000	<0.0001
CHR*CFe	0.4573	0.06	8.2300	<0.0001
Power*ElvCo	0.4272	0.07	6.4100	<0.0001
ElvCo	0.2170	0.04	5.7100	<0.0001
CFh*CR	-0.2024	0.04	-5.1400	<0.0001
Thrs*CFe	0.1088	0.06	1.7600	0.0781

Πίνακας Α'.4: Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής A

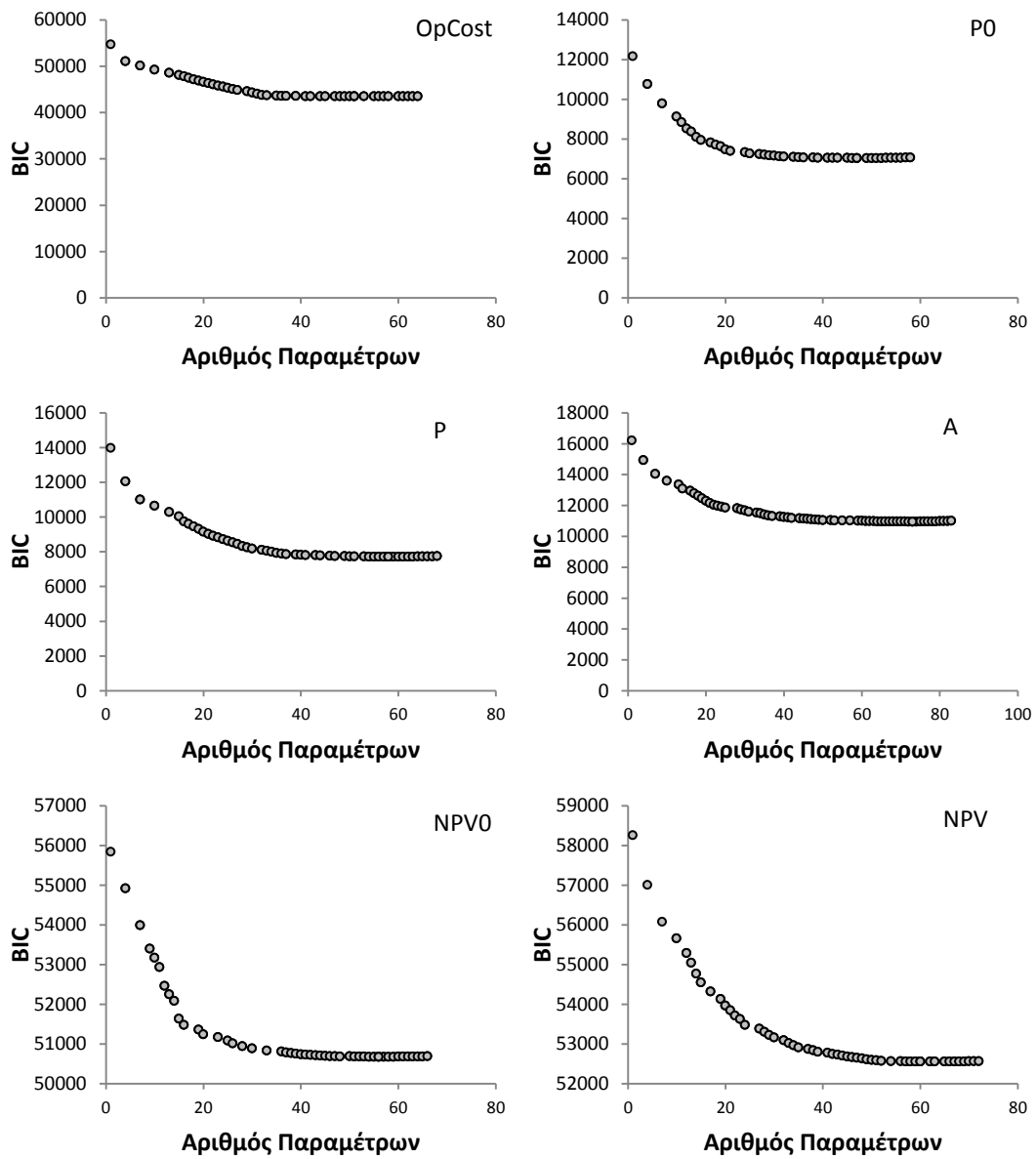
Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t-ratio	Prob> t
Power	3.1909	0.05	61.3200	<0.0001
CR	2.1612	0.04	48.5600	<0.0001
HPR	2.2461	0.05	42.2800	<0.0001
Power*CR	1.9713	0.07	29.8400	<0.0001
CHR	1.5429	0.05	29.7800	<0.0001
Power*HPR	2.3600	0.09	25.4700	<0.0001
Chrs	1.2587	0.05	23.9000	<0.0001
CHR*CR	1.4683	0.07	21.0800	<0.0001
CFc	1.0588	0.05	20.3600	<0.0001
Intercept	-2.6980	0.14	-19.1600	<0.0001
HPR*CR	1.2745	0.07	19.0800	<0.0001
Power*CHR	1.5919	0.09	17.1900	<0.0001
CFc*CR	1.1473	0.07	17.0400	<0.0001
Chrs*CR	1.1091	0.07	16.2400	<0.0001
ThvCo	-1.1499	0.07	-15.7500	<0.0001
CFh	0.7797	0.05	14.7900	<0.0001
HPR*CHR	1.2087	0.10	12.6300	<0.0001
Power*CFc	1.1586	0.09	12.4500	<0.0001
Power*Chrs	1.0505	0.09	11.1800	<0.0001
Chrs*CHR	1.0057	0.09	10.9100	<0.0001
Chrs*HPR	0.9968	0.10	10.2400	<0.0001
Power*CFh	0.9533	0.10	9.9400	<0.0001
Power*CFe	0.9430	0.10	9.7800	<0.0001
HPR*CFc	0.8728	0.09	9.3900	<0.0001
CHR*CFe	0.8842	0.10	9.0900	<0.0001
CFe	1.1851	0.13	9.0200	<0.0001
ThvCo*CFh	-1.1613	0.13	-9.0000	<0.0001
Thrs	1.2388	0.14	8.9600	<0.0001
Power*ThvCo	-1.0091	0.13	-7.9200	<0.0001
Chrs*CFc	0.7164	0.09	7.8300	<0.0001
ElvCo	0.5143	0.07	7.7300	<0.0001
CFe*CR	0.5436	0.07	7.6800	<0.0001
CHR*CFh	0.6537	0.09	7.1000	<0.0001
HPR*CFe	0.6833	0.10	6.9800	<0.0001
CFe*CFe	-0.6819	0.11	-6.4900	<0.0001
ThvCo*Chrs	0.8528	0.14	6.2500	<0.0001
Power*ElvCo	0.7112	0.12	6.1100	<0.0001
ThvCo*HPR	-0.7646	0.13	-5.9100	<0.0001
Thrs*Thrs	-0.6223	0.12	-5.3800	<0.0001
CFe*CFh	0.2451	0.10	2.4800	0.0133

Πίνακας Α'.5: Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής *NPV*

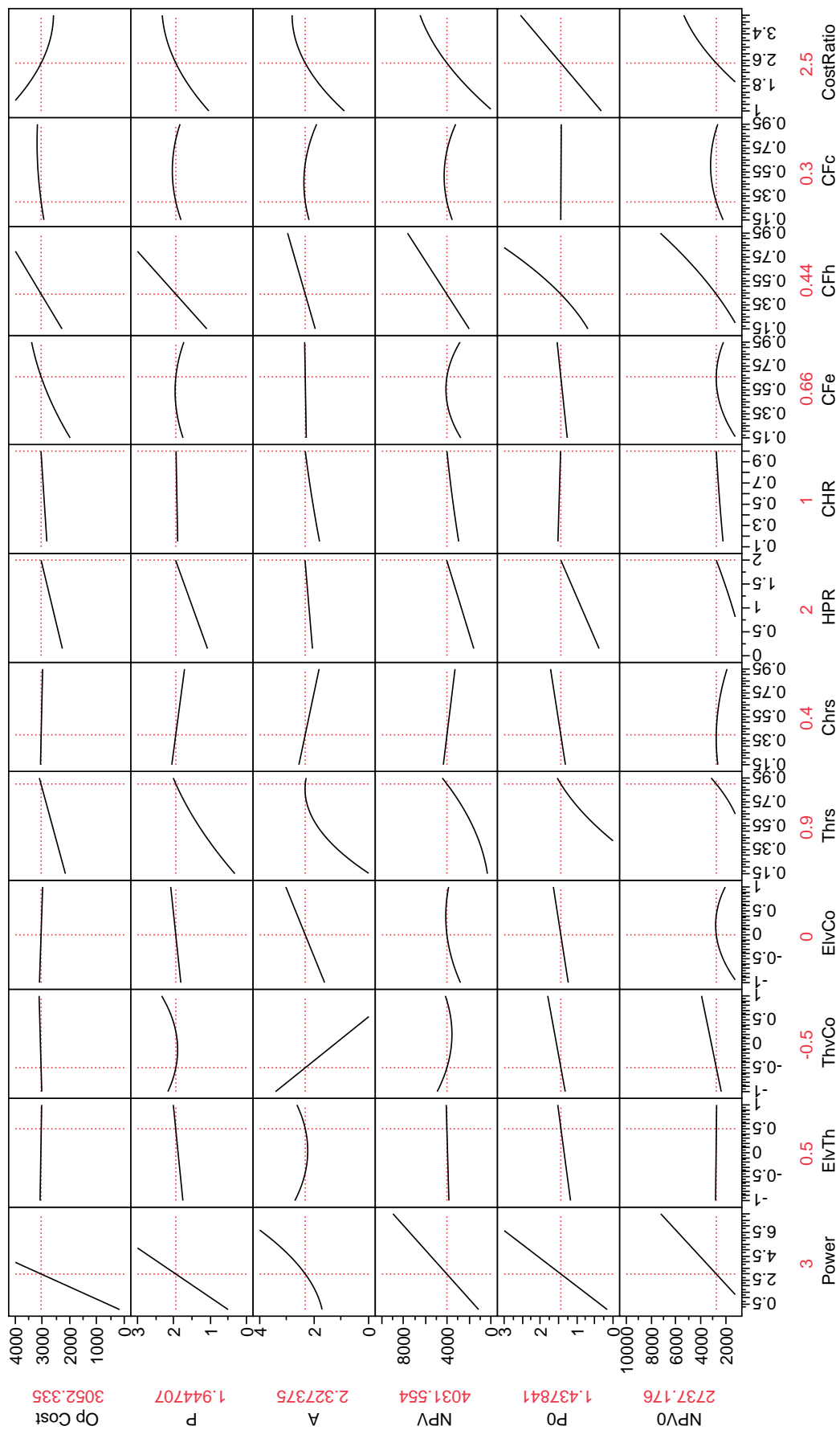
Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t-ratio	Prob> t
CR	4244.2524	60.11	70.6100	<0.0001
Intercept	-8244.8316	192.74	-42.7800	<0.0001
Thrs	3413.9201	83.62	40.8300	<0.0001
Power*CR	3855.8797	95.37	40.4300	<0.0001
Power	2984.8391	79.20	37.6900	<0.0001
HPR	2538.8104	81.27	31.2400	<0.0001
HPR*CR	2777.9343	100.25	27.7100	<0.0001
Power*HPR	3199.2614	124.98	25.6000	<0.0001
Chrs*CR	2253.4848	91.78	24.5500	<0.0001
Power*Thrs	3096.4131	145.17	21.3300	<0.0001
CHR	1423.5491	69.76	20.4100	<0.0001
CFh	1467.2557	79.62	18.4300	<0.0001
Power*CFh	2287.0401	129.14	17.7100	<0.0001
Chrs	1220.8372	71.14	17.1600	<0.0001
CFc*CR	1538.5777	91.45	16.8200	<0.0001
Thrs*CFh	2479.3771	153.91	16.1100	<0.0001
CHR*CR	1468.2998	93.59	15.6900	<0.0001
Thrs*HPR	2388.0329	155.88	15.3200	<0.0001
CFh*CR	1479.3488	100.71	14.6900	<0.0001
HPR*CFh	1692.0302	126.71	13.3500	<0.0001
CFe*CR	1241.5918	95.21	13.0400	<0.0001
HPR*CFe	1442.3600	132.35	10.9000	<0.0001
CHR*CFe	1341.3374	130.50	10.2800	<0.0001
CFe*CFe	-1387.3186	141.87	-9.7800	<0.0001
Power*Chrs	1220.4958	127.38	9.5800	<0.0001
ElvCo	840.1950	89.43	9.4000	<0.0001
Power*CHR	1137.2581	124.77	9.1100	<0.0001
Chrs*HPR	1136.1208	132.86	8.5500	<0.0001
ThvCo*CR	-931.4323	119.94	-7.7700	<0.0001
ThvCo	-704.9250	96.49	-7.3100	<0.0001
CFc*CFc	-938.4971	133.86	-7.0100	<0.0001
CHR*CFh	768.9615	124.21	6.1900	<0.0001
CFc	832.5195	173.25	4.8100	<0.0001
CFe	682.0413	176.77	3.8600	<0.0001
ThvCo*ElvCo	-411.3928	219.04	-1.8800	0.0605

Πίνακας Α'.6: Συντελεστές καμπύλης επιφάνειας απόκρισης της μεταβλητής *NPV0*

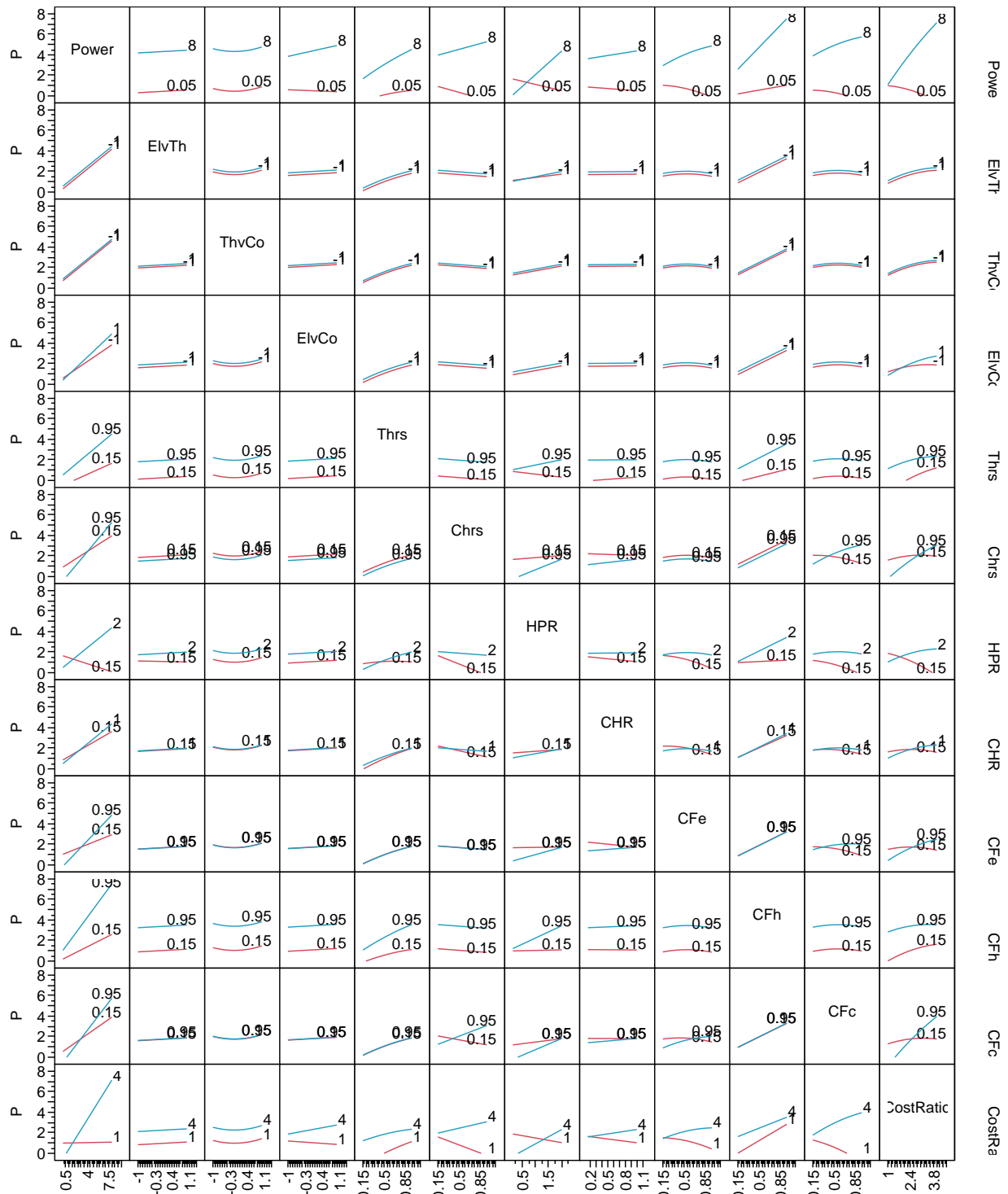
Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t-ratio	Prob> t
Thrs	3097.1233	74.75	41.4300	<0.0001
Power*Thrs	3491.1934	100.77	34.6500	<0.0001
Power*CR	2222.5936	66.44	33.4500	<0.0001
Thrs*CFh	3297.8038	107.87	30.5700	<0.0001
HPR*CR	1928.9938	69.94	27.5800	<0.0001
Thrs*HPR	2883.6129	108.06	26.6900	<0.0001
CFh*CR	1823.0708	71.48	25.5100	<0.0001
CR	1744.5144	73.69	23.6700	<0.0001
Power	1216.5147	55.19	22.0400	<0.0001
HPR	1190.8104	57.11	20.8500	<0.0001
Power*HPR	1828.7254	87.76	20.8400	<0.0001
Power*CFh	1789.0757	90.33	19.8000	<0.0001
HPR*CFh	1435.9343	89.19	16.1000	<0.0001
Intercept	-3359.2500	229.67	-14.6300	<0.0001
Thrs*Thrs	1380.0422	112.09	12.3100	<0.0001
HPR*CFe	954.1096	92.39	10.3300	<0.0001
Thrs*CR	885.2896	91.15	9.7100	<0.0001
CFe*CFe	-953.5074	100.01	-9.5300	<0.0001
CR*CR	-562.7895	59.45	-9.4700	<0.0001
CHR	384.4993	48.67	7.9000	<0.0001
CHR*CFe	618.8880	89.91	6.8800	<0.0001
Chrs*CFc	-548.0426	86.69	-6.3200	<0.0001
ElvCo*ElvCo	-934.6855	148.56	-6.2900	<0.0001
Chrs	-313.2300	50.52	-6.2000	<0.0001
CFc	-301.9420	49.19	-6.1400	<0.0001
ThvCo	349.6781	67.51	5.1800	<0.0001
CFh*CFh	478.5576	99.20	4.8200	<0.0001
CR*CR*CR	199.5861	43.96	4.5400	<0.0001
ElvTh	254.8226	58.54	4.3500	<0.0001
ElvTh*ThvCo	625.6203	156.23	4.0000	<0.0001
CFe*CFe*CFe	572.3637	191.75	2.9900	0.0029
CFh	33.4703	128.12	0.2600	0.7939
ElvCo	-24.2485	136.29	-0.1800	0.8588
CFe	-15.8916	124.02	-0.1300	0.8981



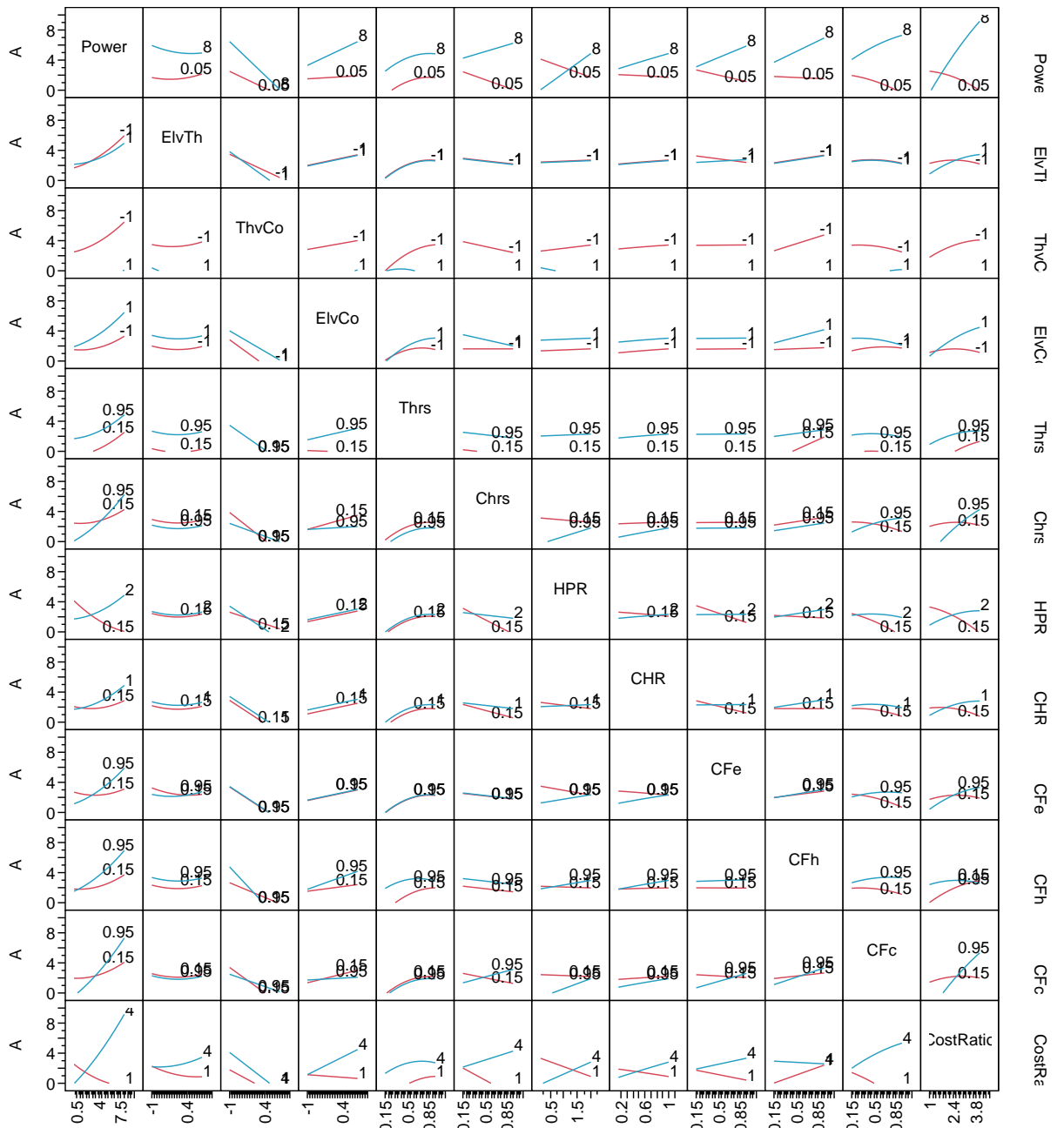
Σχήμα Α'.1: Κριτήριο επιλογής αριθμού παραμέτρων



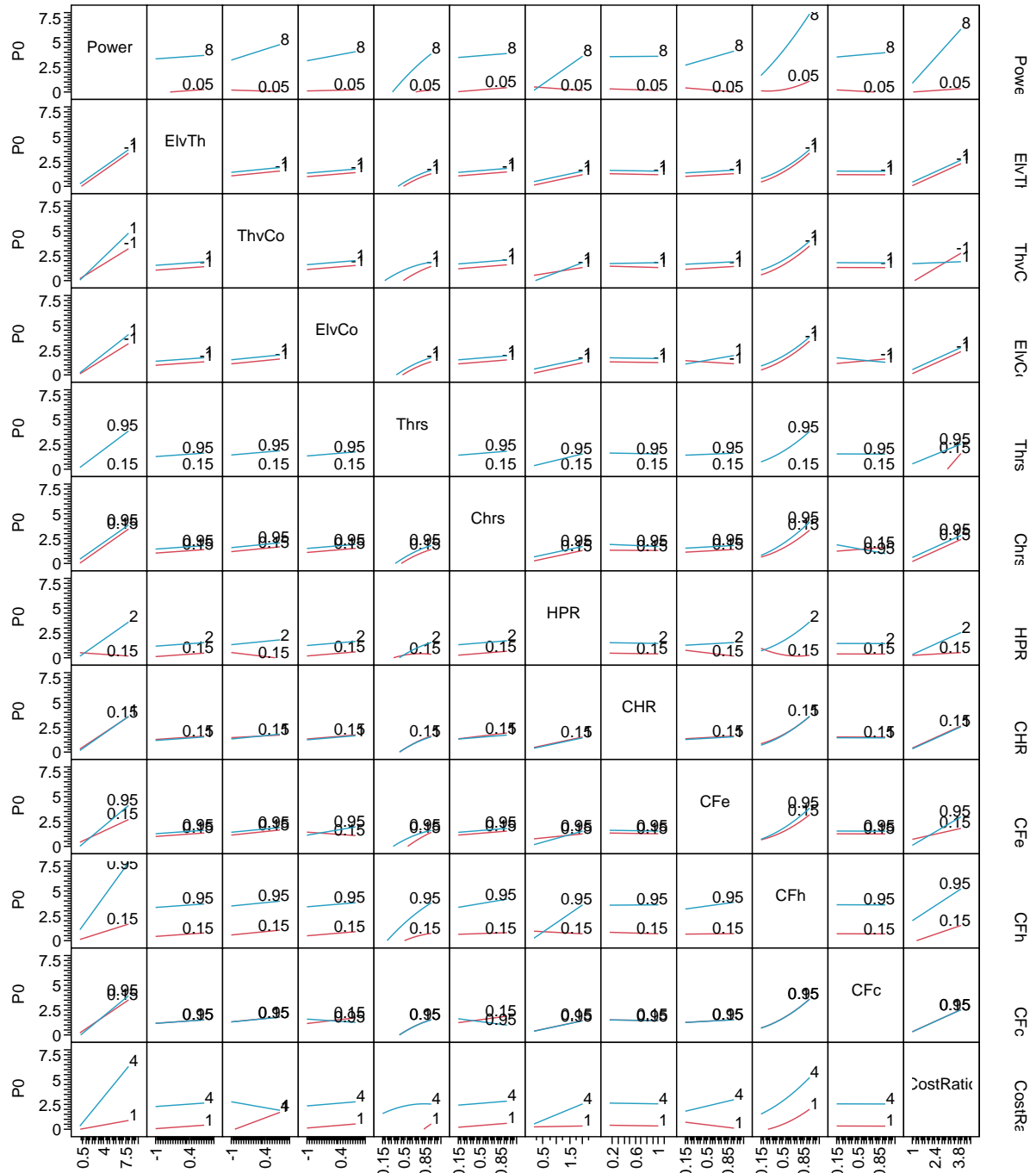
Σχήμα Α'.2: Προσαρμογή καμπύλης επιφάνειας απόκρισης



Σχήμα Α.3: Αλληλεπιδράσεις μεταβλητών στην απόκριση της P



Σχήμα Α.4: Αλληλεπιδράσεις μεταβλητών στην απόκριση της A



Σχήμα Α.5: Αλληλεπιδράσεις μεταβλητών στην απόκριση της P0

Ονοματολογία

<i>A</i>	Ονομαστική ισχύς ψύκτη απορρόφησης	<i>kW</i>
<i>AOC</i>	Ετήσιο λειτουργικό κόστος	€
<i>AOP</i>	Ετήσιο λειτουργικό όφελος	€
<i>B</i>	Ονομαστική ισχύς λέβητα	<i>kW</i>
<i>BL</i>	Στρατηγική λειτουργίας κάλυψης φορτίων βάσης	
<i>C</i>	Κόστος	€
<i>Co</i>	Ψυκτική ενέργεια	<i>kW</i>
<i>CO</i>	Στρατηγική συνεχούς λειτουργίας	
<i>COP</i>	Συντελεστής συμπεριφοράς	
<i>E</i>	Ονομαστική ισχύς ηλεκτρικού ψύκτη	<i>kW</i>
<i>EeF</i>	Στρατηγική κάλυψης ισοδύναμων ηλεκτρικών φορτίων	
<i>El</i>	Ηλεκτρισμός	<i>kW</i>
<i>ERR</i>	Σχετική μείωση εκπομπών	
<i>F</i>	Καύσιμό	<i>kW</i>
<i>HeF</i>	Στρατηγική κάλυψης ισοδύναμων θερμικών φορτίων	
<i>HPR</i>	Λόγος θερμότητας προς ηλεκτρισμό	
<i>HRF</i>	Συντελεστής ανάκτησης θερμότητας	
<i>LF</i>	Συντελεστής φορτίου	%
<i>mC_p</i>	Θερμοχωρητικότητα	<i>kW/K</i>
<i>NPV</i>	Καθαρά παρούσα αξία	€
<i>OE</i>	Συνολική απόδοση	%
<i>P</i>	Ονομαστική ισχύς κινητήρα	<i>kW</i>
<i>PESR</i>	Λόγος εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας	
<i>PS</i>	Στρατηγική κάλυψης αιχμών	
<i>ROI</i>	Επιστροφή της επένδυσης	%
<i>S_s</i>	Διακριτή μεταβλητή απόφασης για στρατ. λειτουργίας (καλοκαίρι)	
<i>S_w</i>	Διακριτή μεταβλητή απόφασης για στρατ. λειτουργίας (χειμώνας)	
<i>T</i>	Θερμοκρασία	
<i>T_a</i>	Διακριτή μεταβλητή απόφασης για την επιλογή τιμολογίου	
<i>Th</i>	Θερμότητα	<i>kW</i>
<i>UF</i>	Συντελεστής χρησιμοποίησης	%
<i>η</i>	Απόδοση	%

Εκθέτες

<i>AC</i>	Παράγεται ή καταναλώνεται απο ψύκτη απορρόφησης
<i>Boiler</i>	Παράγεται απο λέβητα
<i>Buffer</i>	Δοχείο αδρανείας
<i>CHP</i>	Παράγεται ή καταναλώνεται απο συμπαραγωγή
<i>EC</i>	Παράγεται ή καταναλώνεται από ηλεκτρικό ψύκτη
<i>EndUse</i>	Καταναλώνεται σε τελική χρήση
<i>GridIn</i>	Εισάγεται απο το δίκτυο
<i>GridOut</i>	Εξάγεται στο δίκτυο
<i>n</i>	Συντελεστής κλίμακας
<i>SP</i>	Παράγεται απο ξεχωριστή παραγωγή
<i>Waste</i>	Απόρριψη

Δείκτες

<i>chp</i>	Συμπαραγωγή
<i>el</i>	ηλεκτρική (απόδοση)
<i>k</i>	μήνες
<i>set</i>	τιμή-στόχος
<i>t</i>	ώρες
<i>th</i>	θερμική (απόδοση)

Βιβλιογραφία

- [1] International Energy Agency, Technology Roadmap: Energy-efficient Buildings - Heating and Cooling Equipment, Paris, France, 2011.
- [2] International Energy Agency, World Energy Outlook 2011 - Are we entering a golden age of gas?, Paris, France, 2011.
- [3] H. Ren, W. Gao, Y. Ruan, Optimal sizing for residential chp system, Applied Thermal Engineering 28 (5-6) (2008) 514-523. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.05.001.
URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431107001810>
- [4] E. Cardona, A. Piacentino, A methodology for sizing a trigeneration plant in mediterranean areas, Applied Thermal Engineering 23 (13) (2003) 1665-1680. doi:10.1016/S1359-4311(03)00130-3.
URL [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00130-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00130-3)
- [5] International Energy Agency, Energy Policies of IEA Countries : Greece, Paris, France, 2011.
- [6] G. Chicco, P. Mancarella, Distributed multi-generation: A comprehensive view, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (3) (2009) 535-551. doi:10.1016/j.rser.2007.11.014.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.014>
- [7] D. Wu, R. Wang, Combined cooling, heating and power: A review, Progress in Energy and Combustion Science 32 (5-6) (2006) 459-495. doi:10.1016/j.pecs.2006.02.001.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2006.02.001>
- [8] J. Hernández-Santoyo, A. Sánchez-Cifuentes, Trigeneration: an alternative for energy savings, Applied Energy 76 (1-3) (2003) 219-227. doi:10.1016/S0306-2619(03)00061-8.
URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00061-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00061-8)
- [9] K. Brown, S. Minett, History of chp developments and current trends, Applied Energy 53 (1-2) (1996) 11-22. doi:10.1016/0306-2619(95)00051-8.
URL [http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619\(95\)00051-8](http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619(95)00051-8)
- [10] S. Sanaye, M. Meybodi, S. Shokrollahi, Selecting the prime movers and nominal powers in combined heat and power systems, Applied Thermal Engineering 28 (10) (2008) 1177-1188. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.08.003.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.08.003>

- [11] M. Badami, M. Mura, P. Campanile, F. Anzioso, Design and performance evaluation of an innovative small scale combined cycle cogeneration system, *Energy* 33 (8) (2008) 1264–1276. doi:10.1016/j.energy.2008.03.001.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2008.03.001>
- [12] I. Zabalza, A. Aranda, M. D. de Gracia, Feasibility analysis of fuel cells for combined heat and power systems in the tertiary sector, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (10-11) (2007) 1396–1403. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.10.019.
URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319906004964>
- [13] EU, Directive 2004/8/ec of the european parliament and of the council, *Official Journal of the European Union* L 52 (2004) 50 – 60.
URL <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32004L0008:EN:NOT>
- [14] COGEN Europe - ΕΣΣΗΘ, ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ 2050 : Ο ρόλος της συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας σε ένα ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα "χωρίς άνθρακα", 2011.
- [15] N. Moreira, E. Monteiro, S. Ferreira, Transposition of the eu cogeneration directive: A vision for portugal, *Energy Policy* 35 (11) (2007) 5747–5753. doi:10.1016/j.enpol.2007.06.015.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.015>
- [16] International Energy Agency, *Combined Heat and Power*, Paris, France, 2008.
- [17] ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ, Τεχνική οδηγία - Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας & Ψύξης: Εγκαταστάσεις σε κτήρια, 2010.
- [18] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, *Μητρώο ενεργειακών επενδύσεων* (2012).
URL <http://www.rae.gr>
- [19] L. Giaccone, A. Canova, Economical comparison of chp systems for industrial user with large steam demand, *Applied Energy* 86 (6) (2009) 904–914. doi:10.1016/j.apenergy.2008.10.025.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.10.025>
- [20] American Society of Heating Refrigerating and Air, *ASHRAE HANDBOOK, "Fundamentals"*, 2001.
- [21] W. Kostowski, J. Skorek, Thermodynamic and economic analysis of heat storage application in cogeneration systems, *International Journal of Energy Research* 29 (2) (2005) 177–188. doi:10.1002/er.1052.
URL doi.wiley.com/10.1002/er.1052
- [22] I. Staffell, R. Green, K. Kendall, Cost targets for domestic fuel cell chp, *Journal of Power Sources* 181 (2) (2007) 339–349. doi:10.1016/j.jpowsour.2007.11.068.
URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775307025608>
- [23] S. Firth, K. Lomas, A. Wright, R. Wall, Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements, *Energy and Buildings* 40 (5) (2008) 926–936.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-4P9SNDX-1/2/13be44dff51bcb2f44b5df1c8b10d647>

- [24] A. Wright, S. Firth, The nature of domestic electricity-loads and effects of time averaging on statistics and on-site generation calculations, *Applied Energy* 84 (4) (2007) 389–403.
URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261906001097>
- [25] R. Yao, K. Steemers, A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the uk, *Energy and Buildings* 37 (6) (2005) 663–671.
URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877880400307X>
- [26] A. Poulin, M. Dostie, M. Fournier, S. Sansregret, Load duration curve: A tool for technico-economic analysis of energy solutions, *Energy and Buildings* 40 (1) (2008) 29–35.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.020>
- [27] B. Mohanty, H. Panda, Integrated energy system for industrial complexes. part i: A linear programming approach., *Applied Energy*.
URL <http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=0077504EN>
- [28] C. W. Gellings, K. E. Parmenter, Demand-side management, in: *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Taylor & Francis, 2007.
- [29] M. Taal, I. Bulatov, J. K. s, P. Stehlik, Cost estimation and energy price forecasts for economic evaluation of retrofit projects, *Applied Thermal Engineering* 23 (14) (2003) 1819–1835. doi:10.1016/S1359-4311(03)00136-4.
URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431103001364>
- [30] European Union, Europe’s energy portal (2011).
URL <http://www.energy.eu>
- [31] International Energy Agency, *Energy Prices and Taxes*, 2012.
- [32] Δημόσια Επιχείρηση Παροχής Αερίου (2011).
URL <http://www.depa.gr>
- [33] Y. Huangfu, J. Wu, R. Wang, X. Kong, B. Wei, Evaluation and analysis of novel micro-scale combined cooling, heating and power (mcchp) system, *Energy Conversion and Management* 48 (5) (2007) 1703–1709. doi:10.1016/j.enconman.2006.11.008.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.11.008>
- [34] G. Chicco, P. Mancarella, From cogeneration to trigeneration: profitable alternatives in a competitive market, *Energy Conversion, IEEE Transaction on* 21 (1) (2006) 265 – 272. doi:10.1109/TEC.2005.858089.
URL <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2005.858089>
- [35] G. Chicco, P. Mancarella, Planning aspects and performance indicators for small-scale trigeneration plants, *International Conference on Future Power Systems* (2005) 1 – 6.
URL http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1600476
- [36] K. Kavvadias, A. Tosios, Z. Maroulis, Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis, *Energy Conversion and Management* 51 (4) (2010) 831–843. doi:10.1016/j.enconman.2009.11.019.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.019>

- [37] E. Cardona, A. Piacentino, F. Cardona, Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid chcp-heat pump systems, *Energy Conversion and Management* 47 (20) (2006) 3530–3542. doi:10.1016/j.enconman.2006.02.027.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.027>
- [38] P. Arcuri, G. Florio, P. Fragiaco, A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex, *Energy* 32 (8) (2007) 1430–1447. doi:10.1016/j.energy.2006.10.023.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.023>
- [39] G. Chicco, P. Mancarella, Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. part i: Models and indicators, *Energy* 33 (3) (2007) 410–417. doi:10.1016/j.energy.2007.10.006.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.006>
- [40] G. Chicco, P. Mancarella, Trigeneration primary energy saving evaluation for energy planning and policy development, *Energy Policy* 35 (12) (2007) 6132–6144. doi:10.1016/j.enpol.2007.07.016.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.07.016>
- [41] D. Kim, A new thermoeconomic methodology for energy systems, *Energy* 35 (1) (2010) 410–422. doi:10.1016/j.energy.2009.10.008.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.008>
- [42] A. Moran, P. J. Magoy, L. M. Chamra, Thermoeconomic modeling of micro-chp (micro-cooling, heating, and power) for small commercial applications, *International Journal of Energy Research* 32 (9) (2008) 808–823. doi:10.1002/er.1395.
URL <http://www3.interscience.wiley.com/journal/117891044/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>
- [43] P. Katsigiannis, D. Papadopoulos, A general technoeconomic and environmental procedure for assessment of small-scale cogeneration scheme installations: Application to a local industry operating in thrace, greece, using microturbines, *Energy Conversion and Management* 46 (20) (2005) 3150–3174. doi:10.1016/j.enconman.2005.03.005.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.03.005>
- [44] G. Temir, D. Bilge, Thermoeconomic analysis of a trigeneration system, *Applied Thermal Engineering* 24 (17–18) (2004) 2689–2699. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.03.014.
URL <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.03.014>
- [45] A. Abusoglu, M. Kanoglu, Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (9) (2009) 2295–2308. doi:10.1016/j.rser.2009.05.004.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.004>
- [46] O. Balli, H. Aras, A. Hepbasli, Exergoeconomic analysis of a combined heat and power (chp) system, *International Journal of Energy Research* 32 (4) (2008) 273–289. doi:10.1002/er.1353.
URL <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/114292054/PDFSTART>

- [47] L. Lin, Y. Wang, T. Al-Shemmeri, T. Ruxton, S. Turner, An experimental investigation of a household size trigeneration, *Applied Thermal Engineering* 27 (2-3) (2007) 576–585. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.05.031.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.05.031>
- [48] P. Pilavachi, C. Roumpeas, S. Minett, N. Afgan, Multi-criteria evaluation for chp system options, *Energy Conversion and Management* 47 (20) (2006) 3519–3529. doi:10.1016/j.enconman.2006.03.004.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.03.004>
- [49] P. Mancarella, G. Chicco, Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. part ii: Analysis techniques and application cases, *Energy* 33 (3) (2008) 418–430. doi:10.1016/j.energy.2007.10.008.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.008>
- [50] M. Bhatt, Mapping of general combined heat and power systems, *Energy Conversion and Management* 42 (1) (2001) 115–124. doi:10.1016/S0196-8904(00)00045-5.
URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00045-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00045-5)
- [51] G. Mavrotas, K. Florios, D. Vlachou, Energy planning of a hospital using mathematical programming and monte carlo simulation for dealing with uncertainty in the economic parameters, *Energy Conversion and Management* 51 (4) (2010) 722–731. doi:10.1016/j.enconman.2009.10.029.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.10.029>
- [52] R. Hashemi, A developed offline model for optimal operation of combined heating and cooling and power systems, *Energy Conversion, IEEE Transaction on* 24 (1) (2009) 222–229. doi:10.1109/TEC.2008.2002330.
URL <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2008.2002330>
- [53] H. Cho, R. Luck, S. Eksioğlu, L. Chamra, Cost-optimized real-time operation of chp systems, *Energy and Buildings* 41 (4) (2009) 445–451. doi:10.1016/j.enbuild.2008.11.011.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.011>
- [54] T.-M. Tveit, T. Savola, A. Gebremedhin, C.-J. Fogelholm, Multi-period minlp model for optimising operation and structural changes to chp plants in district heating networks with long-term thermal storage, *Energy Conversion and Management* 50 (3) (2009) 639–647. doi:10.1016/j.enconman.2008.10.010.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2P-4V5NSS1-1/2/93a1e3786cf4ccf62241a772c08f4a7c>
- [55] A. Piacentino, F. Cardona, Eabot - energetic analysis as a basis for robust optimization of trigeneration systems by linear programming, *Energy Conversion and Management* 49 (11) (2008) 3006–3016. doi:10.1016/j.enconman.2008.06.015.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.015>
- [56] A. Canova, C. Cavallero, F. Freschi, L. Giaccione, Comparative economical analysis of a small scale trigenerative plant: A case study, *Industry Applications Conference* (2007) 1456–1459. doi:10.1109/IAS.2007.224.
URL http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4347973

- [57] M. Lozano, M. Carvalho, L. Serra, Operational strategy and marginal costs in simple trigeneration systems, *Energy* 34 (11) (2009) 2001–2008. doi:10.1016/j.energy.2009.08.015.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.08.015>
- [58] A. Piacentino, F. Cardona, An original multi-objective criterion for the design of small-scale polygeneration systems based on realistic operating conditions, *Applied Thermal Engineering* 28 (17–18) (2008) 2391–2404. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.01.017.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.01.017>
- [59] A. Rong, R. Lahdelma, An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration, *Applied Energy* 82 (1) (2005) 40–63. doi:10.1016/j.apenergy.2004.07.013.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.07.013>
- [60] P. Liu, D. Gerogiorgis, E. Pistikopoulos, Modeling and optimization of polygeneration energy systems, *Catalysis Today* 127 (1–4) (2007) 347–359. doi:10.1016/j.cattod.2007.05.024.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2007.05.024>
- [61] D. Connolly, H. Lund, B. Mathiesen, M. Leahy, A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems, *Applied Energy* 87 (4) (2010) 1059–1082. doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.026.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>
- [62] Oak Ridge National Laboratory, Whole—building and community integration program.
URL <http://www.coolingheatingpower.org/about/bchp-screening-tool.php>
- [63] Natural Resources Canada, Retscreen 4.
URL <http://www.retscreen.net/>
- [64] P. L. T. Lambert, P. Gilman, Micropower system modeling with homer, in: *Integration of alternative sources of energy*, 0471712329, John Wiley & Sons, 2005.
URL <http://www.nrel.gov/homer/>
- [65] Oak Ridge National Laboratory, Ornl chp capacity optimizer user’s manual.
- [66] EMD International A/S, energypro.
URL <http://www.emd.dk>
- [67] H. Cho, R. Luck, S. Eksioğlu, L. Chamra, Cost-optimized real-time operation of chp systems, *Energy and Buildings* 41 (4) (2009) 445–451.
- [68] M. Biezma, J. Cristóbal, Investment criteria for the selection of cogeneration plants—a state of the art review, *Applied Thermal Engineering* 26 (5–6) (2006) 583–588. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.07.006.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.07.006>
- [69] Z. Maroulis, G. Saravacos, *Food Plant Economics*, 2007.
URL <http://books.google.com/books?id=e19uGgAACAAJ>
- [70] F. Kreith, D. Y. Goswami, *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, 2007.

- [71] EDUCOGEN, The European Educational Tool on Cogeneration, 2001.
URL www.cogen.org/projects/educogen.htm
- [72] Greek Ministry of Development, Greek energy investment guide.
URL <http://www.ypan.gr>
- [73] K. Deb, Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization, John Wiley & Sons, Chichester, 2001.
- [74] K. Kavvadias, Z. Maroulis, Multi-objective optimization of a trigeneration plant, *Energy Policy* 38 (2) (2010) 945–954. doi:10.1016/j.enpol.2009.10.046.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.046>
- [75] D. Manolas, T. Gialamas, C. Frangopoulos, D. Tsalhalis, A genetic algorithm for operation optimization of an industrial cogeneration system, *Computers & Chemical Engineering* 20 (Supplement 2) (1996) S1107–S1112. doi:10.1016/0098-1354(96)00192-5.
URL [http://dx.doi.org/10.1016/0098-1354\(96\)00192-5](http://dx.doi.org/10.1016/0098-1354(96)00192-5)
- [76] P. Shukla, K. Deb, On finding multiple pareto-optimal solutions using classical and evolutionary generating methods, *European Journal of Operational Research* 181 (2007) 1630–1652.
- [77] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2) (2002) 182–197. doi:10.1109/4235.996017.
URL <http://dx.doi.org/10.1109/4235.996017>
- [78] F. Al-Mansour, M. Kozuh, Risk analysis for chp decision making within the conditions of an open electricity market, *Energy* 32 (10) (2007) 1905–1916. doi:10.1016/j.energy.2007.03.009.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.03.009>
- [79] M. Houwing, A. Ajah, P. Heijnen, I. Bouwmans, P. Herder, Uncertainties in the design and operation of distributed energy resources: The case of micro-chp systems, *Energy* 33 (10) (2008) 1518–1536. doi:10.1016/j.energy.2008.07.003.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.003>
- [80] A. Zafra-Cabeza, M. Ridao, I. Alvarado, E. Camacho, Applying risk management to combined heat and power plants, *Power Systems, IEEE Transactions on* 23 (3) (2008) 938–945. doi:10.1109/TPWRS.2008.922255.
URL <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2008.922255>
- [81] V. Uran, S. Krajcar, Feed-in tariff and market electricity price comparison: The case of cogeneration units in croatia, *Energy Policy* 37 (3) (2009) 844–849. doi:10.1016/j.enpol.2008.10.035.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.035>
- [82] H. Lund, A. Andersen, Optimal designs of small chp plants in a market with fluctuating electricity prices, *Energy Conversion and Management* 46 (6) (2005) 893–904. doi:10.1016/j.enconman.2004.06.007.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.007>
- [83] D. Feretic, Z. Tomsic, Probabilistic analysis of electrical energy costs comparing: production costs for gas, coal and nuclear power plants, *Energy Policy* 33 (1) (2005) 5–13.

- [84] G. Locatelli, M. Mancini, Small-medium sized nuclear coal and gas power plant: A probabilistic analysis of their financial performances and influence of co2 cost, *Energy Policy* 38 (2010) 6360–6374.
- [85] S. Kelly, M. Pollitt, An assessment of the present and future opportunities for combined heat and power with district heating (chp-dh) in the united kingdom, *Energy Policy* 38 (1) 6936–6945.
- [86] P. Vithayasrichareon, I. MacGill, A monte carlo based decision-support tool for assessing generation portfolios in future carbon constrained electricity industries, *Energy Policy* 41 (2012) 374–392.
- [87] H. Markowitz, Portfolio selection, *The Journal of Finance* 7 (1952) 77–91.
- [88] G. Westner, R. Madlener, Investment in new power generation under uncertainty: Benefits of chp vs. condensing plants in a copula-based analysis, *Energy Economics* 34 (1) (2011) 31–44. doi:10.1016/j.eneco.2011.02.014.
- [89] F. Olsina, M. Röscher, C. Larisson, F. Garcés, Short-term optimal wind power generation capacity in liberalized electricity markets, *Energy Policy* 35 (2) (2007) 1257–1273. doi:10.1016/j.enpol.2006.03.018.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.018>
- [90] A. M. Breipohl, F. N. Lee, D. Zhai, R. Adapa, A gauss-markov load model for application in risk evaluation and production simulation, *Power Systems, IEEE Transactions on* 7 (4) (1992) 1493–1499. doi:10.1109/59.207373.
URL <http://dx.doi.org/10.1109/59.207373>
- [91] S. Tassou, I. Chaer, N. Sugiartha, Y. Ge, D. Marriott, Application of tri-generation systems to the food retail industry, *Energy Conversion and Management* 48 (11) (2007) 2988–2995. doi:10.1016/j.enconman.2007.06.049.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.049>
- [92] J. Bassols, B. Kuckelkorn, J. Langreck, R. Schneider, Trigeneration in the food industry, *Applied Thermal Engineering* 22 (6) (2002) 595–602. doi:10.1016/S1359-4311(01)00111-9.
URL [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00111-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00111-9)
- [93] D. Zihir, A. Poredos, Economics of a trigeneration system in a hospital, *Applied Thermal Engineering* 26 (7) (2006) 680–687. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.09.007.
URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431105002966>
- [94] E. Cardona, A. Piacentino, Optimal design of chcp plants in the civil sector by thermoeconomics, *Applied Energy* 84 (7-8) (2007) 729–748. doi:10.1016/j.apenergy.2007.01.005.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.01.005>
- [95] E. Cardona, A. Piacentino, F. Cardona, Energy saving in airports by trigeneration. part i: Assessing economic and technical potential, *Applied Thermal Engineering* 26 (14-15) (2006) 1427–1436. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.01.019.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.01.019>
- [96] G. Mavrotas, D. Diakoulaki, K. Florios, P. Georgiou, A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in athens,

- Energy Policy 36 (7) (2008) 2415-2429. doi:10.1016/j.enpol.2008.01.011.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.01.011>
- [97] ENERGY STAR, Performance ratings technical methodology for hospital (general medical and surgical).
URL https://www.energystar.gov/index.cfm?c=evaluate_performance.bus_portfoliomanager_model_tech_desc
- [98] M. Krokida, C. Kiranoudis, Pareto design of fluidized bed dryers, Chemical Engineering Journal 79 (2000) 1-12.
URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894700001406>
- [99] A. Pardo, V. Meneu, E. Valor, Temperature and seasonality influences on spanish electricity load, Energy Economics 24 (1) (2002) 55 - 70. doi:10.1016/S0140-9883(01)00082-2.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988301000822>
- [100] S. Pappas, L. Ekonomou, D. Karamousantas, G. Chatzarakis, S. Katsikas, P. Liatsis, Electricity demand loads modeling using autoregressive moving average (arma) models, Energy 33 (9) (2008) 1353-1360. doi:10.1016/j.energy.2008.05.008.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2008.05.008>
- [101] H. Hahn, S. Meyer-Nieberg, S. Pickl, Electric load forecasting methods: Tools for decision making, European Journal of Operational Research 199 (3) (2009) 902-907. doi:10.1016/j.ejor.2009.01.062.
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.062>
- [102] K. Schenk, S. Chan, N. Rau, Incorporation of method of moments in wasp-ii case study, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 3 (3) (1981) 159 - 166. doi:10.1016/0142-0615(81)90022-3.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0142061581900223>
- [103] J. Monette, A mathematical model of an electrical utility's load-duration curve, Omega 10 (1) (1981) 94-96.
- [104] T. Yalcinoz, U. Eminoglu, Short term and medium term power distribution load forecasting by neural networks, Energy Conversion and Management 46 (9-10) (2005) 1393 - 1405. doi:10.1016/j.enconman.2004.07.005.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040400192X>
- [105] A. Sulaiman, M. Al-Hafid, A. Al-Fahadi, Developing annual load duration curve using an intelligent technique, in: Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, IEEE, 2004, pp. 549-552.
- [106] P. Jackel, Monte Carlo Methods in Finance, Wiley, 2002.
URL <http://amzn.com/047149741X>
- [107] P. E. Gill, W. Murray, M. H. Wright, Practical Optimization, Elsevier, 2004.
- [108] M. Gilli, D. Maringer, E. Schumann, Numerical Methods and Optimization in Finance, Elsevier, 2011.
- [109] P. Embrechts, F. Lindskog, A. J. McNeil, Modelling dependence with copulas and applications to risk management, in: Handbook of Heavy Tailed Distributions, Elsevier, 2001.

-
- [110] M. McKay, W. J. Conover, R. J. Beckman, A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics* 21 (2) (1979) 239 - 245.
- [111] R. Graves, B. Hodge, L. Chamra, The spark spread as a measure of economic viability for a combined heating and power application with ideal loading conditions, in: *Proceedings of ES2008 energy sustainability*, 2008.
- [112] A. Smith, N. Fumo, P. Mago, Spark spread-a screening parameter for combined heating and power systems, *Applied Energy* 88 (2011) 1494-1499.
- [113] A. Smith, P. Mago, N. Fumo, Emissions spark spread and primary energy spark spread-environmental and energy screening parameters for combined heating and power systems, *Applied Energy* 88 (2011) 3891-3897.