



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ, ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

**Μοντελοποίηση και Επίλυση Σύνθετων Προβλημάτων
Διαχείρισης και Εξοικονόμησης Ενέργειας με Χρήση
Τεχνικών Βελτιστοποίησης και Θεωρίας Παιγνίων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Δ. Κοντογιώργος

Αθήνα, Ιούνιος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ, ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Μοντελοποίηση και Επίλυση Σύνθετων Προβλημάτων Διαχείρισης και Εξοικονόμησης Ενέργειας με Χρήση Τεχνικών Βελτιστοποίησης και Θεωρίας Παιγνίων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Δ. Κοντογιώργος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Γεώργιος Π. Παπαβασιλόπουλος
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Ιωάννης Ψαρράς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Ιουνίου 2019.

.....
Γεώργιος Π. Παπαβασιλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρυσόστομος Δούκας
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
George Halikias
Professor City, UoL

.....
Βασίλειος Ασημακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Ταραντίλης
Καθηγητής Ο.Π.Α.

Αθήνα, Ιούνιος 2019

.....
Παναγιώτης Δ. Κοντογιώργος

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Δ. Κοντογιώργος, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα Διατριβή επικεντρώνεται στη μελέτη προβλημάτων διαχείρισης και εξοικονόμησης ενέργειας, τα οποία πηγάζουν από τις σύγχρονες απαιτήσεις που διέπουν τις αγορές ενέργειας καθώς και την προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας που γίνεται σε διεθνές επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, επιχειρείται η μοντελοποίηση και επίλυση σύνθετων προβλημάτων με σκοπό την υποστήριξη και βελτιστοποίηση αποφάσεων, οι οποίες σχετίζονται με το σχεδιασμό και τις ενεργειακές επενδύσεις τόσο σε επίπεδο αρμόδιων αρχών, όσο και σε επίπεδο μικρών τελικών χρηστών. Ταυτόχρονα, προσεγγίζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών καθώς και άλλων συμμετεχόντων στις σύγχρονες απελευθερωμένες αγορές ενέργειας που σκοπό έχουν τη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες και τα προβλήματα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, διακρίνοντας την προτεινόμενη προσέγγιση από παρόμοιες επιμέρους προσπάθειες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Για κάθε πρόβλημα, επεξηγείται η σημασία και η πολυπλοκότητά του και παρατίθεται η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πολυκριτηριακή αξιολόγηση ενεργειακών επενδύσεων και ενεργειακού σχεδιασμού με χρήση ακέραιου προγραμματισμού. Η απελευθέρωση των αγορών ενέργειας έχει οδηγήσει σε ένα συνεχώς εξελισσόμενο πλαίσιο, το οποίο θέτει αυξημένες τεχνοοικονομικές απαιτήσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, διατυπώνεται το πρόβλημα της κατάλληλης επιλογής πηγών ενέργειας βάσει αρκετών κριτηρίων εκτός από το οικονομικό κόστος και την προσφερόμενη ποσότητα. Το πρόβλημα μελετάται και επιλύεται χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού προκειμένου να προκύψει ένα εργαλείο υποστήριξης τέτοιου είδους πολυκριτηριακών αποφάσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο ενσωματώνεται ο παράγοντας της αβεβαιότητας στη λήψη αποφάσεων. Το πρόβλημα που μελετάται με τη βοήθεια και μιας μελέτης περίπτωσης είναι η αξιολόγηση παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια του οικιακού τομέα, τα οποία αποτελούν και τη μεγαλύτερη κατηγορία κτιρίων. Το μοντέλο πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων που είχε αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο επεκτείνεται ώστε να λαμβάνονται υπόψη και τυχόν συνέργειες μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών. Η αβεβαιότητα προσεγγίζεται με τη χρήση της διαστηματικής ανάλυσης, η οποία είναι κατάλληλη για προβλήματα μηχανικής, καθώς παρέχει πολλές χρήσιμες πληροφορίες σε αυτόν που καλείται να αποφασίσει χωρίς να απαιτούνται πληροφορίες συναρτήσεων κατανομής της αβεβαιότητας για την χρησιμοποίησή της.

Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται μια υποκατηγορία προβλημάτων διαχείρισης ζήτησης, τα επιδοτούμενα προγράμματα οικειοθελούς περικοπής φορτίου. Κατά την εφαρμογή τέτοιου είδους προγραμμάτων οι καταναλωτές επιδοτούνται προκειμένου να περιορίσουν βραχυπρόθεσμα την ενεργειακή τους ζήτηση. Η μοντελοποίηση αυτών των προγραμμάτων είναι περίπλοκη και παραπέμπει στην εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων. Για την επίλυση του προβλήματος που διατυπώνεται στην αρχή αυτού του κεφαλαίου αναπτύσσεται ένας μεταερευνητικός αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται στη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων. Ο αλγόριθμος αυτός αξιολογείται στη συνέχεια μέσω της επίλυσης διαφόρων παραδειγμάτων. Στο τελευταίο κεφάλαιο της Διατριβής ακολουθούν συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά:

αγορές ενέργειας, ενεργειακή πολιτική, εξοικονόμηση ενέργειας, διαχείριση ενέργειας, απόκριση ζήτησης, πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, διαστηματική ανάλυση, μεικτός αέριος προγραμματισμός, διεπίπεδος προγραμματισμός, βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, παίγνιο Stackelberg, παίγνιο Nash

Abstract

The scope of this Thesis is the study of energy management and energy efficiency problems stemming from the current requirements governing energy markets as well as the international policies promoting energy savings and optimized energy usage. More specifically, some complex problems are modelled and solved in order to develop decision support tools that will enable optimized decision-making regarding energy planning and energy investments, both at the level of competent authorities and at the level of small end-users. At the same time, the interactions among stakeholders in liberalized energy markets are being studied, aiming at optimal energy management.

The first chapter serves as an introduction to the concepts and problems that will be studied, also presenting other relevant studies that exist in bibliography and the main contributions of this Thesis. More specifically, the significance and complexity of each problem are explained as well as the methodologies that will be used.

The second chapter is devoted to a multi-criteria evaluation of energy investments and energy planning using integer programming. The liberalization of energy markets has led to a continuously evolving framework, which raises stricter techno-economic requirements. In this context, the problem of optimally selecting energy resources is formulated based on several evaluation criteria other than the financial cost and the quantity offered. The formulated problem is solved using a combination of mathematical programming techniques and a tool for supporting such multi-criteria decisions is developed.

The third chapter addresses the uncertainty in decision making. The problem being studied is the evaluation of energy saving interventions in residential buildings, which constitute the largest building category. The multi-criteria decision support model developed in the previous chapter is expanded to take into account any synergies among the available options. Moreover, the uncertainty is addressed using interval analysis, which is suitable for engineering problems, as it provides a lot of useful information to the decision-maker without requiring any distribution information regarding the uncertainty in order to be used. The proposed methodology is then applied to a case study.

The fourth chapter is devoted to voluntary load curtailment programs, which are a subcategory of demand response programs. When implementing such programs, consumers are subsidized to reduce their short-term energy demand voluntarily. These programs are complex to model and in order to solve the formulated problem, game theory and meta-heuristic algorithms based on particle swarm optimization are used. The developed algorithms are evaluated by solving various numerical examples.

In the last chapter of this Thesis, the conclusions are drawn and some ideas for future research are suggested, based on the problems studied and the proposed methodologies.

Keywords:

energy market, energy policy, energy efficiency, energy management, demand response, multi-criteria decision support, interval analysis, mixed-integer programming, bilevel programming, particle swarm optimization, Stackelberg, Nash

Ευχαριστίες

Με την παρούσα παράγραφο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση της Διατριβής μου.

Αρχικά, ευχαριστώ τον επιβλέποντα της Διατριβής, καθηγητή Γεώργιο Π. Παπαβασιλόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την εποχή των προπτυχιακών μου σπουδών, για την καθοδήγηση, τη βοήθεια και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διατριβής, αλλά και γενικότερα για όλα όσα μου δίδαξε στους τομείς της επιστήμης και της ζωής.

Επιπλέον, ευχαριστώ όσους ακόμα συμμετείχαν στη σύλληψη και υλοποίηση των ιδεών καθώς και στη συγγραφή των ερευνητικών εργασιών που αποτελούν τη βάση της παρούσας Διατριβής, δηλαδή τον καθηγητή Μιχάλη Βραχάτη, τον Δρ. Νικόλαο Κακογιάννη, την Δρ. Έλενα Σαρρή και τον υποψήφιο διδάκτορα και φίλο Νικόλαο Χρυσανθόπουλο. Γενικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς με τους οποίους συνεργάστηκα όσο ήμουν στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της σχολής και οι οποίοι με τις γνώσεις και την εμπειρία τους με βοήθησαν ουσιαστικά κατά τη διάρκεια της έρευνάς μου.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους τους φίλους μου με τους οποίους μοιραστήκαμε σκέψεις και ανησυχίες, οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν όλα αυτά τα χρόνια, διευκόλυναν και έκαναν πιο ευχάριστη την καθημερινότητά μου.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα τους γονείς μου, Δημήτριο Κοντογιώργο και Αγγελική Μαργαρίτη, για την ψυχολογική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν απλόχερα, όχι μόνο όσο ήμουν υποψήφιος διδάκτορας, αλλά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Οι δικές τους θυσίες και καθημερινή βοήθεια αποτέλεσαν τη βάση για να συνεχίσω και να επιτύχω τους στόχους μου.

Πίνακας περιεχομένων

Extended abstract	13
Energy management and energy efficiency related modeling and problem-solving using optimization techniques and game theory	13
1 Εισαγωγή	24
1.1 Πολυκριτηριακή αξιολόγηση ενεργειακών επενδύσεων και ενεργειακού σχεδιασμού με χρήση ακέραιου προγραμματισμού	24
1.2 Χρήση μεικτού ακέραιου προγραμματισμού για την αξιολόγηση παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια του οικιακού τομέα υπό αβεβαιότητα	27
1.3 Επιδοτούμενο πρόγραμμα περικοπής φορτίου σε αγορά ενέργειας διατυπωμένο ως παίγνιο Stackelberg	29
1.4 Αναφορές πρώτου κεφαλαίου	33
2 Πολυκριτηριακή αξιολόγηση ενεργειακών επενδύσεων και ενεργειακού σχεδιασμού με χρήση ακέραιου προγραμματισμού	38
2.1 Διατύπωση του προβλήματος.....	39
2.1.1 Παράδειγμα μελέτης περίπτωσης	39
2.1.2 Ενσωμάτωση πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων	42
2.1.3 Αξιολόγηση των λύσεων	45
2.2 Μέθοδοι επίλυσης	46
2.2.1 Πρόβλημα ικανοποιησιμότητας.....	46
2.2.2 Πρόβλημα γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού	47
2.2.3 Πρόβλημα κλασματικού ακέραιου προγραμματισμού	47
2.2.4 Πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού πολλαπλών στόχων.....	49
2.3 Αριθμητικά παραδείγματα	51
2.3.1 Παραδείγματα προβλήματος ικανοποιησιμότητας	51
2.3.2 Παραδείγματα προβλημάτων γραμμικού και κλασματικού ακέραιου προγραμματισμού	54
2.3.3 Παραδείγματα προβλήματος ακέραιου προγραμματισμού πολλαπλών στόχων.....	55
2.4 Ευαισθησία και ευρωστία των λύσεων	58
2.5 Αναφορές δεύτερου κεφαλαίου	60
3 Χρήση μεικτού ακέραιου προγραμματισμού για την αξιολόγηση παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια του οικιακού τομέα υπό αβεβαιότητα	61
3.1 Διατύπωση του προβλήματος.....	63
3.2 Μέθοδος και διαδικασία βελτιστοποίησης	66
3.3 Μελέτη περίπτωσης	70
3.4 Αποτελέσματα.....	72
3.5 Αναφορές τρίτου κεφαλαίου	76

4	Επιδοτούμενο πρόγραμμα περικοπής φορτίου σε αγορά ενέργειας διατυπωμένο ως παίγνιο Stackelberg.....	77
4.1	Περιγραφή του προβλήματος.....	78
4.2	Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος	80
4.3	Πλαίσιο Μαθηματικού Προγραμματισμού.....	84
4.4	Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων.....	86
4.5	Αποτελέσματα.....	91
4.5.1	Ισορροπία Nash δυο καταναλωτών	93
4.5.2	Ισορροπία Nash πέντε καταναλωτών	94
4.5.3	Ισορροπία Stackelberg ενός ηγέτη και δυο ακολούθων	95
4.5.4	Ισορροπία Stackelberg ενός ηγέτη και πολλών ακολούθων.....	98
4.6	Αναφορές τέταρτου κεφαλαίου.....	100
5	Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	101
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	106
	Γλωσσάρι όρων.....	106
	Κατάλογος εργασιών και δημοσιεύσεων.....	108

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Δεδομένα ενεργειακών πηγών	40
Πίνακας 2-2: Αποτελέσματα παραδείγματος 1A.....	52
Πίνακας 2-3: Αποτελέσματα παραδείγματος 1B.....	52
Πίνακας 2-4: Αποτελέσματα παραδείγματος 1A ταξινομημένα ως προς το J_2	53
Πίνακας 2-5: Αποτελέσματα παραδείγματος 2.....	54
Πίνακας 2-6: Αποτελέσματα παραδείγματος 3A.....	56
Πίνακας 2-7: Αποτελέσματα παραδείγματος 3B.....	57
Πίνακας 3-1: Διαθέσιμες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας	72
Πίνακας 3-2: Παραδείγματα χωρίς αβεβαιότητα.....	73
Πίνακας 3-3: Παραδείγματα με αβεβαιότητα στους συντελεστές βαρύτητας.....	74
Πίνακας 3-4: Παραδείγματα με αβεβαιότητα στους περιορισμούς.....	74
Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα παραδειγμάτων παιγνίων Nash με δυο καταναλωτές ...	93
Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα παραδείγματος παιγνίου Nash με πέντε καταναλωτές..	94
Πίνακας 4-3: Αποτελέσματα παραδείγματος παιγνίου Stackelberg με ένα ηγέτη και δυο ακολούθους	95
Πίνακας 4-4: Κόστη παικτών με και χωρίς εφαρμογή προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου	97
Πίνακας 4-5: Παράδειγμα παιγνίου Stackelberg με έναν ηγέτη και 15 καταναλωτές	98

Extended abstract

Energy management and energy efficiency related modeling and problem-solving using optimization techniques and game theory

Deregulation is currently considered as a way to make markets more efficient. That is why it has been implemented in many sectors such as energy, resulting in complex interactions among stakeholders at all levels of a market. These interactions are usually modeled using game theory notions and these models are then solved applying various optimization methods.

Besides, however, the interactions among stakeholders and the respective market level, there is general awareness regarding the constantly increasing global energy needs and energy consumption of end users. This awareness leads to developing models and decision support systems, aiming to facilitate users as far as planning and investments are concerned in the sectors of energy management and energy efficiency, as part of various energy policies that set limits, targets and incentives.

In this thesis three types of problems were studied, which involve various stakeholders but are part of a general framework regarding optimal energy planning at all levels of a liberalized energy market. These three problems as well as the methodologies developed to address them and the main conclusions drawn are presented in the following sections.

I. Multicriteria Evaluation of Energy Investments and Energy Planning using Integer Programming

The deregulation of energy markets has created a framework for policy making, still under evolution, which is much more complex than the previous one. As a consequence, new requirements need to be met, concerning both technical design and financial management. This framework renders the use of multicriteria techniques attractive. In this thesis, the investments in energy production and supply, depending on the policy implemented, are formulated as an integer programming problem, which consists of different sub-problems according to the assumptions made and the market's regulations. The equivalent relaxed problem is a mixed-integer programming problem that can represent the energy mix decision process by considering several criteria besides price and quantity. Nonlinearities are reformulated by inserting additional binary variables so that the solution algorithms are more effective and efficient in most real-life cases. In each scenario tested, all the feasible solutions as well as the optimal one that maximizes the decision maker's gain are obtained after imposing some thresholds on the criteria used to evaluate the different energy technologies, thus creating a decision support system for the stakeholder.

The structure of electricity energy markets has undergone many reforms, especially recently. The monopolies have given their place to liberalized markets, where many independent power producers and other participants can enter or exit at any time. These participants may act either as cooperators or competitors aiming to maximize their financial profit. This is achieved through their planning and strategies which can be modeled in many ways, depending on the market's structure. Regulatory authorities receive and evaluate these data, prioritize the stakeholders according to the regulatory framework and license or promote the options that are considered to be more suitable based on the implemented energy policy.

The deregulation of the energy market requires a more complex framework than the previous one. The demand for higher penetration of renewable energy sources (RES) and the strict environmental terms, aiming at the reduction of greenhouse gas emissions, have also contributed to this complexity. In a deregulated energy market, independent organizations responsible for the operation and regulation of the market are necessary. These entities aim at maximum social welfare, therefore they must coordinate and evaluate all available energy resources in order to take the best energy production and supply decisions for the society. A similar evaluation is performed by any other entity that needs to decide on its supply mix. As far as the resources are concerned, there are various different technologies available, each having its own advantages and drawbacks. Therefore, many kinds of energy resources and producers can be assumed that use variable fuels or power production technologies such as oil, lignite, natural gas, photovoltaic cells, wind turbines, hydropower, biomass etc. Even imports from neighboring countries (e.g. Bulgaria, FYROM, Albania, Turkey and Italy for the case of Greece) could be considered as a separate energy resource.

However, social welfare includes other aims as well besides meeting the energy demand. Regulatory authorities are no longer interested in just the financial cost of energy production, transmission and distribution since it is not sufficient for determining socially good choices. Until recently, every decision was based on it; this cost however does not guarantee that the best financial decision will also be socially optimal. Citizens and thus governments are interested in other aspects that influence the society and people's lives that should be taken into account as well, such as the environment. Therefore, there are multiple criteria to evaluate each resource such as its financial cost, the available energy quantity, reliability due to physical conditions (e.g. sunlight, wind speed and direction, gas pressure etc.), flexibility to enter and exit the system in order to deal with emergencies, environmental impact (e.g. CO_x and SO_x emissions), strategic characteristics (e.g. resource's importance for the country's energy self-sufficiency), social characteristics (e.g. resource's contribution to a region's social policy, employment and growth) and saturation (taking into consideration some network limitations or goals set). For each one of the above mentioned criteria, each resource is assigned a value based on measurements if the criterion is quantitative (such as greenhouse gas emissions) or based on other methodologies if it is qualitative. In any case, these values may possibly subject to

slight errors, which however should not influence the optimal decision; otherwise their impact should be assessed.

Consequently, a regulatory authority needs to decide which energy resources, namely which power producers, should be licensed, subsidized or prioritized in order to achieve the optimal energy mix. It should also be evaluated what is the risk associated with each decision. The resources of the optimal energy mix should be properly selected so that any limitations imposed on the evaluation criteria are satisfied. It should also be taken into account that the optimal decision depends on the implemented energy policy, thus different solutions may emerge in each case.

In order to address this multicriteria problem, the Pareto solution set is taken into account. To do that, weights are assigned to all these criteria so that they can be incorporated into a unique function that represents the total gain from economic, social, technical and environmental point of view according to the implemented energy policy. This function is then optimized with use of integer and mixed-integer programming algorithms that guarantee convergence to the optimal solution. For different weights, different solutions are obtained that constitute the Pareto set. To find the optimal solutions, algorithms based on branch-and-bound approach are used. After formulating the problem using binary variables, the algorithm searches for a binary integer feasible solution, updates the best binary integer feasible solution found so far and verifies that no better integer feasible solution is possible. Using binary variables is also convenient for formulating numerous real case studies that extend the simple examples solved in the respective chapter.

The selection of a solution from the Pareto set, but also the importance given to each evaluation criterion (weight), rests on the regulatory authorities. Since they represent the whole society and are interested in maximizing social welfare, the selection of the suitable energy policy becomes a political issue and thus it could be influenced by many factors and stakeholders. Every time the authorities set a policy, acting as the leader of the market, the other participants respond by playing a game among them so as to maximize their own profits based on this policy, acting as followers. The authorities need to take into account these interactions; consequently the use of game theory notions and social choice theory is crucial to obtaining a robust solution that will be accepted and such features can be incorporated into the mathematical model developed.

Many recent studies have addressed the problem of evaluating energy resources based on specific criteria. Many aspects should be taken into account except for the financial cost of power generation, such as reliability and environmental impact that are also considered very important. Most studies implement game theory tools in order to model the interaction between suppliers and consumers. In this thesis a decision support framework for the regulatory authorities is created, which includes necessary and sufficient criteria in order to obtain the socially best solution regarding energy investments and energy mix, according to the desired energy policy. The final decision is assumed to incorporate citizens' preferences, thus consumers do not interact directly with the model presented but they are also affected by the implemented energy policy.

The main contributions of the proposed approach are:

1. The combination of various mathematical programming techniques to develop a decision support tool for evaluating energy resources, which takes into account social welfare and not just financial cost.
2. The scalability of the proposed model which can be easily used in other investment selection problems as well, including both quantitative and qualitative criteria.

After formulating the problem, presenting the methodology and developing the proposed tool, a case study is used and various numerical examples are solved based on it. Then, the sensitivity and robustness of the solutions are studied. The results demonstrate the way each parameter affects the optimal solution. For example, the tighter the constraints become, the worse the value of the objective function corresponding to the optimal solution is. The evaluation of the resources should also be as accurate as possible because even slight modifications could alter the optimal solution depending on the problem's formulation. Finally, the implemented energy policy, namely the weights of the different costs in the objective function or the decision-maker's preferences in the satisfiability problem, is very important. This means that further study is needed on how the decision-maker will choose the values of these weights and which methodology is more suitable. The existence of many market participants, like multiple energy resources and producers, many categories of end-users, municipality authorities and even civil society organizations, lead to game theory notions as already mentioned. However, it is also observed that some energy resources are more often selected than others and that some optimal solutions are the same even if the weights are different, therefore the robustness of each solution needs to be studied as well.

II. A Mixed-Integer Programming Model for Assessing Energy-Saving Investments in Domestic Buildings under Uncertainty

Buildings account for more than 40% of total energy consumption, and the majority of this energy is for residential use. Therefore, building energy efficiency has become a worldwide priority for environmental reasons, including emissions and sustainability. To improve the energy performance of buildings the E.U. established the Energy Performance in Buildings Directive (EPBD, 2010/31/EU) and in the Energy Efficiency Directive (EED, 2012/27/EU) specific goals and requirements were set for reducing building energy consumption. New constructions are now designed according to these standards; however, the majority of buildings in Europe and the United States were built before 2000, meaning interventions and refurbishments could drastically increase their energy efficiency. Residential buildings built between 2000 and 2005 are 14% more efficient than those built in the 1980s and 40% more efficient than those built before 1950. Therefore, a strong interdependence exists between

energy consumption and building age, explaining why some governments provide incentives for retrofitting old buildings.

The measures that improve a building's energy efficiency range from equipping it with more efficient devices to complete renovation. The most important measures are major interventions that significantly increase the building's energy savings; however, these are usually very expensive. Potential energy-saving interventions can be classified into categories to facilitate evaluation based on various criteria such as final layout of the building, financial cost, energy savings achieved, and/or environmental performance. Practically, the aim of evaluating available retrofit solutions for a building is to improve its energy efficiency and increase its energy label, with the goal of being a nearly Zero Energy Building. In this thesis domestic buildings are considered, since they are the major and simultaneously the most aged building category. The energy needs of a domestic building are usually broken down into two parts: the first one includes heating and cooling needs that depend on thermal comfort and can be simulated using computational fluid dynamics (CFD) analysis and the second one includes electromechanical equipment consumption that depends on residents' schedule and habits. These two categories are different, but they interact if electricity is used for the heating and cooling of the house.

Therefore, a large set of interventions that need to be evaluated based on various criteria is available and the decision-maker needs to manage many conflicting objectives. Such multi-criteria problems are common in the energy sector. In this thesis, to address the retrofit problem, weights are assigned to the evaluation criteria that are then incorporated into a unique function representing the total gain of the decision-maker from all points of view according to his preferences. The weighting method is a widely used generation method, since a set of Pareto optimal solutions can be generated from which the decision-maker can select one. The objective function is then optimized using integer and mixed-integer programming techniques and by changing the weights different optimal solutions are obtained. The problem is formulated using binary variables that are convenient and the algorithms converge to the optimal solution after proper reformulation of nonlinear criteria.

Weight assignment has been used in several recent energy efficiency studies, mostly originating from multi-criteria analysis and multi-objective optimization, to address the problem of selecting the most efficient and suitable measures. These studies propose models that either focus mainly on complex computer-aided simulation in which uncertainty can be addressed by testing scenarios, or offer a holistic approach to the problem by considering the retrofit cost and the respective energy savings. In the latter case, software tools have also been developed to facilitate the decision process, without, however, addressing uncertainty. Some studies include a third objective, such as environmental impact or resident comfort, and the problem is solved using meta-heuristic algorithms and penalty functions that may lead to sub-optimal or even unrealistic solutions. These methods evaluate each intervention independently, without addressing probable synergies and most do not consider that except for the criteria used to evaluate an energy intervention, other preferences and limitations could also exist, which act as constraints to the formulated problem. For

example, there may be a budget limit, a time horizon limit depending on the rental or ownership of the residence, personal preferences regarding aesthetics and hassle resulting from the refurbishment, or even special requirements for some building types, such as historical buildings. This means that there could be quantitative as well as qualitative criteria and the respective thresholds should be considered during the decision process. Moreover, the uncertainties faced during this evaluation and their impacts on the optimal decision are not examined thoroughly in recent studies, since uncertainty is usually incorporated either by performing a sensitivity analysis of the optimal solution or using probability distributions.

Uncertainty needs to be taken into consideration to study the robustness of solutions. Robustness and reliability of optimal solutions is an important issue for several studies using multi-criteria decision-making framework. In this decision problem, uncertainty results from properly selecting the weights that correspond to the decision maker's preferences, which is one of the most critical problems in decision-making, as well as from the problem's constraints that might change unexpectedly, such as the available budget. Uncertainty could also exist in the investment's cost or expected savings, such as if funding mechanisms are available or if the energy rates are not fixed. Although these latter uncertainties are not considered in this thesis, they can be addressed using the proposed methodology.

Several methodologies address parameter uncertainty in integer programming, such as Fuzzy Sets and Stochasticity. In this thesis, Interval Analysis is used, as it is considered more suitable for engineering problems since the distribution information and the membership functions for the uncertain parameters are not usually known or required. In Interval Analysis an unknown parameter x is substituted with an interval, meaning that the parameter's value lies between the limits of this interval. Any function applied to x produces another interval that contains all the possible values of that function for all possible values of the uncertain parameter. Therefore, the decision maker can effectively obtain the range of the optimal solution and how the decision variables affect it.

A decision support model is thus used to incorporate nonlinear criteria and various constraints that depend on the decision-maker in order to address the retrofit problem. It is also discussed how the proposed model, extending recent studies, can easily address synergies among the various interventions and qualitative criteria to solve even the most complicated real-life cases. The uncertainty in the decision-maker's preferences is addressed to study the robustness of the decision variables and to estimate which decisions are mostly affected, resulting in a more efficient decision support tool. A case study of a residence in the Mediterranean area that requires upgrading to improve its energy efficiency is presented and the available energy-saving interventions are evaluated. The developed decision support system is used and the effect of preferences, constraints and uncertainty is studied using some numerical examples. Except for energy efficiency investments, the proposed model can also be used to address other selection problems in various sectors in which investment decisions need to be assessed under uncertainty. In summary, the main contributions of this section are:

1. The development of a decision-support tool to evaluate energy-saving interventions, which can incorporate any number of quantitative and/or qualitative criteria for assessing the available interventions even when synergies exist.
2. The ability of the tool to address uncertainty, taking into account the lack of distribution information and robustness of the solutions.

The numerical examples used to evaluate the proposed methodology result in some useful observations. When the problem is solved without uncertainty, namely all data are available and the decision-maker is certain regarding his preferences and limitations, the optimal solution is obtained in each scenario. In this case, as expected, the more the thresholds in the constraints are tightened, the more the feasible solutions are restricted. Thus, the optimal solution includes fewer interventions and the value of the objective function deteriorates. The opposite results hold true if the constraints are relaxed. Moreover, the importance assigned to each cost in the objective function can affect the optimal solution even if the constraints remain unchanged.

If it is assumed that the decision-maker can specify the constraints but he cannot explicitly decide the weights that correspond to his preferences, it is observed that the optimal decision may or may not be affected by the uncertainty. However, the objective function's optimal value is within a certain range that depends on the weighting factors, meaning it may vary independently of the choice of optimal interventions. In that case the solution can be robust, since the decision-maker is more interested in the selection of optimal interventions rather than that range.

On the other hand, if the weights are assumed to be deterministic, but uncertainty exists in the constraints and more specifically in the limits imposed by the decision-maker, it is observed that the optimal value of the objective function may not be considerably affected, but the uncertainty influences the optimal decision. Greater uncertainty could lead to less robust optimal solutions, as expected. The range of the objective function's optimal value increases, but the most important outcome is that the number of interventions whose selection is uncertain also increases. An alternative method to assess the robustness of the optimal solution could include studying various examples with deterministic parameters that cover the entire range of the uncertainty. However, this approach is not very efficient and these examples should be appropriately selected to avoid incoherent decisions.

Judging from the examples solved, the uncertainty in the constraints seems to affect the robustness of the optimal solution more than the possible uncertainty in the weight parameters as far as this particular building is concerned. However, more examples need to be studied to verify if this observation also applies to other cases and buildings. Moreover, the uncertainty of both the weight parameters and the constraint thresholds is expected to have an aggregate effect on the robustness of the optimal solution and the objective function, rendering the optimal selection of interventions more difficult.

The proposed framework assists the decision-maker to evaluate how different circumstances affect the optimal decisions. If the problem was solved based on the

most probable scenario, all parameters would be deterministic, and the decision-maker would not be able to determine which decision variables are more sensitive to slight variations in the parameters. The proposed methodology can also address both nonlinear fractional criteria, which are common in engineering problems, and synergies that arise among the interventions, thus increasing the practicality of the tool. Future research could include large-scale simulations in building blocks using extensions of the proposed model so that more interventions and all their synergies are incorporated. Furthermore, the robustness of the solutions could be studied given uncertain capital costs and/or uncertain energy savings. The proposed model could also be applied to other multi-criteria selection problems in which quantitative and qualitative criteria need to be considered.

III. A particle swarm optimizer for finding Nash and Stackelberg equilibria in a VLC demand response program

Interactions among stakeholders in an energy market, as already mentioned, can be modeled using game theory notions and the resulting problems can be solved applying various optimization techniques. In simple problems, deterministic optimization methods can be used in order to find the optimal solution. However, in complex large-scale systems the convergence to the solution representing an optimal or some game equilibrium is not guaranteed since nonlinear and nonconvex functions are used, thus meta-heuristic algorithms become attractive. Several meta-heuristic evolutionary algorithms have been recently tested in solving complex energy management problems, like artificial bee colony optimization, imperialist competition algorithm, ant colony optimization and others, giving promising results. Some of these algorithms are based on collective intelligent behaviors in nature. In this thesis, a variation of the standard Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, which studies the collective behavior of simple interacting agents in small groups, is used. The proposed particle swarm optimizer is based on Unified Particle Swarm Optimization (UPSO) that also belongs in swarm intelligence algorithms, is stochastic and tests have shown that it is a very promising algorithm for solving complex optimization problems.

The respective chapter is motivated by energy markets where demand response is used in order to motivate consumers to modify their consumption patterns via price signals or other incentives. The game examined concerns the implementation of a subsidy program where a player of the market, who acts as leader, offers subsidies as an incentive to the consumers, which are the followers, so as to influence their actions. A category of such programs is the Voluntary Load Curtailment (VLC) programs that are implemented with success in electricity markets during the last years, especially in US. It has been shown empirically that these load control programs can reduce demand in high price periods or in system security emergencies. Moreover, many recent studies incorporate demand response programs in complex optimization problems regarding energy market dynamics in order to evaluate their

influence on the price formation. These experimental validations suggest that demand response can be used in complex real-time energy management systems. In order for a VLC program to be implemented successfully, the leader needs to design it in advance that is why the proposed methodology can be used to analyze the consumers' response and design a suitable demand response program that will become effective if needed, namely in case of real-time operation of a grid, system emergency or even long-term planning of investments and security of supply in energy markets. In any case, the market deregulation and the appearance of demand-response programs makes the study of the stakeholders' interactions an interesting and promising area for developing efficient algorithms for complex systems.

The type of games used to model the situation described is the so-called Stackelberg or Leader-Follower games and are modeled as bilevel programming problems with leaders being the upper level and followers being the lower level. A leader provides the followers with some information and wants to optimize his objective function by incorporating into his optimization problem the followers' reactions, who believe that the leader's decisions are exogenous and fixed. Stackelberg games are generally difficult to solve due to nonconvexities that arise. Many methodologies for solving them have been presented since the first algorithmic attempts in order to exploit the specific structure of certain problems. The case with one leader and many followers belongs to the category of Mathematical Programs with Equilibrium Constraints (MPECs), where the equilibrium constraints correspond to the Nash game played by the followers that try to optimize their costs based on feedback from the leader. The results of such a problem may vary depending on whether energy market participants cooperate through coalition formations in supply and demand or not. In this thesis, non-cooperative game theory is promoted as followers do not cooperate among themselves or with the leader, since in large scale demand response programs individual consumers usually cannot influence market operation except if very large coalitions are formed. There are algorithms for solving this kind of bilevel problems under specific assumptions, but even if these don't hold, we still seek the Nash equilibrium among the followers. This way it is possible to study their interactions, foresee the reactions resulting from a leader's decision and estimate a suboptimal solution for the Stackelberg Leader-Follower problem.

A PSO algorithm is proposed for solving the formulated bilevel programming problem and finding the corresponding Nash and Stackelberg equilibria in order to overcome limitations of traditional mathematical programming framework. For this reason, the algorithm needs to converge to the optimal solution of each player by taking into account the other players' actions. Deterministic algorithms are not very efficient and effective when applied to large-scale complex problems that model the behavior of many market participants. This is why a meta-heuristic PSO algorithm is used in order to solve the formulated Stackelberg problem of the VLC program implementation. The UPSO algorithm used was extended using a multiple-swarm approach in order to address equilibrium problems, i.e. multiple swarms solve different optimization problems simultaneously and every algorithmic iteration provides the sum of all the swarms' solutions as input for the next one. The proposed

algorithm was also combined with Lagrange Multiplier Methods resulting in increased efficiency and effectiveness under certain assumptions. These algorithms were tested in examples of VLC programs by comparing the optimization results with those obtained from a suitable solver of GAMS (General Algebraic Modeling System) that is specialized software developed for modeling and solving complex optimization problems. Each player in an energy market has his own characteristics that need to be taken into account, so we seek to calculate his profit and study if and how all the players can be benefited from the implementation of a VLC program. The proposed methodology is scalable, thus it is also applicable to large-scale problems. The main contributions of this section are as follows:

1. Development of a decision-support tool for energy market stakeholders that are interested in designing demand-response VLC programs.
2. The experimental implementation of an intelligent algorithm based on PSO towards supporting the decision-making process. The algorithm has the following characteristics:
 - a. Capability of solving simultaneously large-scale interdependent optimization problems in order to seek game equilibria
 - b. Increased rate of convergence under certain assumptions
3. Conduct of numerical case studies in order to evaluate and validate the proposed framework and the effectiveness of VLC programs

In order to test the proposed algorithm, various VLC program schemes are examined by providing numerical results. Firstly, some examples for Nash equilibria are examined where it is assumed that the leader just wants to study the interactions among the followers without optimizing his objective function. In that case, he can experiment with various fee schemes that will lead to different demand response results from the consumers. Therefore, the game of the followers needs to be solved seeking Nash equilibrium. Then two examples of a Stackelberg game are solved, in which one leader seeks to optimize the offered fee based on the reactions of two consumers, as well as a more complex game with one leader, fifteen followers and two different fees. Energy markets have a lot of participants that can be categorized according to their characteristics; therefore the last example is more realistic and useful in studying the players' interactions. In all examples, the UPSO and penalty function parameters used were obtained from general tests in various optimization problems, so proper configuration of the algorithm for this type of problems could further improve it.

The results indicate that the proposed algorithms are effective and very efficient as far as Nash equilibria are concerned and they could even be used to seek Nash equilibria in real-time problems. An additional modification of UPSO algorithm was also proposed and used to calculate simple Nash equilibria resulting in even more promising results but further study is needed as to how the necessary assumptions for the multiplier method restrict the main advantages of meta-heuristic algorithms. Moreover, the proposed algorithm is effective also in Stackelberg games with one leader but in some cases differences regarding the values of some decision variables

were observed. This could be due to local minima very close to the global one, since the problem is very complex and includes nonlinearities and non-convexities. However, even in these cases the leader would have a cost very close to the optimal one and the algorithm's main advantage is that it can be used even if the leader's objective function is nonconvex or non-differentiable. Suitable configuration of the algorithm for this type of problems by experimenting with the unification factor, the PSO algorithm's and penalty function's parameters could improve the results as already mentioned.

The VLC program examples resulted in two main observations. Firstly, consumers are motivated to reduce their demand depending on the fee offered. This reduction depends on their basic needs and their cost functions, thus differentiating the consumers and this is something the leader should take into consideration. The results of the last complex example imply that followers with large expected demand could be satisfied with a smaller fee since they are compensated for larger curtailed quantities; however more examples need to be studied in order to conclude about the followers' behavior. Secondly, the leader is also benefited from the curtailment since he won't have to supply very expensive quantities of energy. In case the leader can easily satisfy the demand he doesn't need to implement a VLC program and the result would be equilibrium at the price and quantity expected.

Consequently, the goal of reducing the total energy demand is achieved through the implementation of a suitable VLC program, while there is profit all players, both the leader and the followers. Therefore, this type of demand response programs could be widely used in order to increase system reliability and mitigate possible system risks, as VLC programs seem to be an effective incentive mechanism. The developed decision support tool can be used in designing suitable VLC programs according to the number and type of consumers that are expected to participate. Complex large-scale demand response programs need proper planning but simple VLC programs could be used even in real-time scheduling because of the high rate of convergence observed.

Further research could also address the uniqueness of the equilibria or if the proposed algorithm can also be extended to address games with many leaders and many followers (Equilibrium Problems with Equilibrium Constraints – EPECs). In this type of problems, interactions among the players will be useful in studying large-scale and realistic games in energy markets with many players in each level.

1 Εισαγωγή

Η απελευθέρωση των αγορών έχει προωθηθεί σε πολλούς τομείς κατά τις τελευταίες δεκαετίες, μεταξύ των οποίων και ο τομέας της ενέργειας, ως ένας τρόπος για να καταστούν οι αγορές πιο αποτελεσματικές. Η διαδικασία αυτή που συνοδεύεται από σημαντικές αλλαγές στο ρυθμιστικό πλαίσιο και το σχεδιασμό των αγορών, έχει οδηγήσει σε σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων σε όλα τα επίπεδα της αγοράς. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας έννοιες από τη θεωρία παιγνίων και τα προβλήματα που προκύπτουν δύναται να επιλυθούν εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης. Εκτός όμως από το επίπεδο της αγοράς και την αλληλεπίδραση με άλλους συμμετέχοντες, υπάρχει μια γενικότερη ευαισθητοποίηση αναφορικά με τις ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες παγκοσμίως καθώς και το ύψος της ενεργειακής κατανάλωσης των τελικών χρηστών. Η ευαισθητοποίηση αυτή έχει οδηγήσει στην προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας και ανάπτυξης μοντέλων και συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, τα οποία σκοπό έχουν τη διευκόλυνση των χρηστών στην προσπάθεια σχεδιασμού και υλοποίησης δράσεων ή επενδύσεων στους τομείς της διαχείρισης και της εξοικονόμησης ενέργειας. Η προσπάθεια αυτή εντάσσεται στα πλαίσια διαφόρων ενεργειακών πολιτικών οι οποίες θεσπίζουν όρια, στόχους αλλά και κίνητρα προς αυτή την κατεύθυνση.

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκαν τρία είδη τέτοιων προβλημάτων που απασχολούν διαφορετικούς ενδιαφερόμενους, αλλά αποτελούν μέρος του συνολικού πλαισίου για το βέλτιστο ενεργειακό σχεδιασμό των σύγχρονων απελευθερωμένων αγορών ενέργειας σε όλα τα επίπεδα. Τα τρία αυτά είδη προβλημάτων και οι μεθοδολογίες επίλυσής τους που αναπτύχθηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά στις παρακάτω υποενότητες και αναπτύσσονται στα επόμενα κεφάλαια.

1.1 Πολυκριτηριακή αξιολόγηση ενεργειακών επενδύσεων και ενεργειακού σχεδιασμού με χρήση ακέραιου προγραμματισμού

Η δομή των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας έχει υποστεί πολλές μεταρρυθμίσεις, ειδικά τα τελευταία χρόνια. Τα μονοπώλια αντικαθίστανται από απελευθερωμένες αγορές, όπου πολλοί ανεξάρτητοι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και άλλοι συμμετέχοντες, μπορούν να εισέρχονται ή να εξέρχονται σε διάφορες χρονικές στιγμές. Αυτοί οι συμμετέχοντες μπορούν κάθε φορά να δρουν στις αγορές συνεργατικά [1] ή ανταγωνιστικά [2], προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν το οικονομικό τους όφελος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του προγραμματισμού και της στρατηγικής τους που μπορούν να μοντελοποιηθούν με διάφορους τρόπους ανάλογα και με τη δομή κάθε αγοράς. Ο εκάστοτε ρυθμιστής της αγοράς αξιολογεί αυτά τα δεδομένα, κατηγοριοποιεί τους ενδιαφερόμενους ανάλογα με τις κείμενες ρυθμιστικές διατάξεις και με βάση το νομοθετικό πλαίσιο και την ακολουθούμενη ενεργειακή πολιτική αδειοδοτεί ή προκρίνει τις επιλογές που θεωρεί καταλληλότερες.

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί επομένως ένα ρυθμιστικό πλαίσιο πολύ πιο σύνθετο από αυτό που υπήρχε πριν, το οποίο στις περισσότερες αγορές είναι ακόμα υπό εξέλιξη. Η απαίτηση για μεγαλύτερη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και οι ολοένα πιο αυστηρές περιβαλλοντικές απαιτήσεις όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου, έχουν επίσης συντελέσει στην αύξηση της πολυπλοκότητας. [1,3,4,5,6]. Ως αποτέλεσμα, τίθενται νέες απαιτήσεις τόσο στον τεχνικό σχεδιασμό των αγορών και των δικτύων όσο και στην οικονομική διαχείρισή τους.

Σε μια απελευθερωμένη αγορά, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ανεξάρτητων φορέων που θα είναι υπεύθυνοι για τη λειτουργία και τη ρύθμισή της. Οι φορείς αυτοί επιζητούν τη μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους, οπότε πρέπει μεταξύ άλλων να συντονίζουν και να αξιολογούν όλες τις δυνατές πηγές ενέργειας, ώστε να λαμβάνονται οι καλύτερες αποφάσεις για την κοινωνία αναφορικά με την παραγωγή και προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά τις πηγές ενέργειας, υπάρχουν διαθέσιμες πολλές διαφορετικές, κάθε μία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επομένως, μπορεί να υποθεθεί ότι σε κάθε αγορά υπάρχουν πολλών ειδών παραγωγοί που χρησιμοποιούν διάφορες πρώτες ύλες και τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως πετρέλαιο, λιγνίτης, φυσικό αέριο, φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρικά, βιομάζα κ.ά. Ακόμα και οι εισαγωγές από γειτονικές χώρες (στην περίπτωση της Ελλάδας από Βουλγαρία, Σκόπια, Αλβανία, Τουρκία και Ιταλία) μπορούν εμμέσως να θεωρηθούν ως διαφορετικές πηγές ενέργειας.

Το κοινωνικό όφελος όμως έχει και άλλες στοχεύσεις εκτός από την ικανοποίηση της ζήτησης για ενέργεια. Οι Ρυθμιστικές Αρχές δεν ενδιαφέρονται πλέον μόνο για το οικονομικό κόστος της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ενέργειας, καθώς δεν επαρκεί για να καθοριστούν οι καλύτερες κοινωνικά επιλογές. Έως πρόσφατα οι αποφάσεις στηρίζονταν πρωτίστως στα οικονομικά δεδομένα, όμως το οικονομικό βέλτιστο δεν είναι απαραίτητα και κοινωνικό βέλτιστο, δεδομένου ότι οι πολίτες, επομένως και οι κυβερνήσεις, ενδιαφέρονται και για άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την καθημερινότητα των ανθρώπων, όπως είναι το περιβάλλον και η κοινωνική ευημερία. Επομένως, υπάρχουν πολλά κριτήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση κάθε ενεργειακής πηγής μεταξύ των οποίων το οικονομικό κόστος, η διαθέσιμη ποσότητα ενέργειας, η αξιοπιστία λόγω φυσικών συνθηκών (π.χ. ηλιοφάνεια, ένταση ανέμων, πίεση αερίου κλπ.), η ευελιξία στην είσοδο και έξοδο από το σύστημα ώστε να αντιμετωπίζονται έκτακτες συνθήκες, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (εκπομπές οξειδίων του άνθρακα, του θείου και άλλων αερίων του θερμοκηπίου), στρατηγικά χαρακτηριστικά (π.χ. η σημασία κάθε πηγής στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας), κοινωνικά χαρακτηριστικά (π.χ. η συνεισφορά κάθε ενεργειακής πηγής στις τοπικές κοινωνίες, την ανάπτυξη και την απασχόληση) και ο κορεσμός (σε περίπτωση περιορισμών του δικτύου ή επίτευξης συγκεκριμένων στόχων). Για κάθε ένα από τα κριτήρια που αναφέρονται, κάθε ενεργειακή πηγή αξιολογείται με βάση μετρήσεις, εάν το κριτήριο είναι ποσοτικό (π.χ. η σύσταση των εκπεμπόμενων αερίων), ή με βάση άλλες μεθόδους εάν το κριτήριο είναι ποιοτικό. Οι τιμές που θα αποδοθούν τελικά σε κάθε πηγή ενέργειας

πιθανόν να εμπεριέχουν σφάλματα ακόμα και αν βασίζονται σε επιστημονικές μεθοδολογίες. Αυτά τα σφάλματα ωστόσο δεν πρέπει να είναι τέτοια που να επηρεάζουν την τελική απόφαση, διαφορετικά θα πρέπει να εκτιμηθεί η επίδρασή τους.

Επομένως, κάθε Ρυθμιστική Αρχή, που είναι η Εποπτεύουσα Αρχή της αγοράς, καλείται να αποφασίσει ποιες ενεργειακές πηγές και κατ' επέκταση ποιοι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να αδειοδοτηθούν, να επιδοτηθούν ή να τους δοθεί προτεραιότητα, ώστε τελικά να προκύψει το βέλτιστο ενεργειακό μίγμα. Σε αυτή τη διαδικασία θα πρέπει επίσης να αξιολογηθεί ποιος είναι ο κίνδυνος που συνδέεται με την εκάστοτε απόφαση. Οι πηγές που θα ενταχθούν στο ενεργειακό μίγμα θα πρέπει να επιλέγονται ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί που τίθενται σε σχέση με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν. Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η βέλτιστη απόφαση εξαρτάται από την ακολουθούμενη ενεργειακή πολιτική καθώς κάθε φορά μπορεί να προτείνονται διαφορετικές λύσεις, οι οποίες πρέπει να συνοδεύονται από τις αντίστοιχες αξιολογήσεις.

Πολλές μελέτες έχουν μέχρι στιγμής ασχοληθεί με κριτήρια αξιολόγησης ενεργειακών πηγών. Προκύπτει ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες πέρα από το οικονομικό κόστος κάθε παραγωγού [7,8]. Μεταξύ αυτών, πολύ σημαντικοί είναι η αξιοπιστία [9] και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ενέργειας [7,10]. Οι περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούν εργαλεία της Θεωρίας Παιγνίων προκειμένου να μοντελοποιήσουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγωγών και των καταναλωτών [11,12,13]. Σε αυτή τη διατριβή αναπτύσσεται ένα πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο περιλαμβάνει όλα τα κριτήρια που απαιτούνται για να προκύψει για την κοινωνία η βέλτιστη απόφαση όσον αφορά τις ενεργειακές επενδύσεις και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνάρτηση και με την επιθυμητή ενεργειακή πολιτική. Οι αποφάσεις μιας Ρυθμιστικής Αρχής υποτίθεται πως ενσωματώνουν τις προτιμήσεις των πολιτών, επομένως οι καταναλωτές δεν περιλαμβάνονται άμεσα στο μοντέλο που θα αναπτυχθεί αν και επηρεάζονται επίσης από την εφαρμοζόμενη ενεργειακή πολιτική.

Συνοπτικά, η κύρια συνεισφορά του αντίστοιχου κεφαλαίου εντοπίζεται:

1. Στη σύνθεση διάφορων τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού προκειμένου να αναπτυχθεί ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την αξιολόγηση ενεργειακών πηγών, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη το γενικότερο κοινωνικό όφελος και όχι μόνο το οικονομικό.
2. Στη δυνατότητα εύκολης επέκτασης του προτεινόμενου μοντέλου και σε άλλα προβλήματα αξιολόγησης επενδύσεων, τα οποία περιλαμβάνουν ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης, ακόμα και αν πρόκειται για προβλήματα μεγάλης κλίμακας.

1.2 Χρήση μεικτού ακέραιου προγραμματισμού για την αξιολόγηση παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια του οικιακού τομέα υπό αβεβαιότητα

Τα κτίρια είναι υπεύθυνα για περισσότερο από 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και από αυτό το ποσοστό το μεγαλύτερο κομμάτι αφορά τα κτίρια του οικιακού τομέα [14,15]. Επομένως, η αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων αποτελεί προτεραιότητα παγκοσμίως για διάφορους περιβαλλοντικούς λόγους, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και η βιωσιμότητα [16]. Προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση στα κτίρια, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξέδωσαν την Οδηγία 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD) καθώς και την Οδηγία 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση (EED), με τις οποίες ορίστηκαν συγκεκριμένοι στόχοι και απαιτήσεις σχετικά με τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Τα νέα κτίρια και κτιριακές μονάδες σχεδιάζονται πλέον σύμφωνα με αυτές τις προδιαγραφές, ωστόσο η πλειοψηφία των κτιρίων σε Ευρώπη και Ηνωμένες Πολιτείες είναι κατασκευασμένα πριν το 2000 [17,18], επομένως οι ενεργειακές παρεμβάσεις και οι ανακαινίσεις θα μπορούσαν να αυξήσουν κατά πολύ την ενεργειακή τους απόδοση. Τα κτίρια του οικιακού τομέα που κατασκευάστηκαν μεταξύ 2000 και 2005 είναι 14% πιο αποδοτικά από αυτά που κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1980 και 40% πιο αποδοτικά από αυτά που κατασκευάστηκαν πριν το 1950 [18], άρα υπάρχει μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της ενεργειακής κατανάλωσης και της ηλικίας ενός κτιρίου, γεγονός το οποίο εξηγεί γιατί μερικές κυβερνήσεις παρέχουν κίνητρα για την ανακαίνιση παλαιών κτιρίων.

Τα μέτρα που μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου ποικίλουν από απλή αντικατάσταση εξοπλισμού και συσκευών με άλλες πιο αποδοτικές έως την ριζική ανακαίνιση του κτιρίου [19]. Τα πιο σημαντικά μέτρα είναι οι δραστικές παρεμβάσεις που αυξάνουν σημαντικά την εξοικονόμηση ενέργειας στο κτίριο, αν και συνήθως τέτοιου είδους παρεμβάσεις έχουν υψηλό κόστος. Οι πιθανές παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ώστε να διευκολυνθεί η αξιολόγησή τους βάσει διαφόρων κριτηρίων όπως το οικονομικό κόστος, η επιτευχθείσα εξοικονόμηση ενέργειας, η εμφάνιση του κτιρίου ή/και το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα [20,21]. Η αξιολόγηση των διαθέσιμων παρεμβάσεων πρακτικά στοχεύει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου και την συνεπακόλουθη αναβάθμιση της ενεργειακής του κλάσης, με τελικό στόχο τη μετατροπή του σε κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nearly Zero Energy Building – nZEB) [22]. Το αντίστοιχο κεφάλαιο επικεντρώνεται σε κτίρια του οικιακού τομέα καθώς αποτελούν τη μεγαλύτερη και ταυτόχρονα την πιο γερασμένη κατηγορία κτιρίων.

Πολλές πρόσφατες μελέτες σχετικές με την ενεργειακή αποδοτικότητα βασίζονται στην πολυκριτηριακή ανάλυση και την βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα επιλογής των πιο αποτελεσματικών και κατάλληλων μέτρων [23]. Οι μελέτες αυτές προτείνουν

μοντέλα που είτε επικεντρώνονται σε σύνθετες ασκήσεις προσομοίωσης με χρήση υπολογιστικών εργαλείων [24] τα οποία εξετάζουν την αβεβαιότητα δοκιμάζοντας πιθανά σενάρια, είτε εφαρμόζουν μια ολιστική προσέγγιση στο πρόβλημα λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των επεμβάσεων και το όφελος από την αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας [25]. Στη δεύτερη περίπτωση, έχουν επίσης αναπτυχθεί υπολογιστικά εργαλεία για να διευκολύνουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, ωστόσο αυτά δεν ενσωματώνουν την αβεβαιότητα [26]. Μερικές μελέτες περιλαμβάνουν και τρίτο κριτήριο, όπως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις [27] ή η άνεση των κατοίκων [28], επιλύοντας το πρόβλημα με χρήση μεταερευτικών αλγορίθμων και συναρτήσεων ποινής που ενδεχομένως οδηγήσουν σε υποβέλτιστες ή μη ρεαλιστικές λύσεις. Οι μελέτες αυτές αξιολογούν κάθε παρέμβαση ξεχωριστά, χωρίς να εξετάζουν πιθανές συνέργειες μεταξύ τους, ενώ οι περισσότερες δεν λαμβάνουν υπόψη ότι εκτός από τα κριτήρια αξιολόγησης μιας παρέμβασης ενδεχομένως να υπάρχουν και άλλες προτιμήσεις και απαιτήσεις που ενσωματώνονται στο πρόβλημα ως περιορισμοί. Για παράδειγμα, ίσως υπάρχει περιορισμός στο διαθέσιμο προϋπολογισμό, στο χρονικό ορίζοντα αναλόγως αν πρόκειται για ενοικιασμένη ή ιδιόκτητη κατοικία, προσωπικές προτιμήσεις του αποφασίζοντα σχετικές με την αισθητική και την αναστάτωση που συνδέονται με μια ανακαίνιση, ή ακόμα και ειδικές απαιτήσεις για κάποια είδη κτιρίων, όπως για παράδειγμα οι διατηρητέες κατοικίες [29]. Συνεπάγεται ότι μπορεί τελικά να υπάρχουν τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά κριτήρια, στα οποία ενδεχομένως τεθούν όρια που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Επιπλέον, η αβεβαιότητα που ίσως προκύψει κατά την αξιολόγηση των εναλλακτικών και η επιρροή της στη βέλτιστη απόφαση δεν εξετάζεται επαρκώς, καθώς οι πρόσφατες μελέτες συνήθως την αντιμετωπίζουν μέσω αναλύσεων ευαισθησίας της βέλτιστης λύσης [30] ή χρησιμοποιώντας συναρτήσεις κατανομής πιθανοτήτων [31].

Η αβεβαιότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ώστε να εξεταστεί η ευρωστία των λύσεων. Η ευρωστία και η αξιοπιστία της βέλτιστης λύσης είναι σημαντικό θέμα για αρκετές μελέτες που χρησιμοποιούν το πολυκριτηριακό πλαίσιο λήψης αποφάσεων [32,33]. Υπάρχουν αρκετές μεθοδολογίες για να εξεταστεί η αβεβαιότητα στο γραμμικό προγραμματισμό, όπως τα ασαφή σύνολα (fuzzy sets) [34] και η στοχαστικότητα [35]. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η διαστηματική ανάλυση (interval analysis), που είναι καταλληλότερη για προβλήματα μηχανικής [36], στα οποία οι πληροφορίες για τις συναρτήσεις κατανομής και τις συναρτήσεις συμμετοχής (membership functions) των αβέβαιων παραμέτρων δεν είναι συνήθως γνωστές ή δεν απαιτούνται. Στη διαστηματική ανάλυση ο αποφασίζων μπορεί να υπολογίσει αποτελεσματικά το εύρος εντός του οποίου μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη λύση και πώς την επηρεάζουν οι μεταβλητές απόφασης.

Σκοπός είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο ενσωματώνει μη γραμμικά κριτήρια και διάφορους περιορισμούς που καθορίζονται από τον εκάστοτε αποφασίζοντα προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα ενεργειακής αναβάθμισης ενός κτιρίου του οικιακού τομέα υπό αβεβαιότητα. Εκτός όμως από τις επενδύσεις βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας, το

προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα προβλήματα επιλογής όπου απαιτείται αξιολόγηση επενδυτικών αποφάσεων υπό αβεβαιότητα.

Συνοπτικά, η κύρια συνεισφορά του αντίστοιχου κεφαλαίου εντοπίζεται:

1. Στην ανάπτυξη ενός εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων για την αξιολόγηση μέτρων βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας σε κτίρια, στο οποίο μπορεί να ενσωματωθεί οποιοσδήποτε αριθμός ποσοτικών ή/και ποιοτικών κριτηρίων αξιολόγησης ακόμα και όταν υπάρχουν συνέργιες μεταξύ τους
2. Στην ικανότητα του μοντέλου να αντιμετωπίσει την αβεβαιότητα που υπάρχει, ώστε να μελετηθεί η ευρωστία των λύσεων δεδομένης της έλλειψης πληροφοριών σχετικών με τις συναρτήσεις κατανομής των διαφόρων παραμέτρων.

1.3 Επιδοτούμενο πρόγραμμα περικοπής φορτίου σε αγορά ενέργειας διατυπωμένο ως παίγνιο Stackelberg

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων σε μια αγορά, όπως αναφέρθηκε αρχικά, μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας έννοιες από τη θεωρία παιγνίων και τα προβλήματα που προκύπτουν να επιλυθούν εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης [37]. Στα απλά προβλήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση, ωστόσο σε σύνθετα συστήματα μεγάλης κλίμακας η σύγκλιση σε μια βέλτιστη λύση ή ένα σημείο ισορροπίας δεν είναι δεδομένη λόγω της ύπαρξης μη γραμμικών και μη κυρτών συναρτήσεων, επομένως προκύπτει η αναγκαιότητα χρήσης μεταερευτικών αλγορίθμων. Αρκετοί μεταερευτικοί γενετικοί αλγόριθμοι έχουν δοκιμαστεί πρόσφατα στην επίλυση σύνθετων προβλημάτων ενεργειακής διαχείρισης, μεταξύ άλλων οι αλγόριθμοι artificial bee colony optimization [38], imperialist competition algorithm [39], ant colony optimization [40], καταλήγοντας σε ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Κάποιοι από αυτούς τους αλγόριθμους βασίζονται σε ευφυείς συλλογικές συμπεριφορές που παρατηρούνται στη φύση. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται μια παραλλαγή του κλασικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO), ο οποίος προκύπτει από τη συλλογική συμπεριφορά απλών μονάδων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μικρές ομάδες. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βασίζεται στον ενοποιημένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Unified Particle Swarm Optimization – UPSO), ο οποίος επίσης ανήκει στους αλγόριθμους σμήνους, είναι στοχαστικός και αρκετές δοκιμές του έχουν δείξει ότι μπορεί να ανταποκριθεί στην επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης [41].

Η μελέτη που έγινε βασίζεται στις αγορές ενέργειας όπου χρησιμοποιείται η διαχείριση ζήτησης προκειμένου να επηρεαστεί το προφίλ ζήτησης των τελικών καταναλωτών. Σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης, τα οποία μπορεί και να αποτελούν κομμάτι των προσφερόμενων επικουρικών υπηρεσιών σε μια αγορά, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές και κίνητρα ώστε να πειστούν οι καταναλωτές να μειώσουν τη ζήτησή τους, όπως για παράδειγμα σήματα τιμών ή άλλα κίνητρα [42,43]. Το παίγνιο που εξετάζεται αφορά την εφαρμογή ενός προγράμματος

επιδότησης, στο οποίο ένας παίκτης της αγοράς προσφέρει ως κίνητρο επιδοτήσεις στους καταναλωτές, ώστε να επηρεάσει τις αποφάσεις και τη συμπεριφορά τους.

Ένα τέτοιο είδος προγράμματος είναι και η οικειοθελής περικοπή φορτίου (Voluntary Load Curtailment – VLC), η οποία είναι γνωστή και ως πρόγραμμα διακοψιμότητας. Τα προγράμματα αυτά παρέχουν κίνητρα στους καταναλωτές προκειμένου να περικόψουν τη ζήτησή τους και να εξομαλυνθεί η καμπύλη φορτίου, χωρίς να αισθανθεί ο καταναλωτής ότι το πρόγραμμα λειτουργεί τιμωρητικά. Σε ένα πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου, ο διαχειριστής του συστήματος, κάποιος προμηθευτής ενέργειας ή κάποιος άλλος ενδιαφερόμενος φορέας θεωρεί ότι είναι επωφελές και για τον ίδιο να ανταμείψει τους καταναλωτές εάν περιορίσουν τη ζήτησή τους. Επομένως, ανακοινώνει μια ανταμοιβή που θα δοθεί σε περίπτωση μη κατανάλωσης μιας ποσότητας ενέργειας εντός μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, το οποίο σημαίνει ότι οι καταναλωτές μπορούν να ωφεληθούν εάν αποδεχτούν την περικοπή αυτή οικειοθελώς. Αυτός που προσφέρει αυτήν την ανταμοιβή, η οποία αποτελεί ένα είδος επιδότησης, σχεδιάζει το αντίστοιχο πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου ανάλογα με την αναμενόμενη ανταπόκριση των καταναλωτών.

Στη θεωρία παιγνίων, αυτή η κατάσταση μοντελοποιείται ως παίγνιο ηγέτη-ακολούθου (Leader-Follower game) ή παίγνιο Stackelberg [44], το οποίο είναι ένα πρόβλημα δυο επιπέδων με τους ηγέτες να είναι στο άνω επίπεδο και τους ακόλουθους στο κάτω. Ένας ηγέτης παρέχει στους ακόλουθους κάποιες πληροφορίες και επιζητά να βελτιστοποιήσει την αντικειμενική του συνάρτηση ενσωματώνοντας στο πρόβλημα βελτιστοποίησής του τις αντιδράσεις των ακόλουθων, οι οποίοι θεωρούν ότι οι αποφάσεις του ηγέτη είναι δεδομένες και δεν μπορούν να τις επηρεάσουν. Τα παίγνια Stackelberg είναι γενικά αρκετά περίπλοκα και δύσκολο να επιλυθούν, καθώς συνήθως περιλαμβάνουν μη γραμμικές και μη κυρτές συναρτήσεις και σύνολα. Έχουν παρουσιαστεί πολλές μεθοδολογίες για την επίλυσή τους από όταν αναπτύχθηκαν οι πρώτοι σχετικοί αλγόριθμοι [45-48] οι οποίοι προσπάθησαν να εκμεταλλευτούν τη δομή συγκεκριμένων προβλημάτων. Η περίπτωση όπου υπάρχει ένας ηγέτης και πολλοί ακόλουθοι ανήκει στην κατηγορία των μαθηματικών προβλημάτων με περιορισμούς ισορροπίας (Mathematical Programs with Equilibrium Constraints – MPECs) [49], όπου οι περιορισμοί ισορροπίας αντιστοιχούν σε ένα παίγνιο Nash στο οποίο συμμετέχουν οι ακόλουθοι που προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν τα κόστη τους βάσει των πληροφοριών που λαμβάνουν από τον ηγέτη. Τα αποτελέσματα ενός τέτοιου προβλήματος ενδεχομένως διαφέρουν ανάλογα με το αν οι συμμετέχοντες σε μια αγορά ενέργειας συνεργάζονται σχηματίζοντας ομάδες στην προσφορά και τη ζήτηση [50,51] ή όχι [52]. Στην παρούσα διατριβή προκρίνεται η μη συνεργατική θεωρία παιγνίων, δηλαδή οι ακόλουθοι δεν συνεργάζονται μεταξύ τους ή με τον ηγέτη, καθώς σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης μεγάλης κλίμακας οι μεμονωμένοι καταναλωτές δεν μπορούν να επηρεάσουν την αγορά εκτός και αν δημιουργήσουν πολύ μεγάλες ομάδες. Υπάρχουν πλέον αλγόριθμοι για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων δυο επιπέδων που στηρίζονται σε συγκεκριμένες υποθέσεις [37,53,54]. Ακόμα όμως και αν δεν ισχύουν αυτές οι υποθέσεις, ο ηγέτης ενδιαφέρεται να γνωρίζει το σημείο ισορροπίας Nash

στο παίγνιο των ακολούθων, ώστε να μελετήσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, να προβλέψει τις συμπεριφορές που προκύπτουν από τις αποφάσεις του και επομένως να εκτιμήσει μια υποβέλτιστη λύση του παιγνίου.

Στην προκείμενη περίπτωση, ο προμηθευτής ενέργειας μπορεί να είναι ο ηγέτης που αποφασίζει σχετικά με το ποσό της ανταμοιβής και οι καταναλωτές ακολουθούν ανταποκρινόμενοι στην πληροφορία που θα τους γνωστοποιηθεί. Τα προγράμματα διακοψιμότητας ξεκίνησαν να εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια με αρκετή επιτυχία, ιδιαίτερα στις Η.Π.Α. [55]. Εμπειρικά έχει φανεί ότι αυτά τα προγράμματα μπορούν να μειώσουν τη ζήτηση ενέργειας [56], επομένως μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε περιόδους υψηλών αιχμών κατανάλωσης και τιμών, είτε σε περιπτώσεις που κινδυνεύει η ασφάλεια και εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Μέχρι πρόσφατα τέτοιου είδους προγράμματα απευθύνονταν μόνο σε μεγάλους καταναλωτές, ωστόσο η τεχνολογική πρόοδος, που οδήγησε σε νέες ενεργειακές υπηρεσίες, έχει αναβαθμίσει τη σημασία των προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης (demand management programs). Πλέον, χρησιμοποιώντας σύγχρονους ηλεκτρονικούς μετρητές, οποιοσδήποτε καταναλωτής που είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο μπορεί να συμμετάσχει σε προγράμματα οικειοθελούς περικοπής φορτίου. Αυτές οι νέες δυνατότητες σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ανταγωνισμού στις αγορές ενέργειας, δημιουργούν ένα νέο πλαίσιο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποτελεσματικότερο ενεργειακό σχεδιασμό, καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο τη λειτουργία της αγοράς πολύ πιο αποδοτική και αξιόπιστη.

Πολλές πρόσφατες μελέτες ενσωματώνουν προγράμματα διαχείρισης ζήτησης σε σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία σχετίζονται με τη δυναμική εντός των αγορών ενέργειας, προκειμένου να αξιολογηθεί η επιρροή τους στο σχεδιασμό των τιμών [57,58]. Αυτές οι πειραματικές μελέτες υποδεικνύουν ότι η διαχείριση ζήτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σύνθετα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης ακόμα και σε πραγματικό χρόνο. Προκειμένου ένα πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου να υλοποιηθεί με επιτυχία, ο ηγέτης πρέπει να το σχεδιάσει εκ των προτέρων. Για το λόγο αυτό η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων στη διαδικασία ανάλυσης της συμπεριφοράς των καταναλωτών και στο σχεδιασμό ενός κατάλληλου προγράμματος διαχείρισης ζήτησης, το οποίο μπορεί να τεθεί σε ισχύ, εάν χρειαστεί, σε περιπτώσεις λειτουργίας του δικτύου σε πραγματικό χρόνο [59], έκτακτης ανάγκης ή μακροχρόνιου σχεδιασμού επενδύσεων και ασφάλειας εφοδιασμού στην αγορά ενέργειας [60]. Σε κάθε περίπτωση, η απελευθέρωση των αγορών και η εμφάνιση προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης καθιστά τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συμμετεχόντων μια ενδιαφέρουσα και υποσχόμενη περιοχή έρευνας για την ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων σε σύνθετα συστήματα [61,62].

Οι βασικές συνεισφορές της έρευνας που έγινε συνοψίζονται ως εξής:

1. Ανάπτυξη ενός εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων για όλους τους συμμετέχοντες στην αγορά ενέργειας που ενδιαφέρονται για το σχεδιασμό προγραμμάτων διαχείρισης ζήτησης και πιο συγκεκριμένα οικειοθελούς περικοπής φορτίου

2. Πειραματική εφαρμογή μεταευρετικού αλγορίθμου, βασισμένου σε PSO, για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, ο οποίος διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:
 - α. Ικανότητα ταυτόχρονης επίλυσης πολλών αλληλένδετων προβλημάτων βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας αναζητώντας τα σημεία ισορροπίας των διαφόρων παιγνίων
 - β. Αυξημένη ταχύτητα σύγκλισης υπό συγκεκριμένες συνθήκες
3. Επίλυση αριθμητικών παραδειγμάτων με βάση μια μελέτη περίπτωσης προκειμένου να αξιολογηθεί το προτεινόμενο πλαίσιο και η αποτελεσματικότητα των προγραμμάτων οικειοθελούς περικοπής φορτίου.

1.4 Αναφορές πρώτου κεφαλαίου

- [1]. Jia N.X., Yokoyama R., (2003) “Profit allocation of independent power producers based on cooperative Game theory”, *Electrical Power and Energy Systems* 25, 633-641
- [2]. Geerli L., Chen L., Yokoyama R., (2001) “Pricing and operation in deregulated electricity market by noncooperative game”, *Electric Power Systems Research* 57, 133-139
- [3]. E. Çelebi and J. D. Fuller, (2007) A Model for Efficient Consumer Pricing Schemes in Electricity Markets, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22.
- [4]. E. Çelebi and J. D. Fuller, (2012) Time-of-Use Pricing in Electricity Markets Under Different Market Structures, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27
- [5]. F. I. Denny, D. E. Dismukes, (2002) *Operations and Electricity Markets*, CRC Press.
- [6]. Stoft Steven, (2002) *Power System Economics Designing Markets for Electricity* IEEE Press.
- [7]. Krupa J, Jones C, (2013) “Black Swan Theory: Applications to energy market histories and technologies”, *Energy Strategy Reviews* 1, 286-290
- [8]. Migheli M., (2012) “It is just escalation: The one dollar game revisited”, *The Journal of Socio-Economics* 41, 434-438
- [9]. Soleymani S., Ranjbar A.M., Shirami A.R., (2008) “Strategic bidding of generating units in competitive electricity market with considering their reliability”, *Electrical Power and Energy Systems* 30, 193-201
- [10]. DeCanio J. Stephen, Fremstad Anders, (2013) “Game theory and climate diplomacy”, *Ecological Economics* 85, 177-187
- [11]. D.M. Reeves, M.P. Wellman, J.K. MacKie-Mason, A. Osepayshvili, (2005) “Exploring bidding strategies for market-based scheduling”, *Decision Support Systems* 39, 67-85
- [12]. C. Skoulidas, C. D. Vournas, G. P. Papavassilopoulos, (2010) An Adaptive Learning Game Model for Interacting Electric Power Markets, *INFOR*, Vol. 48, No. 4, pp. 261–266
- [13]. C. Skoulidas, C. Vournas, G. Papavassilopoulos, (2002) Adaptive Game Modeling of Deregulated Power Markets, *IEEE Power Engineering Review*,
- [14]. Laustsen, J. (2008) Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings. *Int. Energy Agency (IEA)*, 2, 477–488.
- [15]. Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. (2008) A review on buildings energy consumption information. *Energy Build.*, 40, 394–398.
- [16]. Allouhi, A.; El Fouih, Y.; Kousksou, T.; Jamil, A.; Zeraouli, Y.; Mourad, Y. (2015) Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends. *J. Clean. Prod.*, 109, 118–130.
- [17]. Atanasiu, B.; Despret, C.; Economidou, M.; Maio, J.; Nolte, I.; Rapf, O. (2011) *Europe’s Buildings under the Microscope. A Country-by-Country Review of the*

Energy Performance of Buildings; Buildings Performance Institute Europe (BPIE): Bruxelles, Belgium.

- [18]. U.S. Department of Energy. (2012) *2011 Buildings Energy Data Book*; Prepared for the Buildings Technologies Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy; D&R International, Ltd.: Washington, DC, USA.
- [19]. Diakaki, C.; Grigoroudis, E.; Kabelis, N.; Kolokotsa, D.; Kalaitzakis, K.; Stavrakakis, G. (2010) A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. *Energy*, *35*, 5483–5496.
- [20]. Kolokotsa, D.; Diakaki, C.; Grigoroudis, E.; Stavrakakis, G.; Kalaitzakis, K. (2009) Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. *Adv. Build. Energy Res.*, *3*, 121–146.
- [21]. Trianni, A.; Cagno, E.; De Donatis, A. (2014) A framework to characterize energy efficiency measures. *Appl. Energy*, *118*, 207–220.
- [22]. Salata, F.; Golasi, I.; Domestico, U.; Banditelli, M.; Basso, G.L.; Nastasi, B.; de Lieto Vollaro, A. (2017) Heading towards the nZEB through CHP+HP systems. A comparison between retrofit solutions able to increase the energy performance for the heating and domestic hot water production in residential buildings. *Energy Convers. Manag.*, *138*, 61–76.
- [23]. Wang, J.-J.; Jing, Y.-Y.; Zhang, C.-F.; Zhao, J.-H. (2009) Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, *13*, 2263–2278.
- [24]. Xu, P.; Shen, Y.; Chen, L.; Mao, J.; Chang, E.; Ji, Y. (2015) Assessment of energy-saving technologies retrofitted to existing public buildings in China. *Energy Effic.*, 1–28.
- [25]. Asadi, E.; Da Silva, M.G.; Antunes, C.H.; Dias, L. (2012) Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy Build.*, *44*, 81–87.
- [26]. Karmellos, M.; Kiprakis, A.; Mavrotas, G. (2015) A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. *Appl. Energy*, *139*, 131–150.
- [27]. Verbeeck, G.; Hens, H. (2007) Life cycle optimization of extremely low energy dwellings. *J. Build. Phys.*, *31*, 143–177.
- [28]. Penna, P.; Prada, A.; Cappelletti, F.; Gasparella, A. (2015) Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings. *Energy Build.*, *95*, 57–69.
- [29]. Burattini, C.; Nardecchia, F.; Bisegna, F.; Cellucci, L.; Gugliermetti, F.; Vollaro, A.L.; Salata, F.; Golasi, I. (2015) Methodological Approach to the Energy Analysis of Unconstrained Historical Buildings. *Sustainability*, *7*, 10428–10444.
- [30]. Malatji, E.M.; Zhang, J.; Xia, X. (2013) A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision. *Energy Build.*, *61*, 81–87.

- [31]. Bozorgi, A. (2015) Integrating value and uncertainty in the energy retrofit analysis in real estate investment—Next generation of energy efficiency assessment tools. *Energy Effic.*, 8, 1015–1034.
- [32]. Wang, J. (2012) Robust optimization analysis for multiple attribute decision making problems with imprecise information. *Ann. Oper. Res.*, 197, 109–122.
- [33]. Kakogiannis, N.; Kontogiorgos, P.; Sarri, E.; Papavassilopoulos, G.P. (2014) Multicriteria energy policy investments and energy market clearance via integer programming. *Central Eur. J. Oper. Res.*, 24, 515–534.
- [34]. Buckley, J.J.; Jowers, L.J. (2007) *Fuzzy Integer Programming. In Monte Carlo Methods in Fuzzy Optimization*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany,; pp. 223–226.
- [35]. Louveaux, F.V.; Schultz, R. (2003) Stochastic integer programming. In *Handbooks in Operations Research and Management Science*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; Volume 10, pp. 213–266.
- [36]. Moore, R.E.; Kearfott, R.B.; Cloud, M.J. (2009) *Introduction to Interval Analysis*; Society for Industrial and Applied Mathematics (Siam): Philadelphia, PA, USA.
- [37]. Gabriel, Steven A., et al. (2012) Complementarity modeling in energy markets. Vol. 180. Springer Science & Business Media.
- [38]. Marzband, M., Azarnejadian, F., Savaghebi, M., & Guerrero, J. M. (2017). An optimal energy management system for islanded Microgrids based on multi-period artificial bee colony combined with Markov Chain. *IEEE Systems Journal*, 11(3), 1712 – 1722
- [39]. Marzband, M., Parhizi, N., Savaghebi, M., & Guerrero, J. M. (2016). Distributed Smart Decision-Making for a Multimicrogrid System Based on a Hierarchical Interactive Architecture. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(2), 637 - 648
- [40]. Mousa Marzband et al (2016) Real time experimental implementation of optimum energy management system in standalone Microgrid by using multi-layer ant colony optimization, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 75, Pages 265-274,
- [41]. Parsopoulos, Konstantinos E., ed. (2010) Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications: advances and applications. IGI Global.
- [42]. U.S. Department of Energy (2006) Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them: report to U.S. Congress pursuant to section 1252 of the Energy Policy Act of 2005. Washington D.C.: U.S. Department of Energy.
- [43]. Federal Energy Regulatory Commission (2006) Assessment of demand response and advanced metering, staff report Docket Number AD-06-2-00. Washington, D.C.: Federal Energy Regulatory Commission.
- [44]. Simaan, Marwan, and Jose B. Cruz Jr. (1973) "On the Stackelberg strategy in nonzero-sum games." *Journal of Optimization Theory and Applications* 11.5: 533-555.

- [45]. Papavassilopoulos, G. P. (1980) "Algorithms for leader-follower games." Proceedings of the 18th Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing.
- [46]. Bialas, Wayne F., and Mark H. Karwan. (1980) "Multilevel optimization: a mathematical programming perspective." Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1980 19th IEEE Conference on. Vol. 19. IEEE.
- [47]. K. Shimizu and E. Aiyoshi. (1981) "A new computational method for Stackelberg and min-max problems by use of a penalty method." Automatic Control, IEEE Transactions on 26.2: 460-466.
- [48]. Papavassilopoulos, G. P. (1982) "Algorithms for static Stackelberg games with linear costs and polyhedra constraints." Decision and Control, 1982 21st IEEE Conference on. Vol. 21. IEEE.
- [49]. Luo, Zhi-Quan, Jong-Shi Pang, and Daniel Ralph (1996) Mathematical programs with equilibrium constraints. Cambridge University Press.
- [50]. Marzband M, Ardeshiri RR, Moafi M, Uppal H. (2017) Distributed generation for economic benefit maximization through coalition formation-based game theory concept. Int Trans Electr Energ Syst.; 27:e2313. <https://doi.org/10.1002/etep.2313>
- [51]. Georgios T. Andreou et al, (2017) Energy Efficiency in Urban Electrical Grids through Consumer Networking. Network Design and Optimization for Smart Cities: pp. 32-52. https://doi.org/10.1142/9789813200012_0002
- [52]. Marzband M, et al (2016) 'Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties', IET Generation, Transmission & Distribution, 10, (12), p. 2999-3009
- [53]. Bard, Jonathan F. (2013) Practical bilevel optimization: algorithms and applications. Vol. 30. Springer Science & Business Media.
- [54]. Dempe, Stephan (2002) Foundations of bilevel programming. Springer Science & Business Media.
- [55]. Walawalkar, Rahul, et al (2010) "Evolution and current status of demand response (DR) in electricity markets: Insights from PJM and NYISO." Energy 35.4: 1553-1560.
- [56]. Cappers, Peter, Charles Goldman, and David Kathan (2010) "Demand response in US electricity markets: Empirical evidence." Energy 35.4: 1526-1535.
- [57]. Mousa Marzband et al (2014) Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode, In Applied Energy, Volume 128, Pages 164-174.
- [58]. Mousa Marzband et al (2013) Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and MINLP, In Energy Conversion and Management, Volume 76, Pages 314-322

- [59]. Mousa Marzband et al (2016) Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids, In *Electric Power Systems Research*, Volume 140, Pages 78-86
- [60]. Erik R. Larsen, Sebastian Osorio, Ann van Ackere (2017) A framework to evaluate security of supply in the electricity sector, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 79, Pages 646-655
- [61]. Soliman, Hazem M., and Alberto Leon-Garcia (2014) "Game-theoretic demand-side management with storage devices for the future smart grid." *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.3: 1475-1485.
- [62]. Su, Wencong, and Alex Q. Huang (2014) "A game theoretic framework for a next-generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers." *Applied Energy* 119: 341-350.

2 Πολυκριτηριακή αξιολόγηση ενεργειακών επενδύσεων και ενεργειακού σχεδιασμού με χρήση ακέραιου προγραμματισμού

Το πρόβλημα της επιλογής των κατάλληλων ενεργειακών πηγών περιλαμβάνει, όπως αναφέρθηκε, την αξιολόγησή τους βάσει διαφόρων ποσοτικών και ποιοτικών κριτηρίων πέρα από το οικονομικό. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πολυκριτηριακό πρόβλημα, εξετάζεται το σύνολο λύσεων Pareto. Στα διάφορα κριτήρια αντιστοιχίζονται συντελεστές βαρύτητας, ώστε στη συνέχεια αυτά να ενσωματωθούν σε μια μοναδική αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αντιπροσωπεύει το συνολικό όφελος βασιζόμενη σε οικονομικά, τεχνικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά στοιχεία, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη ενεργειακή πολιτική της Εποπτεύουσας Αρχής. Η αντικειμενική αυτή συνάρτηση μπορεί να βελτιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ακέραιου και μεικτού ακέραιου προγραμματισμού, οι οποίοι εξασφαλίζουν σύγκλιση στη βέλτιστη λύση. Για διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας προκύπτουν διαφορετικές λύσεις, οι οποίες αποτελούν το σύνολο Pareto. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που βασίζονται στην Διακλάδωση και Οριοθέτηση (branch-and-bound) [1]. Έπειτα από τη διατύπωση του προβλήματος με χρήση δυαδικών μεταβλητών, οι αλγόριθμοι αυτοί αναζητούν μια εφικτή δυαδική λύση, ενημερώνονται με τη βέλτιστη εφικτή λύση που έχει βρεθεί έως εκείνη τη στιγμή και ελέγχουν εάν μπορεί να υπάρξει καλύτερη ακέραιη λύση στο πρόβλημα, μέχρι να συγκλίνουν τελικά στη βέλτιστη λύση. Η χρήση δυαδικών μεταβλητών διευκολύνει σημαντικά τη διατύπωση πολλών μελετών περιπτώσεων που βασίζονται σε πραγματικά προβλήματα, δίνοντας τη δυνατότητα επέκτασης στα παραδείγματα που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Η επιλογή μιας λύσης από το σύνολο Pareto καθώς και ο συντελεστής βαρύτητας που δίνεται σε κάθε κριτήριο, δηλαδή η σημαντικότητά του, επαφίεται στην Εποπτεύουσα Αρχή. Δεδομένου ότι αυτή αντιπροσωπεύει το κοινωνικό σύνολο και επιζητά να μεγιστοποιήσει το κοινωνικό όφελος, οι κατευθυντήριες γραμμές που θα ακολουθηθούν ανάγονται σε πολιτικό ζήτημα και επομένως εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Όποτε η Εποπτεύουσα Αρχή αποφασίζει μια πολιτική, λειτουργώντας ως ηγέτης στην αγορά, οι υπόλοιποι συμμετέχοντες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω ενός παιγνίου, προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν ο καθένας το δικό του όφελος με βάση αυτή την πολιτική, λειτουργώντας ως ακόλουθοι στην απόφαση του ηγέτη. Η Εποπτεύουσα Αρχή οφείλει να λάβει υπόψη αυτές τις αλληλεπιδράσεις, επομένως η χρήση εννοιών από τη Θεωρία Παιγνίων και τη Θεωρία Κοινωνικής Επιλογής είναι πολύ σημαντική ώστε να υπάρξει μια ισχυρή και αξιόπιστη λύση που θα γίνει αποδεκτή από όλους. Τέτοιου είδους στοιχεία μπορούν να ενσωματωθούν στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύσσεται στο παρόν κεφάλαιο.

Στις παρακάτω ενότητες περιγράφονται διάφορες μέθοδοι με βάση τις οποίες μπορούν να επιλεγούν και να αξιολογηθούν αρκετά διαφορετικά σενάρια αποφάσεων. Αρχικά παρουσιάζονται η αιτιολόγηση και η διατύπωση του προβλήματος καθώς και η μεθοδολογία και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυσή του. Στη

συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται διάφορα αριθμητικά παραδείγματα που επιλύθηκαν, ενώ στο τέλος μελετάται η ευαισθησία και η αξιοπιστία των λύσεων που προέκυψαν.

2.1 Διατύπωση του προβλήματος

Ο σκοπός αυτή της μελέτης είναι να βοηθηθούν οι εποπτεύουσες αρχές μιας αγοράς ενέργειας στην επιλογή των κατάλληλων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την ακολουθούμενη ενεργειακή πολιτική και διαφόρων ειδών κριτήρια αξιολόγησης. Τα κριτήρια αυτά εφαρμόζονται με σκοπό την αξιολόγηση και την προώθηση συγκεκριμένων ενεργειακών πηγών και τεχνολογιών, έχοντας ως προτεραιότητα τους παράγοντες που θεωρούνται σημαντικοί από την κοινωνία.

Αρχικά, πρέπει να αποφασιστούν τα κριτήρια που χρειάζονται για να αξιολογηθεί συνολικά μια πηγή ενέργειας. Η Εποπτεύουσα Αρχή ενδιαφέρεται επίσης να θέσει και συγκεκριμένα όρια εντός των οποίων θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές αυτών των κριτηρίων. Έπειτα από την εύρεση όλων των εφικτών λύσεων του προβλήματος, η Εποπτεύουσα Αρχή αναζητεί τη βέλτιστη απόφαση που μεγιστοποιεί την αντικειμενική της συνάρτηση, η οποία αντιπροσωπεύει το κοινωνικό όφελος βάσει της ενεργειακής της πολιτικής. Αφού αποφασίσει τους συντελεστές βαρύτητας για το κάθε κριτήριο, προκύπτει η μοναδική συνάρτηση κοινωνικής ευημερίας και τα όρια που τίθενται αποτελούν περιορισμούς για το πρόβλημα. Αυτή η πολυκριτηριακή μέθοδος υποστήριξης αποφάσεων είναι απλή στην εφαρμογή της και πολύ αποτελεσματική καθώς μπορεί να συγκλίνει γρήγορα στη βέλτιστη λύση, αναλόγως και της ακριβούς μαθηματικής διατύπωσης του προβλήματος.

2.1.1 Παράδειγμα μελέτης περίπτωσης

Το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί από την Εποπτεύουσα Αρχή είναι η επιλογή των κατάλληλων ενεργειακών πηγών για την παραγωγή ενέργειας, δεδομένου ότι αυτές έχουν ήδη βαθμολογηθεί με βάση κάποια κριτήρια. Αυτή η απόφαση μπορεί να αναφέρεται είτε σε μια επενδυτική στρατηγική με βάση την οποία θα παρασχεθούν κίνητρα για την προώθηση συγκεκριμένων πηγών και τεχνολογιών, είτε στην τελική αδειοδότηση κάποιου έργου στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αξιολόγησης οκτώ ενεργειακών πηγών (R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8) οι οποίες αξιολογούνται με βάση τα παρακάτω εννέα κριτήρια:

Cr1: κόστος μονάδας

Cr2: δυναμικότητα παραγωγής

Cr3: αξιοπιστία

Cr4: ευελιξία

Cr5: εκπομπές οξειδίων του άνθρακα (CO_x)

Cr6: εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x)

Cr7: στρατηγικά χαρακτηριστικά

Cr8: κοινωνικά χαρακτηριστικά

Cr9: κορεσμός

Αυτά τα κριτήρια αντιπροσωπεύουν παράγοντες ανεξάρτητους μεταξύ τους, οι οποίοι επηρεάζουν την τελική απόφαση που θα ληφθεί, ενώ είναι αναγκαία και ταυτόχρονα επαρκή για να αποφασίσει η Εποπτεύουσα Αρχή. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται σε αυτό το παράδειγμα είναι ενδεικτικές καθώς επιλύεται ένα θεωρητικό μοντέλο, αλλά μια Εποπτεύουσα Αρχή διαθέτει τα πραγματικά δεδομένα τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει για την εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικές μελέτες περιπτώσεων.

Πίνακας 2-1: Δεδομένα ενεργειακών πηγών ($A = a_{i,j}$, $j = 1, 2, \dots, 9$ και $i = 1, 2, \dots, 8$)

Cr\R	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Cr1	2	2,1	2,4	1,9	3	3,2	2,2	2,4
Cr2	115	80	90	150	20	15	110	80
Cr3	100	95	85	90	70	75	95	95
Cr4	80	90	60	80	85	80	75	70
Cr5	1	1,1	1,1	1	0,2	0,1	0,5	0,7
Cr6	1	0,8	0,9	1,2	0,3	0,5	0,2	0,3
Cr7	100	80	100	70	100	100	60	30
Cr8	70	65	85	90	75	85	65	95
Cr9	70	65	80	65	75	40	90	50

Σε κάθε ενεργειακή πηγή αντιστοιχεί μια στήλη με τιμές όσον αφορά τα εννιά κριτήρια. Τα κριτήρια 3, 4, 7, 8 και 9 αντιπροσωπεύουν ποσοστά και έχουν μέγιστη τιμή 100 (για παράδειγμα βαθμολογία 80 σημαίνει 80%). Οι τιμές για τα κριτήρια 5 και 6 αντιπροσωπεύουν τις ποσότητες οξειδίων άνθρακα και αζώτου που εκπέμπονται για κάθε παραγόμενη μονάδα ενέργειας, άρα έχουν αρνητική σημασία. Επομένως τα κριτήρια 2, 3, 4, 7 και 8 είναι προτιμότερο να έχουν υψηλές τιμές, ενώ τα κριτήρια 1, 5, 6 και 9 είναι επιθυμητό να έχουν χαμηλές τιμές. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι, εάν ληφθούν υπόψη μόνο το κόστος και η προσφερόμενη ποσότητα, η τέταρτη πηγή ενέργειας κυριαρχεί σε σχέση με τις υπόλοιπες, αλλά αυτό αλλάζει εάν συνυπολογιστούν όλα τα κριτήρια. Για παράδειγμα, η πέμπτη πηγή είναι καλύτερη όσον αφορά τα κριτήρια 5 και 6 που σχετίζονται με τις εκπομπές οξειδίων, αλλά δεν έχει ιδιαίτερα καλή βαθμολογία στα υπόλοιπα κριτήρια. Επομένως προκύπτουν αρκετές ερωτήσεις σχετικά με το ποιες πηγές πρέπει να επιλεγούν και με ποιο τρόπο ώστε να καλύπτεται η ζήτηση, να μην υπερβούν οι εκπομπές οξειδίων συγκεκριμένα όρια, να είναι υψηλή η αξιοπιστία του συστήματος, να ελαχιστοποιείται το κόστος για τον μέσο καταναλωτή κ.ά. Επιπλέον, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να καθορίζεται η εκτιμώμενη σταθερότητα ή ο κίνδυνος, δηλαδή πώς θα επηρεαζόταν η απόφαση για τις ενεργειακές πηγές εάν μεταβληθούν οι τιμές του Πίνακα 2-1 ή κάποιες παράμετροι του προβλήματος.

Θεωρούμε ότι η απόφαση σχετικά με την ενεργειακή πηγή R1 εκφράζεται μέσω μιας μεταβλητή w_1 , όπου η επιλογή της αντιστοιχεί στην τιμή $w_1 = 1$, ενώ η μη επιλογή της στην τιμή $w_1 = 0$. Ομοίως, η επιλογή μιας ενεργειακής πηγής R_i αντιστοιχεί στην τιμή $w_i = 1$ και η μη επιλογή της στην τιμή $w_i = 0$. Με αυτόν τον τρόπο, η τελική απόφαση καταλήγει να είναι ένα διάνυσμα $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8)$ του οποίου τα στοιχεία w_i είναι δυαδικές μεταβλητές, άρα παίρνουν τις τιμές 0 ή 1. Κάθε ενεργειακή πηγή αξιολογείται με βάση τα κριτήρια Cr_j , όπου $j \in R$. Με βάση αυτά τα κριτήρια προκύπτουν τα κόστη J_j . Το J_2 είναι η συνολική ποσότητα που γίνεται διαθέσιμη βάσει μιας απόφασης και μαθηματικά αντιστοιχεί στο άθροισμα των γινομένων των ποσοτήτων από τις διάφορες ενεργειακές πηγές επί τις αντίστοιχες μεταβλητές w_i . Ομοίως ορίζονται και τα κόστη J_7 και J_8 . Τα κόστη J_1, J_5 και J_6 βασίζονται σε μοναδιαίες τιμές, επομένως εξαρτώνται και από τις αντίστοιχες ποσότητες για κάθε ενεργειακή πηγή. Μαθηματικά εκφράζονται ως το άθροισμα των γινομένων των μοναδιαίων τιμών επί τις αντίστοιχες ποσότητες επί τις αντίστοιχες μεταβλητές w_i . Τα κόστη J_3, J_4 και J_9 εκφράζονται ως κλάσματα, καθώς αναπαριστούν σταθμισμένους μέσους όρους της βαθμολογίας των πηγών που θα επιλεγούν ως προς τα αντίστοιχα κριτήρια.

Πιο αναλυτικά, με βάση ένα συγκεκριμένο διάνυσμα \mathbf{w} , η διαθέσιμη ενέργεια που θα προκύψει τελικά δίνεται από τον τύπο:

$$J_2(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{2,i} w_i \quad (1)$$

$$J_2(\mathbf{w}) = 115w_1 + 80w_2 + 90w_3 + 150w_4 + 20w_5 + 15w_6 + 110w_7 + 80w_8 \quad (2)$$

Το οικονομικό κόστος προκύπτει από την τιμή και την αντίστοιχη ποσότητα:

$$J_1(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{1,i} \alpha_{2,i} w_i \quad (3)$$

$$J_1(\mathbf{w}) = 2 * 115w_1 + 2,1 * 80w_2 + 2,4 * 90w_3 + 1,9 * 150w_4 + 3 * 20w_5 + 3,2 * 15w_6 + 2,2 * 110w_7 + 2,4 * 80w_8 \quad (4)$$

Η συνολική αξιοπιστία της απόφασης είναι η συνολική αξιοπιστία προς την διαθέσιμη ποσότητα, δηλαδή:

$$J_3(\mathbf{w}) = \frac{\sum_{i=1}^8 \alpha_{3,i} \alpha_{2,i} w_i}{\sum_{i=1}^8 \alpha_{2,i} w_i} \quad (5)$$

Ομοίως, η συνολική ευελιξία εκφράζεται ως:

$$J_4(\mathbf{w}) = \frac{\sum_{i=1}^8 \alpha_{4,i} \alpha_{2,i} w_i}{\sum_{i=1}^8 \alpha_{2,i} w_i} \quad (6)$$

Προκειμένου να ορίζονται τα κόστη J_3 και J_4 πρέπει να επιλεγεί τουλάχιστον μια ενεργειακή πηγή, διαφορετικά το πρόβλημα δεν μπορεί να λυθεί. Οι συνολικές

εκπομπές οξειδίων του άνθρακα, δεδομένου ότι οι τιμές του Πίνακα 2-1 εκφράζουν τόνους CO_x ανά μονάδα ενέργειας, δίνονται από τη σχέση:

$$J_5(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{5,i} \alpha_{2,i} w_i \quad (7)$$

Ομοίως, οι συνολικές εκπομπές οξειδίων του θείου δίνονται από τη σχέση:

$$J_6(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{6,i} \alpha_{2,i} w_i \quad (8)$$

Τα στρατηγικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά μιας απόφασης προκύπτουν από το σύνολο των χαρακτηριστικών των ενεργειακών πηγών που θα επιλεγούν, ενώ ο μέσος όρος του βαθμού κορεσμού των επιλεχθέντων ενεργειακών πηγών αντιπροσωπεύει το βαθμό κορεσμού της τελικής απόφασης. Επομένως τα αντίστοιχα κόστη είναι:

$$J_7(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{7,i} w_i \quad (9)$$

$$J_8(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{8,i} w_i \quad (10)$$

$$J_9(\mathbf{w}) = \frac{\sum_{i=1}^8 \alpha_{9,i} w_i}{\sum_{i=1}^8 w_i} \quad (11)$$

Είναι εύλογο ότι τα κόστη J_1, J_5, J_6 και J_9 πρέπει να ελαχιστοποιηθούν, άρα είναι πιθανόν να υπάρχει και ένα ανώτατο ανεκτό όριο για αυτά, ενώ τα κόστη J_2, J_3, J_4, J_7 και J_8 πρέπει να μεγιστοποιηθούν, άρα μπορούν να θεωρηθούν ως κέρδη και να υπάρξει ένα κατώτατο ανεκτό όριο για αυτά.

2.1.2 Ενσωμάτωση πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, κάποια από τα κόστη J_j πρέπει να πάρουν μεγάλες τιμές και ταυτόχρονα κάποια άλλα να πάρουν μικρές τιμές. Μεγάλες ή μικρές τιμές για τη συνάρτηση $J_j(\mathbf{w})$ σημαίνει πως πρέπει η τιμή της να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από μια δοσμένη τιμή J_j^* , επομένως θα πρέπει $J_j(\mathbf{w}) \geq J_j^*$ ή $J_j(\mathbf{w}) \leq J_j^*$ αντίστοιχα. Για να επιλέξει λοιπόν τις κατάλληλες ενεργειακές πηγές, η Επιβλέπουσα Αρχή δύναται να ορίσει συγκεκριμένα όρια, δηλαδή τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές που επιθυμεί για οποιοδήποτε κόστος J_j . Αυτή η διατύπωση οδηγεί στο πρόβλημα της ικανοποιησιμότητας (satisfiability problem), δηλαδή στην εύρεση όλων των $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8)$, όπου $w_i = 0$ ή 1 , τα οποία ικανοποιούν τους περιορισμούς: $J_j(\mathbf{w}) \geq J_j^*$, για κάποια $j \in \{2,3,4,7,8\}$ ή/και $J_j(\mathbf{w}) \leq J_j^*$, για κάποια $j \in \{1,5,6,9\}$. Σε αυτή την περίπτωση οι τιμές J_j^* είναι

γνωστές. Τέτοιου είδους προβλήματα ενδεχομένως να έχουν πολλές λύσεις καθώς μεταβάλλοντας τις τιμές J_j^* προκύπτουν διαφορετικές λύσεις.

Η απαίτηση για μεγάλες ή μικρές τιμές σε κάποιο κόστος οδηγεί επίσης σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης ή αντίστοιχα ελαχιστοποίησης. Για παράδειγμα:

$$\max_{\mathbf{w}} J_3(\mathbf{w})$$

με τους περιορισμούς:

$$J_j(\mathbf{w}) \geq J_j^* \text{ ή/και } J_j(\mathbf{w}) \leq J_j^*, \text{ για κάποια } j \in [1,9]$$

Το παραπάνω πρόβλημα στοχεύει στη μεγιστοποίηση ενός κόστους υπό τον περιορισμό ότι κάποια από τα κόστη θα βρίσκονται εντός συγκεκριμένων αποδεκτών ορίων. Στους περιορισμούς του προβλήματος δεν είναι απαραίτητο να περιλαμβάνονται όλα τα διαθέσιμα κόστη και κριτήρια αξιολόγησης, ωστόσο σε ένα κόστος J_j μπορεί να τεθεί άνω και κάτω όριο. Επίσης, δεδομένου ότι τα κριτήρια αξιολόγησης και τα αντίστοιχα κόστη στην περίπτωση που εξετάζεται είναι εννέα, είναι πιθανό να πρέπει να βελτιστοποιηθούν περισσότερα από ένα κόστη ταυτόχρονα. Για παράδειγμα: $\min_{\mathbf{w}} \{-J_2(\mathbf{w}), J_5(\mathbf{w}), J_6(\mathbf{w})\}$, όπου $J_j(\mathbf{w}) \geq J_j^*$, $j = 3,4,7,8$

Η επιλογή του κατάλληλου πρόσημου για κάθε κόστος J_j που πρέπει να βελτιστοποιηθεί εξαρτάται από την έννοια που έχει και αν αυτό χρησιμοποιείται σε πρόβλημα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης. Στην περίπτωση που εξετάζεται αναζητούνται οι λύσεις κατά Pareto οι οποίες μπορούν να βρεθούν ενσωματώνοντας τα κόστη που πρέπει να βελτιστοποιηθούν σε μια συνάρτηση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος στάθμισης (weighting method), η οποία ανήκει στον μαθηματικό προγραμματισμό πολλαπλών στόχων (multi-objective mathematical programming ή MMP). Με βάση αυτή τη μέθοδο το προηγούμενο παράδειγμα γίνεται: $\min_{\mathbf{w}} \{b_1(-J_2(\mathbf{w})) + b_2 J_5(\mathbf{w}) + b_3 J_6(\mathbf{w})\}$, όπου $J_j(\mathbf{w}) \geq J_j^*$, $j = 3,4,7,8$.

Οι συντελεστές βαρύτητας b_1, b_2 και b_3 είναι θετικοί και για κάθε διάνυσμα (b_1, b_2, b_3) υπάρχει μια αποτελεσματική λύση Pareto. Οι συντελεστές βαρύτητας είναι ένα μέτρο της σημαντικότητας κάθε κόστους και κατά συνέπεια κάθε κριτηρίου, επομένως συγκρίνοντας τη σημαντικότητα των κριτηρίων μπορούν να τους δοθούν οποιεσδήποτε θετικές τιμές. Για να γίνονται ωστόσο πιο εύκολα κατανοητές οι τιμές, μπορούν να αναδιατυπωθούν και να αθροίζονται στη μονάδα ώστε να αντιπροσωπεύουν ποσοστά σημαντικότητας.

Η Εποπεύουσα Αρχή μπορεί να αναπροσαρμόζει τα κριτήρια επιλογής της αναλόγως της πολιτικής που θέλει να ακολουθήσει σε κάθε χρονική περίοδο. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η πολιτική μπορεί να αφορά είτε τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση κάποιου κόστους J_j , γραμμικού ή μη, είτε την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση ενός συνδυασμού από κόστη, ακόμα και όλων. Επομένως, μπορεί να υπάρχει μια ποικιλία από κόστη τόσο στην αντικειμενική συνάρτηση όσο και στους περιορισμούς του προβλήματος. Η πιο γενική είναι η περίπτωση όπου όλα τα κριτήρια και τα αντίστοιχα κόστη περιλαμβάνονται στο πρόβλημα, δηλαδή:

$$\max_{\mathbf{w}} \begin{pmatrix} -b_1 J_1(\mathbf{w}) + b_2 J_2(\mathbf{w}) + b_3 J_3(\mathbf{w}) + b_4 J_4(\mathbf{w}) - b_5 J_5(\mathbf{w}) \\ -b_6 J_6(\mathbf{w}) + b_7 J_7(\mathbf{w}) + b_8 J_8(\mathbf{w}) - b_9 J_9(\mathbf{w}) \end{pmatrix} \quad (12)$$

με τους περιορισμούς:

$$J_j(\mathbf{w}) \geq J_j^* \text{ ή } J_j(\mathbf{w}) \leq J_j^*, j \in [1,9] \quad (13)$$

$$\mathbf{b} \geq 0 \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^9 b_j = 1 \quad (15)$$

Εάν κάποιο κόστος δεν ενδιαφέρει την Εποπτεύουσα Αρχή, μπορεί να απαλειφθεί εάν έχει μηδενικό συντελεστή βαρύτητας. Για διαφορετικά διανύσματα $\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9)$ προκύπτουν διαφορετικές λύσεις Pareto. Άρα το διάνυσμα \mathbf{b} των συντελεστών βαρύτητας καθορίζει την ενεργειακή πολιτική σύμφωνα με τις προτιμήσεις της Εποπτεύουσας Αρχής.

Τα προβλήματα που αναφέρθηκαν είναι τα τρία είδη προβλημάτων που θα επιλυθούν στη συνέχεια. Λύνοντάς τα μπορούν να βρεθούν όλες οι λύσεις που ικανοποιούν τους ζητούμενους περιορισμούς και στη συνέχεια, αναλόγως της ακολουθούμενης ενεργειακής πολιτικής, μπορεί να βρεθεί ή βέλτιστη από αυτές τις λύσεις ή να επιλεγεί κάποια άλλη.

Όπως αναφέρθηκε, η λύση του κάθε προβλήματος εκφράζεται ως ένα διάνυσμα $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8)$ όπου οι μεταβλητές w_i είναι δυαδικές, επομένως πρόκειται για προβλήματα δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού (binary integer programming) [1,2]. Στην πραγματικότητα, οι επιλογές σε μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά πιο περίπλοκες καθώς ο ενεργειακός σχεδιασμός που στοχεύει στο βέλτιστο μίγμα ενεργειακών επενδύσεων και στο βέλτιστο σχήμα επιδοτήσεων δεν συνεπάγεται απαραίτητα δυαδικές επιλογές. Για να διατυπωθούν λοιπόν πιο γενικές και ρεαλιστικές περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον δυαδικές μεταβλητές, οι οποίες θα οδηγήσουν τελικά στην ίδια μορφή του προβλήματος. Εάν δηλαδή μια πηγή ενέργειας μπορεί να επιδοτηθεί για συγκεκριμένες ποσοστιαίες κλίμακες, η αντίστοιχη διακριτή μεταβλητή w_i που αντιστοιχεί σε αυτήν μπορεί να εκφραστεί από ένα σύνολο δυαδικών μεταβλητών. Για παράδειγμα, εάν η πηγή R_i μπορεί να επιδοτηθεί τμηματικά ανά 25% της εγκατεστημένης δυναμικότητάς της, τότε $w_i = (0,25x_1 + 0,5x_2 + 0,75x_3)$, όπου οι x_1, x_2 και x_3 είναι δυαδικές μεταβλητές.

Επιπλέον, οποιαδήποτε διακριτή μεταβλητή που παίρνει θετικές ακέραιες τιμές μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί από δυαδικές μεταβλητές χρησιμοποιώντας τις δυνάμεις του δύο. Τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται εάν, αυξάνοντας την κλίμακα του προβλήματος, μια ενεργειακή πηγή στις μεταβλητές απόφασης αντιπροσωπεύει

ένα ομαδοποιημένο σύνολο παρόμοιων επιλογών, από τις οποίες μπορεί τελικά να επιλεγεί οποιοσδήποτε αριθμός. Για παράδειγμα, οι ακέραιοι έως τον αριθμό 63 μπορούν να εκφραστούν με έξι δυαδικές μεταβλητές ως $I = x_1 + 2x_2 + 4x_3 + 8x_4 + 16x_5 + 32x_6$, όπου I οποιοσδήποτε ακέραιος στο διάστημα $[0,63]$ και x_i δυαδικές μεταβλητές με $i = 1, \dots, 6$. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι μπορούν να διαχειριστούν ακέραιες τιμές στα πλαίσια προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού χωρίς να χρειάζεται μετασχηματισμός, ωστόσο ο μετασχηματισμός με τη βοήθεια δυαδικών μεταβλητών είναι σημαντικός για τη γραμμικοποίηση αντικειμενικών συναρτήσεων και περιορισμών όταν αυτοί δεν είναι μη γραμμικοί.

Αφού η Εποπεύουσα Αρχή έχει καταλήξει στο ακριβές πρόβλημα το οποίο καλείται να διαχειριστεί, οποιοδήποτε πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού μπορεί να μετασχηματιστεί σε πρόβλημα δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού ώστε να επιλυθεί πιο εύκολα. Σε κάθε περίπτωση, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των λύσεων και οι εφικτές ακέραιες τιμές, τόσο πιο περίπλοκο γίνεται το πρόβλημα και αυξάνεται ο χρόνος της επίλυσής του. Επίσης ενδεχομένως να προκύψουν γινόμενα δυαδικών μεταβλητών, τα οποία όμως μπορούν επίσης να αντικατασταθούν από απλές δυαδικές μεταβλητές.

2.1.3 Αξιολόγηση των λύσεων

Εκτός από το πρόβλημα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης ενός κόστους, το οποίο συνήθως έχει μία μοναδική λύση, τα άλλα προβλήματα που περιγράφηκαν μπορεί να έχουν πολλαπλές λύσεις, επομένως είναι απαραίτητη μια μεθοδολογία που θα βοηθήσει στην επιλογή μιας από αυτές. Σε περίπτωση ενσωμάτωσης πολλών κριτηρίων στην αντικειμενική συνάρτηση οι λύσεις εξαρτώνται από τους συντελεστές βαρύτητας b_j , δηλαδή από το ποιος θα αποφασίσει ή πώς θα επιλεγούν τελικά αυτοί οι συντελεστές. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να οριστούν και να υπολογιστούν οι συντελεστές βαρύτητας ή για να επιλεγεί μία ανάμεσα σε πολλές εφικτές λύσεις, οι οποίοι προέρχονται από τη θεωρία διαπραγματεύσεων, τη θεωρία παιγνίων και τα πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (multi-criteria decision-making – MCDM). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η απόφαση αυτή θα ληφθεί τελικά από την Εποπεύουσα Αρχή.

Ένα πολύ σημαντικό ερώτημα σχετικά με οποιαδήποτε προτεινόμενη λύση είναι εάν η λύση αυτή αλλάζει σε περίπτωση που μεταβληθούν πολύ ή λίγο κάποιες από τις μεταβλητές του προβλήματος. Είναι δεδομένο εξάλλου ότι η βαθμολογία των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών μπορεί κάποιες φορές να είναι υποκειμενική ή να υπόκειται σε σφάλματα. Επομένως, εάν προτείνεται μια απόφαση η οποία όμως θα αλλάξει δραστικά εάν μεταβληθούν κάποιες μεταβλητές, η εν λόγω απόφαση δεν μπορεί να θεωρείται αξιόπιστη. Από την άλλη μεριά, μια τέτοια αλλαγή της λύσης είναι ενδεικτική της σημασίας που έχει για το πρόβλημα η μεταβολή της παραμέτρου που την προκάλεσε. Είναι επομένως απαραίτητο και στις δυο περιπτώσεις να μελετηθούν οι παράμετροι του προβλήματος και ο βαθμός μεταβολής τους που δύναται να επηρεάσει την προτεινόμενη λύση του προβλήματος. Ένας επιπλέον λόγος

για τη μελέτη αυτού του φαινομένου έγκειται στη πιθανότητα κάποιος από τους παραγωγούς ενέργειας ή τους συμμετέχοντες να μπορεί να επηρεάσει με τις πράξεις του τις αποφάσεις που λαμβάνονται χωρίς να γίνεται άμεσα αντιληπτός. Η πιθανότητα λοιπόν να εμφανιστούν στρατηγικές συμπεριφορές από τους συμμετέχοντες πρέπει να μελετηθεί. Για τους παραπάνω λόγους πρέπει να εξεταστεί η ευαισθησία των λύσεων του προβλήματος.

2.2 Μέθοδοι επίλυσης

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές μεθοδολογίες που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν. Περιγράφονται συνοπτικά οι θεωρητικοί αλγόριθμοι με τις επεκτάσεις που προστέθηκαν και παρέχονται οι αντίστοιχες επιστημονικές πηγές.

2.2.1 Πρόβλημα ικανοποιησιμότητας

Αρχικά αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της ικανοποιησιμότητας, το οποίο αναφέρεται στην εύρεση όλων των εφικτών λύσεων του προβλήματος. Επομένως εξετάζονται όλες οι πιθανές αποφάσεις που ικανοποιούν τα όρια που έχουν δοθεί για τα κριτήρια.

Για να υπολογιστούν όλες οι εφικτές λύσεις απαιτείται πλήρης απαρίθμηση όλων των δυνατών συνδυασμών λύσεων. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι ιδιαίτερος απαιτητική όσον αφορά τους απαραίτητους υπολογιστικούς πόρους [3], αλλά σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν μόνο οκτώ ενεργειακές πηγές και εννέα κριτήρια αξιολόγησης, οπότε το πρόβλημα επιλύεται σε ελάχιστο χρόνο (σε λίγα κλάσματα του δευτερολέπτου). Εάν οι επιλογές αυξηθούν, ο συνολικός χώρος των λύσεων καθώς και οι απαιτήσεις του προβλήματος θα αυξηθούν αντίστοιχα. Προκειμένου να περιοριστούν οι απαιτούμενοι πόροι και να μελετηθούν μόνο οι καλύτερες λύσεις, στην περίπτωση προβλημάτων μεγάλης κλίμακας μπορούν να γίνουν τροποποιήσεις στο αρχικό πρόβλημα ικανοποιησιμότητας, όπως ο περιορισμός του χώρου λύσεων μέσω της αλλαγής των περιορισμών ή η αναζήτηση μόνο των εφικτών λύσεων οι οποίες βρίσκονται κοντά σε κάποια επιλεγμένη ή σε κάποια άλλη ικανοποιητική λύση. Για παράδειγμα, μπορούν να αναζητηθούν οι εφικτές λύσεις για τις οποίες προκύπτει απόκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης έως 10% σε σχέση με μια λύση που έχει ήδη προταθεί. Σε κάθε περίπτωση, το πρόβλημα της ικανοποιησιμότητας είναι πολύ σημαντικό επειδή θα μπορούσε να παρέχει στην Εποπτεύουσα Αρχή μια πρώτη ένδειξη για τις διαθέσιμες λύσεις και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ώστε να επιλεγεί τελικά μια λύση από το σύνολο που θα προκύψει χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε μεθοδολογία κρίνει η Εποπτεύουσα Αρχή ως κατάλληλη.

2.2.2 Πρόβλημα γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πρόβλημα εύρεσης της λύσης που ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί ένα συγκεκριμένο κόστος J_j . Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα πρόβλημα δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού, στο οποίο η αντικειμενική είναι γραμμική και υπόκειται σε ένα σύνολο γραμμικών περιορισμών. Η περίπτωση μη γραμμικής αντικειμενικής συναρτήσεων θα αναλυθεί στην επόμενη υποενότητα, καθώς στο συγκεκριμένο πρόβλημα όλα τα κόστη είναι γραμμικά εκτός από τα J_3, J_4 και J_9 .

Οι αλγόριθμοι που μπορούν να επιλύσουν αποδοτικά τα προβλήματα μεγάλης κλίμακας και μεικτού ακέραιου προγραμματισμού, όπως αυτά που εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, χρησιμοποιούν την προσέγγιση Διακλάδωσης και Οριοθέτησης [1]. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές οριοθέτησης και μετασχηματισμού σε αυτές τις περιπτώσεις, οι οποίες ωστόσο πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή ώστε να μην επηρεαστεί η ποιότητα των λύσεων. Το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι:

$$\min_{\mathbf{w}} f^T \mathbf{w} \text{ ή } \max_{\mathbf{w}} f^T \mathbf{w} \quad (16)$$

με τους περιορισμούς:

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{w} \leq \mathbf{c}_1 \quad (17)$$

$$\mathbf{A}_2 \mathbf{w} \geq \mathbf{c}_2 \quad (18)$$

όπου τα $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2$ είναι διανύσματα σταθερών όρων και \mathbf{w} είναι διάνυσμα δυαδικών μεταβλητών όπως έχει ήδη οριστεί. Οι μη γραμμικοί περιορισμοί της μορφής $\frac{\sum_i a_i w_i}{\sum_i d_i w_i} \leq c$ είναι ισοδύναμοι με τους γραμμικούς περιορισμούς $\sum_i (a_i - cd_i) w_i \leq 0$, αφού οι παρονομαστές των κλασμάτων στην περίπτωση που εξετάζεται είναι πάντα θετικοί. Οι ίδιοι μετασχηματισμοί ισχύουν αντίστοιχα για τους μη γραμμικούς περιορισμούς της μορφής $\frac{\sum_i a_i w_i}{\sum_i d_i w_i} \geq c$.

2.2.3 Πρόβλημα κλασματικού ακέραιου προγραμματισμού

Στην περίπτωση μη γραμμικών αντικειμενικών συναρτήσεων απαιτούνται πιο περίπλοκοι αλγόριθμοι, οι οποίοι πρέπει να επιλεγθούν προσεκτικά ώστε να είναι αποδοτικοί και να συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση. Ωστόσο, οι μη γραμμικές συναρτήσεις στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι οποίες προκύπτουν από τα κριτήρια Cr3, Cr4 και Cr9, μπορούν εύκολα να μετασχηματιστούν χρησιμοποιώντας τεχνικές κλασματικού προγραμματισμού, καθώς πρόκειται για πηλικά γραμμικών συναρτήσεων [4,5,6,7].

Ο μετασχηματισμός αυτών των κλασμάτων όταν αποτελούν περιορισμούς του προβλήματος έχει ήδη παρουσιαστεί στην προηγούμενη υποενότητα. Όταν όμως

βρίσκονται στην αντικειμενική συνάρτηση, ο μετασχηματισμός είναι πιο περίπλοκος. Σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα στη γενική του μορφή γίνεται:

$$\min \frac{p_i + \sum_j p_{ij}x_j}{q_i + \sum_j q_{ij}x_j} \quad (19)$$

με τους περιορισμούς:

$$q_i + \sum_j q_{ij}x_j > 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (20)$$

$$r_k + \sum_j r_{kj}x_j \leq 0 \quad k = 1, \dots, h \quad (21)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad j = 1, \dots, n \quad (22)$$

Αντικαθιστώντας το $1/q_i + \sum_j q_{ij}x_j$ με y_i το πρόβλημα γίνεται:

$$\min \sum_i \left(p_i y_i + \sum_j p_{ij} y_i x_j \right) \quad (23)$$

με τους περιορισμούς:

$$q_i y_i + \sum_j q_{ij} y_i x_j = 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (24)$$

$$r_k + \sum_j r_{kj} x_j \leq 0 \quad k = 1, \dots, h \quad (25)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad y_i \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (26)$$

Στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός $z = xy$ προσθέτοντας τέσσερις επιπλέον γραμμικές ανισότητες:

$$y - z \leq K - Kx \quad (27)$$

$$z \leq y \quad (28)$$

$$z \leq Kx \quad (29)$$

$$z \geq 0 \quad (30)$$

όπου $K > y$ και x είναι δυαδική μεταβλητή. Τελικά προκύπτει ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (mixed-integer programming – MIP) το οποίο είναι πιο εύκολο να επιλυθεί.

Οι ίδιοι αλγόριθμοι προβλημάτων μεικτού ακέραιου προγραμματισμού θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και εάν κάποιες από τις μεταβλητές απόφασης σχετικά με τις ενεργειακές πηγές ήταν δυαδικές, αλλά κάποιες άλλες ήταν γραμμικές συναρτήσεις, όπως για παράδειγμα εάν κάποιες επιλογές είναι τμηματικές όπως περιεγράφηκε στην υποενότητα 2.1.2. Σε αυτή την περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μετασχηματισμοί διακριτών ακέραιων μεταβλητών που επίσης παρουσιάστηκαν στην ίδια υποενότητα. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε είναι πως οποιαδήποτε αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από κλάσματα γραμμικών όρων μπορεί να γραμμικοποιηθεί προσθέτοντας περισσότερους περιορισμούς.

2.2.4 Πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού πολλαπλών στόχων

Στην πιο γενική περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από περισσότερα του ενός κόστη, ακόμα και από όλα όσα αναφέρθηκαν. Η πολυκριτηριακή ανάλυση, στο πλαίσιο συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων στις αγορές ενέργειας και ειδικά στην εκκαθάριση της αγοράς, έχει συγκεντρώσει προσοχή τα τελευταία έτη καθώς τα δίκτυα έχουν επεκταθεί, η παραγωγή ενέργειας έχει αυξηθεί και οι νέες τεχνολογίες πρέπει να αξιολογηθούν.

Ο μαθηματικός προγραμματισμός πολλαπλών στόχων ο οποίος αναπτύχθηκε είναι μια προέκταση της κλασικής θεωρίας μαθηματικού προγραμματισμού. Σε αυτήν την περίπτωση το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι:

$$\text{Max ή Min } \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}, x \in S$$

όπου x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, οι συναρτήσεις f_1, f_2, \dots, f_n είναι οι αντικειμενικές συναρτήσεις, είτε γραμμικές είτε μη γραμμικές, οι οποίες πρέπει να βελτιστοποιηθούν και S είναι το σύνολο των εφικτών λύσεων.

Όταν πρέπει να βελτιστοποιηθούν πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις ταυτόχρονα, δεν υπάρχει μία βέλτιστη λύση με τη συνήθη έννοια καθώς πολλές από αυτές τις συναρτήσεις είναι αντικρουόμενες μεταξύ τους. Επομένως, στόχος είναι να βρεθεί ένα σύνολο λύσεων που να περιλαμβάνει όλες εκείνες τις λύσεις που δεν είναι κυριαρχούμενες από άλλες, δηλαδή όλες τις λύσεις που δεν είναι χειρότερες από άλλες σε όλα τα εξεταζόμενα κριτήρια. Αυτές οι λύσεις ονομάζονται λύσεις Pareto. Ο μαθηματικός προγραμματισμός πολλαπλών στόχων ανήκει στο πλαίσιο των πολυκριτηριακών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο αποτελεί τη βάση επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων και περιλαμβάνει διάφορες μεθοδολογίες [8,9]. Αυτό το πλαίσιο επιτρέπει την ενεργή συμμετοχή του αποφασίζοντα στη διαδικασία λήψης της απόφασης και την επίλυση σύνθετων ρεαλιστικών προβλημάτων.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού πολλαπλών στόχων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη χρονική στιγμή που εκφράζονται οι προτιμήσεις του αποφασίζοντα [10]. Αυτές οι τρεις κατηγορίες είναι η «εκ των προτέρων», η διαδραστική και η «εκ των υστέρων». Η μέθοδος με τους συντελεστές βαρύτητας που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους «εκ των υστέρων», δηλαδή πρώτα προκύπτουν οι βέλτιστες λύσεις Pareto και έπειτα ο αποφασίζων επιλέγει μία από αυτές. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, τα διάφορα κόστη αθροίζονται και ένας συντελεστής βαρύτητας b_j αποδίδεται στο καθένα, ανάλογα με το πόσο σημαντικό θεωρείται από την Εποπτεύουσα Αρχή που λαμβάνει τις αποφάσεις. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το συνολικό κόστος J της Εποπτεύουσας Αρχής το οποίο πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Με βάση τις υποθέσεις που έχουν γίνει, το J μπορεί να θεωρηθεί ως κέρδος, επομένως στόχος είναι η μεγιστοποίησή του. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να δοθεί προσοχή στο πρόσημο κάθε κόστους στην αντικειμενική συνάρτηση, το οποίο εξαρτάται από το αν πρόκειται για πρόβλημα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης. Οι συντελεστές βαρύτητας κάθε κόστους είναι πολύ σημαντικοί και μπορούν να επηρεάσουν την βέλτιστη λύση καθώς όσο πιο σημαντικό είναι ένα κριτήριο, τόσο ευνοούνται οι ενεργειακές πηγές που έχουν καλή αξιολόγηση σε αυτό, ενώ η βαθμολογία στα κριτήρια που δεν θεωρούνται σημαντικά δεν αναμένεται να επηρεάσει ιδιαίτερα την απόφαση που θα ληφθεί.

Σκοπός είναι η εύρεση της λύσης δεδομένου ότι έχει ήδη διαμορφωθεί το τελικό πρόβλημα που σχετίζεται με τη λήψη της απόφασης. Επομένως γίνεται η υπόθεση ότι έχουν ήδη οριστεί η συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο και αναζητείται η βέλτιστη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον καθορισμό των συντελεστών αυτών, ανάλογα με τους συμμετέχοντες στην αγορά ενέργειας και την επιρροή που έχει ο καθένας τους στην Εποπτεύουσα Αρχή. Εάν η Εποπτεύουσα Αρχή θελήσει να εξετάσει διάφορους συνδυασμούς συντελεστών βαρύτητας, οι βέλτιστες λύσεις που θα προκύψουν για κάθε σενάριο οδηγούν στο σύνολο λύσεων Pareto. Από αυτό το σύνολο θα επιλεγεί τελικά μια λύση, όπως ισχύει και στην περίπτωση του προβλήματος ικανοποιησιμότητας, αφού το σύνολο αυτό είναι ουσιαστικά ένα σύνολο των λύσεων που ικανοποιούν κάθε φορά τους περιορισμούς του προβλήματος.

Τα κόστη που έχουν μηδενικό συντελεστή βαρύτητας δεν λαμβάνονται υπόψη στη λήψη της απόφασης. Σε κάθε περίπτωση, έπειτα από τους κατάλληλους μετασχηματισμούς, οι συντελεστές βαρύτητας μπορούν να εκφραστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αθροίζονται στη μονάδα. Αυτό δεν είναι απαραίτητο, αλλά βοηθάει καθώς γίνονται ευκολότερα αντιληπτοί ως ποσοστά σημαντικότητας. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα να αποδοθούν διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας σε κάθε κόστος ανάλογα με την ενεργειακή πηγή που αξιολογείται κάθε φορά, ωστόσο αυτό εγείρει ζητήματα ίσης και δίκαιης αντιμετώπισης κάθε ενεργειακής πηγής.

Το πρόβλημα που εξετάζεται σε αυτή την υποενότητα αποτελεί προέκταση των προβλημάτων που έχουν περιγραφεί στις προηγούμενες. Επομένως εάν όλα τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν στην αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμικά, προκύπτει ένα πρόβλημα δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού σαν αυτό της υποενότητας 2.2.2 Αντίστοιχα αντιμετωπίζονται τυχόν κλασματικοί περιορισμοί, ενώ για κάθε κλάσμα στην αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική γραμμικοποίησης που αναπτύχθηκε στην υποενότητα 2.2.3.

2.3 Αριθμητικά παραδείγματα

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι λύσεις σε ορισμένα σενάρια που χρησιμεύουν ως παραδείγματα, ώστε να εξεταστούν οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων που περιγράφηκαν. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μελέτης περίπτωσης περιλαμβάνονται οκτώ ενεργειακές πηγές και εννέα κριτήρια αξιολόγησης, αλλά αυτό δεν δρα περιοριστικά καθώς είναι εμφανής η επεκτασιμότητα των μεθόδων και των αλγορίθμων και σε προβλήματα μεγαλύτερης κλίμακας.

2.3.1 Παραδείγματα προβλήματος ικανοποιησιμότητας

Όσο πιο αυστηροί οι περιορισμοί που τίθενται στα κόστη, τόσο περιορίζεται το σύνολο των εφικτών λύσεων που τους ικανοποιεί. Εάν το σύνολο αυτό είναι πολύ μικρό, η Εποπεύουσα Αρχή θα μπορούσε να λάβει την απόφασή της ακόμα και χωρίς περαιτέρω υποστήριξη. Επιπλέον, εάν οι περιορισμοί που θα τεθούν υπερβούν κάποια συγκεκριμένα όρια, ενδεχομένως να μην υπάρχουν καν εφικτές λύσεις που να τους ικανοποιούν επομένως το πρόβλημα δεν έχει λύση. Παρακάτω παρατίθενται τρία παραδείγματα τα οποία διαφέρουν μόνο ως προς το κάτω όριο που τίθεται στο δεύτερο κριτήριο, δηλαδή ως προς την δυναμικότητα παραγωγής η οποία πρέπει σε κάθε περίπτωση να καλύπτει τη ζήτηση.

Παράδειγμα 1Α

- Για $J_1 < 10000$, $J_2 > \mathbf{300}$, $J_3 > 30$, $J_4 > 30$, $J_5 < 1000$, $J_6 < 1000$, $J_7 > 50$, $J_8 > 50$, $J_9 < 60$ οι εφικτές λύσεις του προβλήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2: Αποτελέσματα παραδείγματος 1Α

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
0	0	1	1	0	1	0	1	741	335	89,179	72,239	306,50	292,50	300	355	58,75
0	1	0	1	0	0	0	1	645	310	92,581	80,000	294,00	268,00	180	250	60,00
0	1	0	1	0	1	0	1	693	325	91,769	80,000	295,50	275,50	280	335	55,00
0	1	0	1	1	1	0	1	753	345	90,507	80,290	299,50	281,50	380	410	59,00
0	1	1	1	0	1	0	1	909	415	90,301	75,663	394,50	356,50	380	420	60,00
1	0	0	1	0	1	0	1	755	360	93,681	77,778	322,50	326,50	300	340	56,25
1	0	0	1	1	1	0	1	815	380	92,434	78,158	326,50	332,50	400	415	60,00
1	0	1	0	0	1	0	1	686	300	92,917	71,333	271,50	227,50	330	335	60,00
1	1	0	0	1	1	0	1	698	310	94,274	80,323	264,50	216,50	410	390	60,00
1	1	0	1	0	1	0	0	731	360	93,681	82,222	354,50	366,50	350	310	60,00
1	1	0	1	0	1	0	1	923	440	93,920	80,000	410,50	390,50	380	405	58,00

Παράδειγμα 1Β

- Για $J_1 < 10000$, $J_2 > 400$, $J_3 > 30$, $J_4 > 30$, $J_5 < 1000$, $J_6 < 1000$, $J_7 > 50$, $J_8 > 50$, $J_9 < 60$ οι εφικτές λύσεις του προβλήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3: Αποτελέσματα παραδείγματος 1Β

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
0	1	1	1	0	1	0	1	909	415	90,301	75,663	394,50	356,50	380	420	60,00
1	1	0	1	0	1	0	1	923	440	93,920	80,000	410,50	390,50	380	405	58,00

Παράδειγμα 1Γ

- Για $J_1 < 10000$, $J_2 > 500$, $J_3 > 30$, $J_4 > 30$, $J_5 < 1000$, $J_6 < 1000$, $J_7 > 50$, $J_8 > 50$, $J_9 < 60$ δεν υπάρχουν εφικτές λύσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να προκύψει και από τα προηγούμενα παραδείγματα, καθώς η μέγιστη τιμή για το κόστος J_2 στο σύνολο των εφικτών λύσεων είναι 440. Επομένως, αυτή είναι η μέγιστη τιμή για το J_2 εάν παραμείνουν ίδια τα όρια που τίθενται στα υπόλοιπα κόστη.

Ανάλογα με τους εκάστοτε περιορισμούς που θα επιβληθούν, μπορεί να παρατηρηθεί ότι κάποιες από τις ενεργειακές πηγές προκρίνονται για επιλογή περισσότερες φορές από άλλες. Κάποιες από αυτές ενδεχομένως να προτείνονται σε κάθε σενάριο, ενώ άλλες σε κανένα, όπως συμβαίνει με την πηγή R7 στα συγκεκριμένα παραδείγματα. Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό της σταθερότητας και της ευρωστίας των προτεινόμενων λύσεων καθώς και της ευαισθησίας τους σε πιθανές μεταβολές των περιορισμών. Το θέμα αυτό θα αναλυθεί περισσότερο στην επόμενη ενότητα.

Οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω παραδείγματα θα ήταν ακόμα πιο εμφανείς εάν το σύνολο των εφικτών λύσεων ταξινομούταν ανάλογα με το κριτήριο που ενδιαφέρει περισσότερο την Εποπτεύουσα Αρχή. Για παράδειγμα, εάν οι λύσεις του Πίνακα 2-2 ταξινομηθούν σε φθίνουσα σειρά ως προς το κόστος J_2 , προκύπτει ο Πίνακας 2-4.

Πίνακας 2-4: Αποτελέσματα παραδείγματος 1Α ταξινομημένα ως προς το J_2

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
1	1	0	1	0	1	0	1	923	440	93,920	80,000	410,50	390,50	380	405	58,00
0	1	1	1	0	1	0	1	909	415	90,301	75,663	394,50	356,50	380	420	60,00
1	0	0	1	1	1	0	1	815	380	92,434	78,158	326,50	332,50	400	415	60,00
1	0	0	1	0	1	0	1	755	360	93,681	77,778	322,50	326,50	300	340	56,25
1	1	0	1	0	1	0	0	731	360	93,681	82,222	354,50	366,50	350	310	60,00
0	1	0	1	1	1	0	1	753	345	90,507	80,290	299,50	281,50	380	410	59,00
0	0	1	1	0	1	0	1	741	335	89,179	72,239	306,50	292,50	300	355	58,75
0	1	0	1	0	1	0	1	693	325	91,769	80,000	295,50	275,50	280	335	55,00
0	1	0	1	0	0	0	1	645	310	92,581	80,000	294,00	268,00	180	250	60,00
1	1	0	0	1	1	0	1	698	310	94,274	80,323	264,50	216,50	410	390	60,00
1	0	1	0	0	1	0	1	686	300	92,917	71,333	271,50	227,50	330	335	60,00

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι στις λύσεις που εμφανίζουν υψηλές τιμές για το κόστος J_2 , οι ενεργειακές πηγές R4 και R6 προτείνονται τις περισσότερες φορές, σε αντίθεση με τις πηγές R3 και R5, ενώ η πηγή R7 δεν προτείνεται σε καμία περίπτωση. Από τα αποτελέσματα που παρατίθενται συνεπάγεται ότι η επιλογή των ενεργειακών πηγών R4, R6, R7 και R8 είναι πιο σταθερή σε σχέση με την επιλογή των πηγών R3 και R5, ενώ οι πηγές R1 και R2 δεν παρουσιάζουν κάποιο ιδιαίτερο μοτίβο επιλογής.

Παρόμοιες παρατηρήσεις για την σταθερότητα των επιλογών της Εποπτεύουσας Αρχής μπορούν να γίνουν για οποιαδήποτε σενάριο και ταξινόμηση επιλέξει η ίδια. Για παράδειγμα, εάν η Εποπτεύουσα Αρχή επιθυμεί να ακολουθήσει μια περιβαλλοντικά φιλική πολιτική, μπορεί να θέσει τους περιορισμούς στο πρόβλημα και να ταξινομήσει τις όποιες εφικτές λύσεις προκύψουν ως προς το άθροισμα των J_5 και J_6 , τα οποία αντιπροσωπεύουν εκπομπές αερίων.

Επειδή όλοι οι παραγωγοί ενέργειας αλληλεπιδρούν στα πλαίσια της αγοράς, οι στρατηγικές και οι επενδύσεις τους επηρεάζονται από τις αποφάσεις της Εποπτεύουσας Αρχής και των υπόλοιπων παραγωγών. Κάθε ένας από αυτούς τους παραγωγούς επιθυμεί να μεγιστοποιήσει τα κέρδη του, επομένως οι αποφάσεις και οι αντιδράσεις του στις ενέργειες των υπολοίπων, όπως και τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην αγορά, θα μεταβάλλονται συνέχεια έως ότου επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ όλων των συμμετεχόντων. Για κάθε πολιτική που επιθυμεί να ακολουθήσει η Εποπτεύουσα Αρχή η αγορά θα οδηγείται σε διαφορετικό σημείο ισορροπίας καθώς οι διάφοροι παραγωγοί αλληλεπιδρούν και ανταγωνίζονται κάθε φορά βάσει αυτής της συγκεκριμένης ενεργειακής πολιτικής. Επομένως, η μεθοδολογία που θα

ακολουθηθεί προκειμένου η Εποπτεύουσα Αρχή να καταλήξει στις πηγές ενέργειας που θα προκρίνει είναι ιδιαιτέρως απαιτητική, καθώς προϋποθέτει την επιλογή της κατάλληλης ενεργειακής πολιτικής και μελέτες βασισμένες στη θεωρία παιγνίων σχετικά με το πώς αυτή θα επηρεάσει τελικά την αγορά ενέργειας.

2.3.2 Παραδείγματα προβλημάτων γραμμικού και κλασματικού ακέραιου προγραμματισμού

Αυτή είναι η απλούστερη μορφή των προβλημάτων βελτιστοποίησης που μελετώνται. Προκειμένου να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος επίλυσης, αρκούν η τελική γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και οι γραμμικοί περιορισμοί που εξαρτώνται από δυαδικές μεταβλητές. Όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης σε αυτή καθώς και τις επόμενες υποενότητες επιλύονται χρησιμοποιώντας το λογισμικό GAMS. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται επιτρέπει και την αναζήτηση λύσεων που να προσεγγίζουν τη βέλτιστη, ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα εκτέλεσης [11]. Τα παραδείγματα που επιλύονται στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου δεν είναι μεγάλης κλίμακας, επομένως αναζητούμε σε κάθε περίπτωση τη βέλτιστη λύση.

Παράδειγμα 2

Στον Πίνακα 2-5 παρουσιάζονται σενάρια στα οποία βελτιστοποιείται κάθε φορά ένα από τα κόστη J_1 , J_2 και J_3 , το οποίο γραμμικοποιείται ακολουθώντας τη μεθοδολογία της υποενότητας 2.2.3, αφού δοθούν στα υπόλοιπα κόστη συγκεκριμένα όρια ως περιορισμοί.

Πίνακας 2-5: Αποτελέσματα παραδείγματος 2

Περιορισμοί	J_9	70	70	70	70	70
	J_8	50	50	50	50	50
	J_7	50	50	50	50	50
	J_6	1000	1000	1000	1000	1000
	J_5	1000	1000	1000	1000	1000
	J_4	30	30	30	30	30
	J_3	30	30	30	-	-
	J_2	400	-	-	200	400
	J_1	-	1000	600	1000	1000

Μεταβλητές Απόφασης		Βέλτιστο Κόστος				
		J_j	$\min J1 = 861$	$\max J2 = 470$	$\max J2 = 285$	$\max J3 = 97,091$
w_8		1	0	0	1	1
w_7		0	1	0	0	1
w_6		0	1	0	0	1
w_5		0	0	1	0	0
w_4		1	1	1	0	0
w_3		1	0	0	0	0
w_2		1	1	0	1	1
w_1		0	1	1	1	1

Προκύπτει πως όσο αυστηρότεροι γίνονται οι περιορισμοί αλλάζοντας τα επιθυμητά όρια, τόσο περιορίζεται το σύνολο των εφικτών λύσεων και χειροτερεύει η βέλτιστη λύση.

2.3.3 Παραδείγματα προβλήματος ακέραιου προγραμματισμού πολλαπλών στόχων

Στα παραδείγματα μαθηματικού προγραμματισμού πολλαπλών στόχων αυτής της υποενότητας αναζητείται είτε η βέλτιστη λύση, αν οι συντελεστές βαρύτητας κάθε κόστους είναι ήδη αποφασισμένοι, είτε το σύνολο των αποτελεσματικών λύσεων Pareto, εάν η Εποπτεύουσα Αρχή επιθυμεί να εξετάσει διάφορα σενάρια συντελεστών βαρύτητας. Στην περίπτωση που εξετάζεται, τα κόστη J_3 , J_4 και J_9 είναι μη γραμμικά και πρέπει πρώτα να μετασχηματιστούν, αλλά τελικά προκύπτει ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με δυαδικές μεταβλητές w_i και θετικές μεταβλητές z_{ij} , όπου $i = 1, \dots, 8$ και $j = 1, 2$.

Παράδειγμα 3Α

Σε αυτό το παράδειγμα γίνεται η υπόθεση ότι η Εποπτεύουσα Αρχή έχει αποφασίσει σχετικά με την ενεργειακή πολιτική που θα ακολουθηθεί και αναζητεί την αντίστοιχη βέλτιστη λύση. Επομένως, πρέπει να βρεθούν οι ενεργειακές πηγές που βελτιστοποιούν την εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση. Στον Πίνακα 2-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διαφορετικά σενάρια περιορισμών και συντελεστών βαρύτητας.

Πίνακας 2-6: Αποτελέσματα παραδείγματος 3Α

Decision							Total gain	Weights									Constraints	
w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	w ₅	w ₆	w ₇	w ₈	J	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	b ₉	J _j
1	1	1	0	1	1	1	0	165,351	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,40	0,05	0,05	J ₁ <1000
1	1	1	0	1	1	1	0	291,601	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,60	0,05	0,05	J ₁ <1000
0	1	1	0	1	1	0	1	229,804	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,60	0,05	0,05	J ₁ <1000, J ₂ <300
0	0	0	0	1	1	0	1	63,822	0,05	0,05	0,60	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	J ₁ <1000
1	1	1	0	1	1	1	0	90,173	0,05	0,05	0,50	0,05	0,05	0,05	0,15	0,05	0,05	J ₁ <1000
0	0	0	0	0	1	0	0	-135	0,60	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	-

Υπάρχει η δυνατότητα να τεθούν όρια άνω, κάτω ή και από τις δυο μεριές ως περιορισμοί σε οποιοδήποτε αριθμό από κόστη. Ενδεχομένως όμως να μην υπάρχουν καθόλου περιορισμοί από τη μεριά της Εποπτεύουσας Αρχής, οπότε το πρόβλημα θα έχει μόνο τους φυσικούς περιορισμούς που προκύπτουν. Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι κάποιες μικρές αλλαγές στους συντελεστές βαρύτητας μπορούν να επηρεάσουν την τελική βέλτιστη απόφαση, ενώ άλλες μεγαλύτερες αλλαγές δεν επηρεάζουν την τελική λύση. Επιπλέον, προκύπτει ότι όσο πιο αυστηροί

γίνονται οι περιορισμοί, τόσο επιδεινώνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή μπορεί να είναι αρνητική, δηλαδή η Εποπτεύουσα Αρχή όχι μόνο δεν καταλήγει να μεγιστοποιεί το κοινωνικό όφελος αλλά δεν προκύπτει καν όφελος από την απόφασή της. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να συμβεί εάν το κόστος που επιδρούν αρνητικά υπερκεράσουν τα υπόλοιπα που αυξάνουν το κοινωνικό όφελος. Οι παρατηρήσεις αυτές σχετίζονται επίσης με το θέμα της σταθερότητας των λύσεων, επομένως πρέπει να εξεταστούν αρκετά παραδείγματα προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος που κάθε κόστος, κάθε συντελεστής βαρύτητας και κάθε βαθμολογία ενεργειακής πηγής δύνανται να επηρεάσουν την βέλτιστη λύση.

Παράδειγμα 3B

Σε αυτό το παράδειγμα παρουσιάζεται το σύνολο λύσεων Pareto δεδομένων των περιορισμών $J_1 < 1000$, $J_2 > 400$, $J_3 > 30$, $J_4 > 30$, $J_5 < 1000$, $J_6 < 1000$, $J_7 > 50$, $J_8 > 50$, $J_9 < 70$. Οι πιθανοί συνδυασμοί συντελεστών βαρύτητας είναι άπειροι, ωστόσο γίνεται η υπόθεση ότι η Εποπτεύουσα Αρχή θεωρεί όλα τα κριτήρια ίσης και χαμηλής σημασίας με την εξαίρεση ενός που είναι μεγάλης σημασίας. Για αυτό το σενάριο, ο συντελεστής βαρύτητας του σημαντικού κριτηρίου θεωρείται ίσος με 0,6 και οι συντελεστές βαρύτητας των υπολοίπων κριτηρίων ίσοι με 0,05 αντίστοιχα, ωστόσο θα μπορούσαν να επιλεγούν οποιεσδήποτε άλλες τιμές και να λυθεί το αντίστοιχο παράδειγμα. Επομένως, εάν η Εποπτεύουσα Αρχή δεν έχει καταλήξει ποιο είναι το πιο σημαντικό κριτήριο και θέλει να μελετήσει το σύνολο των βέλτιστων λύσεων που προκύπτουν για κάθε διαφορετικό συνδυασμό κριτηρίων, θα εξετάσει όλα τα δυνατά σενάρια. Τα αποτελέσματα για τις τιμές που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-7.

Πίνακας 2-7: Αποτελέσματα παραδείγματος 3B

b_9	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	6
b_8	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	6	0,05
b_7	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	6	0,05	0,05
b_6	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	6	0,05	0,05	0,05
b_5	0,05	0,05	0,05	0,05	6	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
b_4	0,05	0,05	0,05	6	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
b_3	0,05	0,05	6	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
b_2	0,05	6	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
b_1	6	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

J	-5.147,281	2.777,506	561,006	467,395	-1.885,559	-1.384,046	3.207,601	2.934,398	-364,254
W ₈	1	1	1	1	1	1	0	1	1
W ₇	0	1	1	1	1	1	1	0	0
W ₆	0	1	1	1	1	0	1	1	1
W ₅	0	0	0	1	0	1	1	1	0
W ₄	1	1	0	0	0	0	0	1	1
W ₃	1	0	0	0	0	0	1	1	0
W ₂	1	0	1	1	1	1	1	1	1
W ₁	0	1	1	1	1	1	1	0	1

Επιλύοντας το πρόβλημα ικανοποιησιμότητας προκύπτουν 31 εφικτές λύσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς του παραδείγματος. Για κάθε συνδυασμό συντελεστών βαρύτητας του παραδείγματος μία από τις εφικτές αυτές λύσεις είναι η βέλτιστη. Η Εποπτεύουσα Αρχή, βασιζόμενη στις βέλτιστες αυτές λύσεις κάθε συνδυασμού, έχει στη συνέχεια τη δυνατότητα να επιλέξει ποια ενεργειακή πολιτική θα εφαρμόσει και ποια από τις λύσεις αυτές είναι προτιμότερη. Στον Πίνακα 2-7 φαίνεται ότι κάποιες από τις ενεργειακές πηγές προτείνονται σε περισσότερες περιπτώσεις από κάποιες άλλες. Επίσης φαίνεται ότι η βέλτιστη απόφαση μπορεί να είναι η ίδια για διαφορετικά σενάρια συντελεστών βαρύτητας, παρόλο που η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης J διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Σε αυτό το παράδειγμα, όταν τα κόστη που επιδρούν αρνητικά είναι πολύ πιο σημαντικά σε σχέση με αυτά που προκαλούν όφελος, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται αρνητική. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε ενδεχομένως να περιοριστεί εάν ακολουθούνταν μια πολιτική περιορισμού της ζήτησης μέσω μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, η οποία θα καθιστούσε την επιλογή μη ποιοτικών ενεργειακών πηγών περιττή.

2.4 Ευαισθησία και ευρωστία των λύσεων

Όπως και σε οποιοδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης, η ευρωστία του συστήματος καθώς και η ευαισθησία του στις πιθανές μεταβολές είναι πολύ σημαντικές και ενδιαφέρουν την Εποπτεύουσα Αρχή. Η ανάλυση ευαισθησίας με την κλασική έννοια εξετάζει πώς επηρεάζεται η βέλτιστη λύση ενός προβλήματος ανάλογα με τις μεταβολές των συνεχών παραμέτρων του προβλήματος αυτού, όμως οι ακέραιες τιμές δεν μπορούν να εξεταστούν υπό αυτό το πρίσμα. Σε ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού η ευρωστία των λύσεων προκύπτει από τη συνέπεια των επιλογών, δηλαδή σε ένα εύρωστο και σταθερό σύστημα αναμένεται σε γενικές γραμμές να προκρίνονται ή να απορρίπτονται οι ίδιες ενεργειακές πηγές σε περίπτωση μικρών μεταβολών της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών.

Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην βέλτιστη λύση, αλλά η επίλυση του προβλήματος ικανοποιησιμότητας και η μετέπειτα ταξινόμηση και μελέτη των λύσεων που θα προκύψουν μπορεί να βοηθήσει στην εξέταση της σταθερότητας των τιμών των δυαδικών μεταβλητών w_i , όπως παρουσιάστηκε με τη βοήθεια του Πίνακα 2-4. Προκειμένου να αποφευχθεί η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω των πολλών εφικτών λύσεων, η μελέτη μπορεί να περιοριστεί στις λύσεις οι οποίες απέχουν λίγο από τη βέλτιστη έπειτα και από την ταξινόμησή τους.

Επομένως, η σταθερότητα και ευρωστία των λύσεων είναι σημαντική και συνδυάζεται με την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας b_j , οι οποίοι μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε θετική τιμή (οι τιμές αυτές θα είναι μεταξύ του μηδέν και της μονάδας εάν θεωρηθεί ότι οι συντελεστές αντιπροσωπεύουν ποσοστά). Επιπλέον, η ευαισθησία με τη συμβατική έννοια αφορά τις τιμές που αποδίδονται σε κάθε ενεργειακή πηγή όσον αφορά τα κριτήρια αξιολόγησης Cr_j . Πολλές από αυτές τις τιμές πιθανόν να περιλαμβάνουν σφάλματα μέτρησης στην περίπτωση των ποσοτικών κριτηρίων, ενώ στην περίπτωση των ποιοτικών κριτηρίων συχνά είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια η βαθμολογία μιας πηγής. Επίσης, οι τιμές αυτές πιθανόν να αλλάξουν απροσδόκητα, για παράδειγμα μια απόσυρση μονάδας σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας θα μειώσει τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ ή μια νέα επένδυση σε μια υφιστάμενη μονάδα παραγωγής μπορεί να αυξήσει τη βαθμολογία της όσον αφορά τα κοινωνικά χαρακτηριστικά. Επομένως, προκειμένου να εξεταστεί ποια απόφαση είναι η καλύτερη, πρέπει να μελετηθεί πώς μικρές μεταβολές μπορούν πιθανόν να επηρεάσουν την βέλτιστη λύση που προκύπτει. Είναι βέβαια αναμενόμενο ότι κάποιες τιμές υπόκεινται πιο εύκολα σε μεταβολές σε σχέση με κάποιες άλλες.

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί ένα απλό παράδειγμα, το οποίο αφορά τη μεγιστοποίηση της γραμμικής συνάρτησης J_2 . Στο Παράδειγμα 1B υπολογίστηκε ότι η απόφαση που βελτιστοποιεί το J_2 δεδομένων των περιορισμών $J_1 < 1000$, $J_3 > 30$, $J_4 > 30$, $J_5 < 1000$, $J_6 < 1000$, $J_7 > 50$, $J_8 > 50$, $J_9 < 70$, είναι η:

$w = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8) = (1,1,0,1,0,1,1,0)$ για την οποία $J_2 = 470$.

Εάν το οικονομικό κόστος ($Cr1$) της ενεργειακής πηγής R4 αυξηθεί από 1,9 σε 2,1 η βέλτιστη λύση γίνεται:

$w = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8) = (1,0,0,1,0,0,1,1)$ για την οποία $J_2 = 455$.

Εάν όμως η αξιολόγηση της ενεργειακής πηγής R4 όσον αφορά τα κοινωνικά χαρακτηριστικά ($Cr8$) μειωθεί από 90 σε 60, η βέλτιστη λύση δεν επηρεάζεται και παραμένει: $w = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8) = (1,1,0,1,0,1,1,0)$ για την οποία $J_2 = 470$.

Ο λόγος είναι ότι οι περιορισμοί οι οποίοι έχουν επιβληθεί σε αυτό το παράδειγμα είναι χαλαροί όσον αφορά τα κοινωνικά χαρακτηριστικά, αλλά αυστηροί όσον αφορά το οικονομικό κόστος. Επομένως η ευαισθησία και η σταθερότητα των λύσεων εξαρτάται κάθε φορά και από τη γενικότερη διατύπωση του προβλήματος.

2.5 Αναφορές δεύτερου κεφαλαίου

- [1]. Der-San Chen, R. G. Batson, Yu Dang, (2010) “Applied Integer Programming-Modeling and Solution”, Wiley
- [2]. L.A. Wolsey, G.A.Nemhauser, (1999) Integer and Combinatorial Optimization, John Wiley & Sons
- [3]. T.J. Schaefer, (1978) “The complexity of satisfiability problems”, STOC
- [4]. Charnes A., Cooper W. W., (1962) “Programming with linear fractional functional”, Naval Research Logistics Quartely 9
- [5]. Li H.-L., (1994) “A global approach for general 0-1 fractional programming”, European Journal of Operational Research 73
- [6]. Schaible, S., & Shi, J. (2003). Fractional programming: the sum-of-ratios case. Optimization Methods and Software, 18(2), 219-229.
- [7]. Schaible Siegfried, (1982) “Fractional Programming”, Journal of Operational Research 27
- [8]. Doumpos, M., & Zopounidis, C. (2002). Multicriteria decision aid classification methods (Vol. 73). Springer.
- [9]. Zopounidis, C., & Doumpos, M. (2002). Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. European Journal of Operational Research, 138(2), 229-246.
- [10]. Hwang, C. L., & Masud, A. S. M. (1979). Multiple objective decision making-methods and applications (Vol. 164). Berlin: Springer-Verlag
- [11]. GAMS Development Corporation, (2012) “GAMS – The solver manuals”

3 Χρήση μεικτού ακέραιου προγραμματισμού για την αξιολόγηση παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια του οικιακού τομέα υπό αβεβαιότητα

Τα κτίρια είναι υπεύθυνα για ένα πολύ μεγάλο κομμάτι της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται σε κτίρια του οικιακού τομέα καθώς αποτελούν τη μεγαλύτερη και ταυτόχρονα την πιο γερασμένη κατηγορία κτιρίων. Τα μέτρα που μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή επίδοση ενός κτιρίου ποικίλουν, αλλά όλα στοχεύουν στον περιορισμό της κατανάλωσης που απαιτείται για την κάλυψη συγκεκριμένων αναγκών. Οι ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου του οικιακού τομέα χωρίζονται συνήθως σε δυο κατηγορίες: η μία περιλαμβάνει τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης που εξαρτώνται από τα επίπεδα θερμικής άνεσης και μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) [1], ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τις καταναλώσεις του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που εξαρτώνται από το πρόγραμμα και τις συνήθειες των κατοίκων του κτιρίου. Αυτές οι δυο κατηγορίες διαφέρουν μεταξύ τους, αλλά υπάρχουν αλληλεπιδράσεις εάν για τη ψύξη και τη θέρμανση της οικίας χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια.

Υπάρχει επομένως ένα μεγάλο σύνολο από διαθέσιμες παρεμβάσεις οι οποίες πρέπει να αξιολογηθούν με βάση διάφορα κριτήρια και ο αποφασίζων πρέπει να διαχειριστεί πολλούς αντικρουόμενους στόχους. Τέτοιου είδους πολυκριτηριακά προβλήματα είναι συνήθη στον ενεργειακό τομέα [2]. Εν προκειμένω, για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ενεργειακής αναβάθμισης ενός κτιρίου, κάθε κριτήριο αξιολόγησης αντιστοιχίζεται με έναν συντελεστή βαρύτητας και στη συνέχεια ενσωματώνονται όλα σε μια συνάρτηση, η οποία αντιπροσωπεύει το συνολικό όφελος του αποφασίζοντα σύμφωνα με τις προτιμήσεις του. Η μέθοδος στάθμισης χρησιμοποιείται ευρέως για να προκύψει ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων κατά Pareto, από τις οποίες μπορεί στη συνέχεια να επιλεγεί μία [3]. Η ενιαία αντικειμενική συνάρτηση που προκύπτει βελτιστοποιείται χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ακέραιου και μεικτού ακέραιου προγραμματισμού, ενώ για διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας προκύπτουν διαφορετικές βέλτιστες λύσεις. Το πρόβλημα διατυπώνεται χρησιμοποιώντας δυαδικές μεταβλητές οι οποίες διευκολύνουν την επίλυση και οι αλγόριθμοι συγκλίνουν στη βέλτιστη κάθε φορά λύση καθώς οι μη γραμμικές συναρτήσεις μετασχηματίζονται.

Πολύ σημαντική ωστόσο είναι και η αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που συνοδεύει την λήψη τέτοιου είδους αποφάσεων. Στο πρόβλημα που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, η αβεβαιότητα προκύπτει από την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας που αντιστοιχούν στις προτιμήσεις του αποφασίζοντα, το οποίο είναι από τα πιο κρίσιμα σημεία στη λήψη αποφάσεων, καθώς και από τους περιορισμούς που ενδεχομένως μεταβληθούν απροειδοποίητα, όπως για παράδειγμα ο διαθέσιμος προϋπολογισμός. Αβεβαιότητα μπορεί να υπάρχει επίσης όσον αφορά το κόστος της επένδυσης [4] ή την αναμενόμενη εξοικονόμηση, εάν προκύψουν εκτάκτως χρηματοδοτικοί μηχανισμοί ή μεταβολές στα τιμολόγια ενέργειας. Αν και οι

αβεβαιότητες αυτές δεν λαμβάνονται υπόψη στο κεφάλαιο αυτό, μπορούν να εξεταστούν χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία.

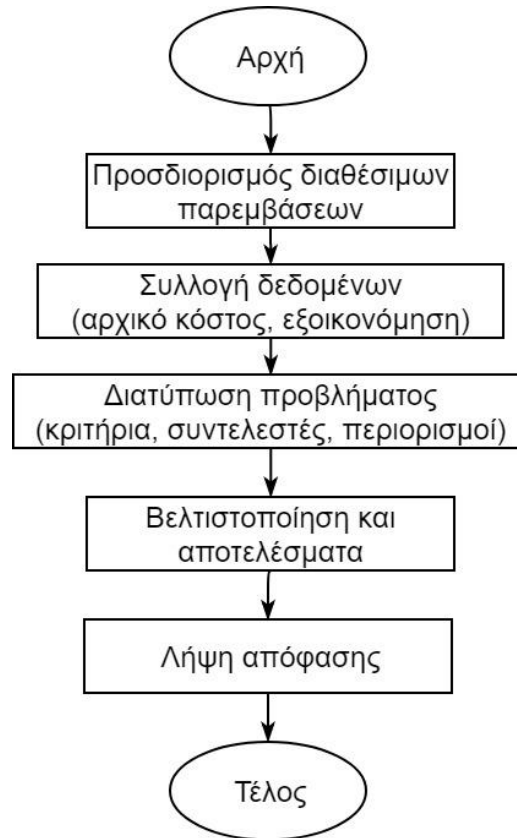
Από τις διαθέσιμες μεθοδολογίες που σχετίζονται με την αβεβαιότητα, σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιείται η διαστηματική ανάλυση, που είναι καταλληλότερη όταν οι πληροφορίες για τις συναρτήσεις κατανομής και τις συναρτήσεις συμμετοχής των αβέβαιων παραμέτρων δεν είναι γνωστές ή δεν απαιτούνται. Στη διαστηματική ανάλυση μια παράμετρος με αβεβαιότητα x αντικαθίσταται από ένα διάστημα τιμών, δηλαδή οι πιθανές τιμές της παραμέτρου βρίσκονται εντός των ορίων αυτού του διαστήματος. Όποια συνάρτηση εφαρμοστεί στην παράμετρο x παράγει ένα άλλο διάστημα, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις τιμές της συνάρτησης που προκύπτουν από όλες τις πιθανές τιμές της αβέβαιης παραμέτρου. Επομένως, ο αποφασίζων μπορεί να υπολογίσει αποτελεσματικά το εύρος εντός του οποίου μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη λύση και πώς την επηρεάζουν οι μεταβλητές απόφασης.

Στις παρακάτω ενότητες αναπτύσσεται ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο ενσωματώνει μη γραμμικά κριτήρια και διάφορους περιορισμούς που καθορίζονται από τον αποφασίζοντα προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα ενεργειακής αναβάθμισης ενός κτιρίου του οικιακού τομέα. Παρουσιάζεται επίσης ο τρόπος με τον οποίο το παρόν μοντέλο επεκτείνει τις πρόσφατες μελέτες ενσωματώνοντας συνέργιες που μπορεί να προκύψουν μεταξύ διαφορετικών παρεμβάσεων και ποιοτικά κριτήρια, ώστε τελικά να μπορούν να αντιμετωπιστούν ακόμα και οι πιο σύνθετες περιπτώσεις. Η αβεβαιότητα που εγκυμονεί στις προτιμήσεις του αποφασίζοντα λαμβάνεται υπόψη προκειμένου να μελετηθεί η ευρωστία των αποφάσεων και να εκτιμηθεί ποιες είναι πιο ευεπηρεάστες, ώστε να προκύψει ένα πιο αποτελεσματικό εργαλείο. Παρουσιάζεται επίσης μια μελέτη περίπτωσης που αφορά την ενεργειακή αναβάθμιση μιας κατοικίας στην περιοχή της Μεσογείου κατόπιν αξιολόγησης όλων των διαθέσιμων παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το προτεινόμενο σύστημα και θα αναλυθεί η επιρροή των περιορισμών, των προτιμήσεων του αποφασίζοντα και της αβεβαιότητας επιλύοντας μερικά παραδείγματα.

Η δομή του κεφαλαίου έχει ως εξής: στην Ενότητα 3.1 διατυπώνεται το πρόβλημα και στην Ενότητα 3.2 παρουσιάζεται το μαθηματικό πλαίσιο της διαστηματικής ανάλυσης καθώς και η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για να επιλυθεί το πρόβλημα υπό αβεβαιότητα. Στην Ενότητα 3.3 περιγράφεται μια μελέτη περίπτωσης και μερικά αριθμητικά παραδείγματα επιλύονται και αναλύονται στην Ενότητα 3.4, ώστε να αξιολογηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία.

Τα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω εποπτικό διάγραμμα ροής:

Διάγραμμα 3-1: Εποπτικό διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας



3.1 Διατύπωση του προβλήματος

Αφού κάποιος κατανοήσει πρώτα την ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου και τις πιθανές παρεμβάσεις που μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή του αποδοτικότητα, πρέπει να αξιολογήσει τις διαθέσιμες επιλογές ώστε να αποφασίσει πόσες και ποιες από αυτές τις παρεμβάσεις θα υλοποιήσει. Τα κριτήρια αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι αναγκαία και ταυτόχρονα ικανά προκειμένου να ληφθεί η απόφαση αυτή. Πολλά κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα τέτοιο πρόβλημα επιλογής, αλλά σύμφωνα με ειδικούς της αγοράς ακινήτων τα πιο σημαντικά όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση σε κτίρια του οικιακού τομέα είναι τρία: (1) το κόστος κεφαλαίου κάθε παρέμβασης, (2) η εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση, δηλαδή η μείωση του ενεργειακού κόστους έπειτα από την υλοποίηση μιας παρέμβασης και (3) ο χρόνος αποπληρωμής της συνολικής επένδυσης με βάση τα κόστη και τα οφέλη που συνδέονται με αυτή. Το κόστος κεφαλαίου είναι ο πιο αποτρεπτικός παράγοντας για την υλοποίηση παρεμβάσεων ενεργειακής απόδοσης σε κτίρια του οικιακού τομέα, καθώς τα φυσικά πρόσωπα που καλούνται να αποφασίσουν δεν έχουν τις χρηματοδοτικές δυνατότητες, τις τεχνικές γνώσεις και την μακροπρόθεσμη επενδυτική προσέγγιση που έχουν οι εταιρείες. Η εξοικονόμηση ενέργειας χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ετήσιο χρηματικό όφελος μιας παρέμβασης, το οποίο προκύπτει από την εκτιμώμενη μείωση της κατανάλωσης και την αντίστοιχη τιμή της ενέργειας. Τέλος, ο χρόνος αποπληρωμής

είναι σημαντικό κριτήριο για οποιαδήποτε επενδυτική απόφαση καθώς μετρά την αναλογία μεταξύ εξοικονόμησης και κόστους κεφαλαίου. Ο χρόνος αποπληρωμής στο προτεινόμενο μοντέλο προκύπτει από τη συνολική εξοικονόμηση και τα κεφαλαιακά κόστη των παρεμβάσεων που θα επιλεγούν και όχι από τους μεμονωμένους χρόνους αποπληρωμής κάθε μίας από αυτές, επειδή ο αποφασίζων ενδιαφέρεται πρακτικά για την γρήγορη αποπληρωμή της συνολικής μόνο επένδυσης. Τα τρία αυτά κριτήρια είναι ποσοτικά επομένως οι τιμές τους μπορούν να υπολογιστούν εύκολα, ωστόσο ο χρόνος αποπληρωμής δεν εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες.

Αυτός που θα κληθεί να αποφασίσει ενδεχομένως θέλει να προσθέσει και άλλα κριτήρια αξιολόγησης τα οποία θεωρεί σημαντικά, όπως για παράδειγμα η Καθαρή Παρούσα Αξία αντί για το χρόνο αποπληρωμής (σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε το δεύτερο επειδή είναι πιο εύκολα κατανοητό σε απλούς ιδιοκτήτες σπιτιών που δεν έχουν ιδιαίτερες οικονομικές γνώσεις) ή οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μια παρέμβασης, εάν ο αποφασίζων ακολουθεί μια πιο οικολογική προσέγγιση. Μερικά κριτήρια ίσως να είναι ποιοτικά, όπως για παράδειγμα η αναστάτωση και το μέγεθος της απαιτούμενης ανακαίνισης που μπορεί να δρα αποτρεπτικά στην υλοποίηση παρεμβάσεων. Επομένως υπάρχουν διάφορα κριτήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς η ιεράρχηση και η σχετικότητα τους εξαρτώνται από αυτόν που θα λάβει την τελική απόφαση. Ωστόσο, η τυπική προσέγγιση των ανθρώπων που αποφασίζουν για μεμονωμένα κτίρια του οικιακού τομέα είναι απλή και συνήθως καταλήγει στα τρία κριτήρια που αναφέρθηκαν. Σε κάθε περίπτωση, η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να ενσωματώσει οποιοδήποτε αριθμό κριτηρίων, τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά, με την προϋπόθεση να δημιουργηθεί μια αντιπροσωπευτική αριθμητική κλίμακα αξιολόγησης για το καθένα.

Όσον αφορά τη μαθηματική διατύπωση, η επιλογή μιας παρέμβασης I_i αναπαρίσταται με μια δυαδική μεταβλητή $x_i, i = 1 \dots t$. Αυτό σημαίνει ότι η τελική απόφαση εκφράζεται από ένα διάνυσμα \mathbf{x} δυαδικών μεταβλητών, στο οποίο οι μηδενικές τιμές αντιστοιχούν στις παρεμβάσεις που δεν προτείνονται τελικά και οι μοναδιαίες τιμές στις παρεμβάσεις που προτείνεται να υλοποιηθούν αντίστοιχα. Τα κριτήρια C_j ($j \in C$) που χρησιμοποιούνται για τη λήψη της απόφασης οδηγούν στα αντίστοιχα κόστη J_j . Το J_1 εκφράζει το συνολικό κόστος κεφαλαίου μιας επενδυτικής απόφασης, το J_2 τη συνολική ετήσια εξοικονόμηση που θα προκύψει λόγω της επένδυσης και το J_3 είναι ο χρόνος αποπληρωμής της αντίστοιχα. Τα κόστη J_j δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$J_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^t a_{1,i} x_i \quad (1)$$

$$J_2(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^t a_{2,i} x_i \quad (2)$$

$$J_3(\mathbf{x}) = \frac{J_1(\mathbf{x})}{J_2(\mathbf{x})} = \frac{\sum_{i=1}^t a_{1,i} x_i}{\sum_{i=1}^t a_{2,i} x_i} \quad (3)$$

στις οποίες το J_1 ισούται με το άθροισμα του κόστους κεφαλαίου $a_{1,i}$ των παρεμβάσεων που θα επιλεγούν και γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχουν συνέργειες μεταξύ των παρεμβάσεων επομένως το J_2 προκύπτει ομοίως από το άθροισμα των ετήσιων εξοικονομήσεων $a_{2,i}$.

Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν συνέργειες μεταξύ δύο ή περισσότερων παρεμβάσεων που οδηγούν σε μεγαλύτερη ή μικρότερη εξοικονόμηση από το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους εξοικονομήσεων. Αυτές οι συνέργειες μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν μέσω γινομένων δυαδικών μεταβλητών που πρέπει να συνυπολογιστούν στις συναρτήσεις του J_2 και του J_3 . Για παράδειγμα, εάν ο συνδυασμός εξωτερικής θερμομόνωσης και αντικατάστασης κουφωμάτων καταλήγει σε 10% χαμηλότερη συνολική εξοικονόμηση σε σχέση με την εξοικονόμηση από την υλοποίηση αυτών των δυο παρεμβάσεων ανεξάρτητα λόγω επικάλυψης στα οφέλη, το J_1 θα παραμείνει ίδιο αλλά το J_2 θα ισούται με $\sum_{i=1}^t a_{2,i} x_i - 0.1(a_{2,1} + a_{2,2})x_1 x_2$ και ο παρονομαστής του J_3 θα μεταβληθεί αντίστοιχα. Στη συνέχεια, τα γινόμενα αυτά μπορούν να αντικατασταθούν από απλές δυαδικές μεταβλητές προσθέτοντας επιπλέον περιορισμούς στο πρόβλημα. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν n δυαδικές μεταβλητές $y_i, i = 1, \dots, n$, το γινόμενό τους μπορεί να αντικατασταθεί από την δυαδική μεταβλητή y_p με την προσθήκη των περιορισμών $y_s \leq y_p + (n - 1)$ και $y_s \geq n y_p$, όπου y_s είναι το άθροισμα των n δυαδικών μεταβλητών. Αυτή η μέθοδος δεν επηρεάζει τη γραμμική και μη γραμμική διατύπωση των συναρτήσεων J_2 και J_3 αντίστοιχα, ενώ επιτρέπει τη διατύπωση και αντιμετώπιση πολύ πιο περίπλοκων και ρεαλιστικών περιπτώσεων. Επομένως, αυτοί οι μετασχηματισμοί οδηγούν πάλι στην αρχική διατύπωση του προβλήματος ενσωματώνοντας οποιαδήποτε συνέργεια υπάρχει μεταξύ των παρεμβάσεων. Για λόγους απλότητας, στο υπόλοιπο κεφάλαιο γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχουν συνέργειες και η ετήσια εξοικονόμηση που προκύπτει από την υλοποίηση μιας παρέμβασης είναι ανεξάρτητη από την υλοποίηση οποιασδήποτε άλλης παρέμβασης.

Επιπροσθέτως, ο αποφασίζων δύναται να θέσει στα κριτήρια αξιολόγησης συγκεκριμένα όρια, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτιμήσεις τους. Για παράδειγμα, ενδεχομένως να υπάρχει κάποιος περιορισμός στον προϋπολογισμό ή στον χρονικό ορίζοντα που σχετίζεται με την απόφαση. Επομένως, σε κάθε συνάρτηση J_j μπορούν να τεθούν άνω και κάτω όρια, $J_{j,min}$ και $J_{j,max}$ αντίστοιχα, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως περιορισμοί στο πρόβλημα. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν είτε να είναι προαιρετικοί, είτε να είναι υποχρεωτικοί αλλά ο αποφασίζων να επιλέγει κατάλληλα τις τιμές των παραμέτρων εάν θέλει οι περιορισμοί να είναι μη δεσμευτικοί. Οι περιορισμοί διατυπώνονται ως:

$$J_{j,min} \leq J_j \leq J_{j,max}, \quad j = 1,2,3 \quad (4)$$

Όλα τα διαφορετικά κόστη που επηρεάζουν την τελική απόφαση πρέπει να ληφθούν υπόψη, επομένως χρησιμοποιείται το πλαίσιο μαθηματικού προγραμματισμού πολλαπλών στόχων, το οποίο αποτελεί προέκταση της κλασικής θεωρίας μαθηματικού προγραμματισμού. Ο μαθηματικός προγραμματισμός πολλαπλών στόχων ανήκει στο πλαίσιο πολυκριτηριακών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο περιλαμβάνει διάφορες μεθοδολογίες για την ενσωμάτωση των διαφορετικών κριτηρίων και τη διευκόλυνση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων [5,6]. Προκειμένου να συνδυαστούν οι διαφορετικοί στόχοι και να προκύψει ένα μοναδικό κόστος που θα αποτελέσει την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος στάθμισης. Ο αποφασίζων αποδίδει συντελεστές βαρύτητας στα κριτήρια αναλόγως των προτιμήσεών του καταλήγοντας στην δική του αντικειμενική συνάρτηση, η οποία πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Η μέθοδος αυτή είναι απλή και συγκλίνει γρήγορα στη βέλτιστη λύση. Τελικά, πρόκειται για το παρακάτω πρόβλημα δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού [7]:

$$\min_{\mathbf{x}}(w_1J_1 - w_2J_2 + w_3J_3) \quad (5)$$

με περιορισμούς:

$$J_{j,min} \leq J_j \leq J_{j,max}, \quad j = 1,2,3 \quad (6)$$

Η επιλογή θετικού ή αρνητικού πρόσημου σε κάθε J_j εξαρτάται από την έννοια που αυτό έχει. Το κόστος κεφαλαίου και ο χρόνος αποπληρωμής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα, επομένως τα κόστη J_1 και J_3 ενσωματώνονται στην αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης με θετικά πρόσημα, ενώ η εξοικονόμηση χρημάτων αποτελεί κέρδος το οποίο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο, άρα το J_2 ενσωματώνεται με αρνητικό πρόσημο. Τα πρόσημα θα ήταν αντίθετα εάν επρόκειτο για πρόβλημα μεγιστοποίησης.

Για κάθε διάνυσμα συντελεστών βαρύτητας $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3)$, υπάρχει μια βέλτιστη λύση που αντιστοιχεί στις προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Οι συντελεστές βαρύτητας αντιπροσωπεύουν τις αξίες αντιστάθμισης μεταξύ των κριτηρίων [8]. Οι συντελεστές αυτοί μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε θετική τιμή η οποία αποτελεί ένα μέτρο της σημαντικότητας κάθε κριτηρίου. Έπειτα από μετασχηματισμό μπορούν να αθροίζονται στη μονάδα αντιστοιχώντας με αυτόν τον τρόπο σε ποσοστά σημαντικότητας. Οι συντελεστές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή των μονάδων μέτρησης ώστε και τα τρία κόστη να είναι συγκρίσιμα. Εάν κάποιος συντελεστής είναι μηδενικός, το αντίστοιχο κόστος απαλείφεται πρακτικά από την αντικειμενική συνάρτηση.

3.2 Μέθοδος και διαδικασία βελτιστοποίησης

Όταν οι τιμές κάποιων παραμέτρων δεν μπορούν να εκτιμηθούν ακριβώς, η αβεβαιότητα που προκύπτει πρέπει να ενσωματωθεί στο μοντέλο, όμως οι τυπικοί αλγόριθμοι ακέραιου προγραμματισμού πιθανόν να μην είναι έπειτα αποτελεσματικοί. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται

για να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα περιλαμβάνουν συνήθως τα ασαφή σύνολα, τη στοχαστικότητα και τη διαστηματική ανάλυση. Οι δυο πρώτες απαιτούν επιπλέον πληροφορίες και οδηγούν σε περίπλοκα υποπροβλήματα που περιορίζουν τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε πραγματικά προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα, στο στοχαστικό και στον ασαφή προγραμματισμό είναι απαραίτητη η πιθανοτική συνάρτηση κατανομής και η συνάρτηση συμμετοχής κάθε αβέβαιης παραμέτρου αντίστοιχα. Στα προβλήματα μηχανικής, ο αποφασίζων μπορεί συνήθως να εκτιμήσει το διάστημα εντός του οποίου θα βρίσκεται η τιμή της αβέβαιης παραμέτρου, αλλά ενδεχομένως είναι δύσκολο να βρεθούν πληροφορίες σχετικές με τις πιθανότητες και τις κατανομές εντός αυτών των διαστημάτων. Επομένως, η διαστηματική ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας στο εκάστοτε πρόβλημα βελτιστοποίησης και οι απαιτήσεις της σχετικά με την κατανόηση της αβεβαιότητας είναι μικρότερες. Για αυτούς τους λόγους σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιείται το πλαίσιο της διαστηματικής ανάλυσης και οι αβέβαιες παράμετροι εκφράζονται ως διαστήματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν το εύρος των τιμών αυτών των παραμέτρων [9]. Σε αυτό το πλαίσιο, οποιαδήποτε αβέβαιη παράμετρος x^\pm εκφράζεται ως ένα διάστημα με άνω όριο x^+ και κάτω όριο x^- , δηλαδή οι τιμές της μπορούν να είναι εντός του διαστήματος $[x^-, x^+]$. Οι τιμές που μπορεί να πάρει η αβέβαιη παράμετρος εντός αυτού του διαστήματος εξαρτώνται από το εάν είναι διακριτή ή συνεχής. Σε κάθε περίπτωση, όλες οι βασικές μαθηματικές πράξεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και μεταξύ διαστημάτων.

Στη συνέχεια περιγράφεται πρώτα το γραμμικό διαστηματικό πρόβλημα (interval linear problem) και έπειτα επεκτείνεται ώστε να ενσωματωθούν και οι μη γραμμικότητες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με διαστήματα διατυπώνεται ως:

$$\min f^\pm = C^\pm X^\pm \quad (7)$$

με περιορισμούς:

$$A^\pm X^\pm \leq B^\pm \quad (8)$$

$$X^\pm \geq 0 \quad (9)$$

όπου $A^\pm, B^\pm, C^\pm, X^\pm$ είναι πίνακες με στοιχεία που ανήκουν στο σύνολο διαστηματικών αριθμών R^\pm .

Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να λυθεί αφού χωριστεί σε δυο υποπροβλήματα [10]. Στα προβλήματα ελαχιστοποίησης διατυπώνεται πρώτα ένα μοντέλο που αντιστοιχεί στο f^- και βάσει των λύσεων που προκύπτουν από αυτό διατυπώνεται και επιλύεται στη συνέχεια ένα μοντέλο που αντιστοιχεί στο f^+ . Στα προβλήματα μεγιστοποίησης αντιστρέφεται η σειρά και το μοντέλο που σχετίζεται με το f^+ διατυπώνεται και επιλύεται πρώτο. Με την υπόθεση ότι $b^\pm > 0$, το πρώτο μοντέλο είναι:

$$\min f^- = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^- x_j^- + \sum_{j=k_1+1}^n c_j^- x_j^+ \quad (10)$$

με περιορισμούς:

$$\sum_{j=1}^{k_1} |a_{ij}|^+ \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^- / b_i^- + \sum_{j=k_1+1}^n |a_{ij}|^- \text{Sign}(a_{ij}^-) x_j^+ / b_i^+ \leq 1, \forall i \quad (11)$$

$$x_j^\pm \geq 0, \forall j \quad (12)$$

όπου οι x_j^\pm είναι συνεχείς ή διακριτές μεταβλητές με θετικούς συντελεστές κόστους c_j^\pm για $j = 1, \dots, k_1$ και αρνητικούς για $j = k_1 + 1, \dots, n$.

Μετά την επίλυση του μοντέλου που αντιστοιχεί στο f^- προκύπτουν οι βέλτιστες τιμές $x_{j,opt}^-$ για $j = 1, \dots, k_1$, $x_{j,opt}^+$ για $j = k_1 + 1, \dots, n$ και f_{opt}^- . Αντιστρέφοντας τα πρόσημα των εξισώσεων (10)-(11) και προσθέτοντας επιπλέον περιορισμούς, το δεύτερο μοντέλο είναι:

$$\min f^+ = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^+ x_j^+ + \sum_{j=k_1+1}^n c_j^+ x_j^- \quad (13)$$

με περιορισμούς:

$$\sum_{j=1}^{k_1} |a_{ij}|^- \text{Sign}(a_{ij}^-) x_j^+ / b_i^+ + \sum_{j=k_1+1}^n |a_{ij}|^+ \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^- / b_i^- \leq 1, \forall i \quad (14)$$

$$x_j^\pm \geq 0, \forall j \quad (15)$$

$$x_j^+ \geq x_{j,opt}^-, j = 1, 2, \dots, k_1 \quad (16)$$

$$x_j^- \leq x_{j,opt}^+, j = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, n \quad (17)$$

Μετά την επίλυση των δυο αυτών μοντέλων προκύπτουν οι τελικές λύσεις f_{opt}^- , f_{opt}^+ και $x_{j,opt}^-$, $x_{j,opt}^+$ για $j = 1, \dots, n$, δηλαδή τα άνω και κάτω όρια των βέλτιστων λύσεων για την αντικειμενική συνάρτηση και των μεταβλητών απόφασης.

Χρησιμοποιώντας αυτή τη μεθοδολογία, καταλήγουμε σε ένα σύνολο βέλτιστων και ευσταθών λύσεων για τις μεταβλητές απόφασης, το οποίο οδηγεί σε ένα εύρος εφικτών βέλτιστων λύσεων της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι καλύτερο από μια ανάλυση του καλύτερου και του χειρότερου σεναρίου, η οποία επικεντρώνεται κυρίως στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς να μελετά την ευστάθεια και τη συμπεριφορά των μεταβλητών απόφασης.

Το πρόβλημα που περιγράφηκε σε αυτό το κεφάλαιο διαφέρει από το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με διαστήματα καθώς το κόστος J_3 είναι μη γραμμικό. Ωστόσο αυτό το μη γραμμικό κόστος μπορεί να μετασχηματιστεί χρησιμοποιώντας κάποιες τεχνικές του κλασματικού προγραμματισμού οι οποίες παρουσιάστηκαν και στο Κεφάλαιο 1, αφού η μη γραμμικότητα οφείλεται σε πηλίκo γραμμικών συναρτήσεων [11].

Οι μη γραμμικοί περιορισμοί της μορφής $\frac{\sum_i a_i x_i}{\sum_i d_i x_i} \leq c$ μπορούν να μετασχηματιστούν ως $\sum_i (a_i - c d_i) x_i \leq 0$, αφού οι παρονομαστές του προβλήματος είναι πάντα θετικοί. Αντίστοιχα μπορούν να μετασχηματιστούν και οι περιορισμοί

της μορφής $\frac{\sum_i a_i x_i}{\sum_i d_i x_i} \geq c$. Εάν τα κλάσματα αυτά είναι στην αντικειμενική συνάρτηση, το πρόβλημα γραμμικού κλασματικού προγραμματισμού μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα πρόγραμμα μεικτού ακεραίου προγραμματισμού χρησιμοποιώντας δυαδικές και συνεχείς θετικές μεταβλητές. Το πρόβλημα γραμμικού κλασματικού προγραμματισμού με δυαδικές μεταβλητές είναι:

$$\min \frac{a_1 x_1 + \dots + a_k x_k + a_{k+1}}{c_1 x_1 + \dots + c_k x_k + c_{k+1}} \quad (18)$$

με περιορισμούς:

$$A_1 x_1 + \dots + A_k x_k \leq b \quad (19)$$

όπου $A_i, i = 1 \dots k$ και b είναι διανύσματα τιμών, x_i είναι δυαδικές μεταβλητές και a_i, c_i με $i = 1, \dots, k + 1$ είναι οι αντίστοιχοι σταθεροί συντελεστές.

Θέτοντας $y = 1 / (c_1 x_1 + \dots + c_k x_k + c_{k+1})$ το πρόβλημα γίνεται:

$$\min a_1 x_1 y + \dots + a_k x_k y + a_{k+1} y \quad (20)$$

με περιορισμούς:

$$c_1 x_1 y + \dots + c_k x_k y + c_{k+1} y = 1 \quad (21)$$

$$A_1 x_1 + \dots + A_k x_k \leq b \quad (22)$$

όπου x_i είναι δυαδικές μεταβλητές και $y \geq 0$. Στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός $z = xy$ προσθέτοντας επιπλέον τέσσερις ανισότητες: $y - z \leq K - Kx$, $z \leq y$, $z \leq Kx$ και $z \geq 0$, όπου $K > y$ και x δυαδική μεταβλητή.

Παρόμοιοι μετασχηματισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη γενική μορφή ενός προβλήματος γραμμικού κλασματικού προγραμματισμού με συντελεστές διαστημάτων στην αντικειμενική συνάρτηση [12]. Σε αυτή την περίπτωση, ο περιορισμός της εξίσωσης (21) με συντελεστές c_i^\pm αντικαθίσταται από τις δυο παρακάτω ανισώσεις:

$$c_1^+ z_1 + \dots + c_k^+ z_k + c_{k+1}^+ y \geq 1 \quad (23)$$

$$c_1^- z_1 + \dots + c_k^- z_k + c_{k+1}^- y \leq 1 \quad (24)$$

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία αυτού του κεφαλαίου, το αρχικό μη γραμμικό πρόβλημα με την ενσωμάτωση διαστηματικής ανάλυσης γίνεται:

$$\min_x \left(\sum_{i=1}^t (w_1^\pm a_{1,i}^\pm - w_2^\pm a_{2,i}^\pm) x_i^\pm + \sum_{i=1}^t w_3^\pm a_{1,i}^\pm z_i \right) \quad (25)$$

με περιορισμούς:

$$a_{2,1}^\pm z_1 + \dots + a_{2,t}^\pm z_t = 1 \quad (26)$$

$$y - z_i \leq K - Kx_i^\pm, z_i \leq y, z_i \leq Kx_i^\pm, z_i \geq 0 \quad \forall i \quad (27)$$

$$J_{1,min}^{\pm} \leq \sum_{i=1}^t a_{1,i}^{\pm} x_i^{\pm} \leq J_{1,max}^{\pm} \quad (28)$$

$$J_{2,min}^{\pm} \leq \sum_{i=1}^t a_{2,i}^{\pm} x_i^{\pm} \leq J_{2,max}^{\pm} \quad (29)$$

$$J_{3,min}^{\pm} \leq \frac{\sum_{i=1}^t a_{1,i}^{\pm} x_i^{\pm}}{\sum_{i=1}^t a_{2,i}^{\pm} x_i^{\pm}} \leq J_{3,max}^{\pm} \quad (30)$$

όπου $y \geq 0$, $K > y$ και x_i^{\pm} δυαδικές μεταβλητές για κάθε i , $i = 1 \dots t$.

Για την επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητα τα πρόσημα των τελικών συντελεστών των μεταβλητών απόφασης, ώστε να προσδιοριστεί πώς ενσωματώνεται καθεμία στα μοντέλα που αφορούν το f^- και το f^+ . Αυτό δεν είναι πάντα απλό, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση είναι μη γραμμική ως προς τα x_i , επομένως τα πρόσημα αυτά εξαρτώνται από τη διατύπωση του συγκεκριμένου κάθε φορά προβλήματος. Θα πρέπει να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι οι συντελεστές c_i^{\pm} του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού με διαστήματα αντιστοιχούν στα x_i^{\pm} , ενώ οι συντελεστές w_i^{\pm} αντιστοιχούν στα J_j , δηλαδή είναι διαφορετικοί μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν η πρώτη παράγωγος και η μονοτονία της αντικειμενικής συνάρτησης προκειμένου να βρεθούν συγκεκριμένες συνθήκες τις οποίες ικανοποιούν τα πρόσημα, διαφορετικά θα μπορούσαν να δοκιμαστούν και να ελεγχθούν όλα τα δυνατά σενάρια για κάθε μεταβλητή απόφασης. Η εύρεση των συνθηκών αυτών διευκολύνεται σημαντικά από το γεγονός ότι οι μεταβλητές απόφασης είναι δυαδικές. Εάν υπάρχουν τυχόν συνέργειες θα πρέπει να προστεθούν οι μεταβλητές και περιορισμοί που σχετίζονται με το γινόμενο και το άθροισμα των κατάλληλων δυαδικών μεταβλητών, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.1.

3.3 Μελέτη περίπτωσης

Σε αυτή την ενότητα μελετάται ένα κτίριο του οικιακού τομέα που πρέπει να αναβαθμιστεί ενεργειακά και περιγράφονται οι παρεμβάσεις που μπορούν να υλοποιηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Η συγκεκριμένη κατοικία βρίσκεται σε αστική περιοχή με εύκρατο μεσογειακό κλίμα, δηλαδή ο καιρός είναι συνήθως ξηρός με ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, με θερμοκρασίες που ίσως ξεπερνούν ορισμένες φορές τους 40°C, ενώ το χειμώνα είναι ήπιος, χωρίς ιδιαίτερες χιονοπτώσεις και θερμοκρασίες που πέφτουν έως και τους 3°C. Πρόκειται συγκεκριμένα για ένα διαμέρισμα 75m², το οποίο βρίσκεται στον τελευταίο όροφο μιας πολυκατοικίας στα προάστια της πόλης, επομένως είναι προστατευμένο από τον αέρα, αλλά όχι πλήρως. Η οικία κατασκευάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980, επομένως οι προδιαγραφές του κτιρίου και των υλικών είναι ξεπερασμένες, ωστόσο ο προσανατολισμός του βοηθάει στην ελαχιστοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στο εσωτερικό και τα υπόλοιπα διαμερίσματα ενισχύουν τη μόνωση του

πατώματος. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω στοιχεία, μπορούν να υπολογιστούν ο συντελεστής θερμοπερατότητας του διαμερίσματος καθώς και οι ετήσιες ανάγκες ψύξης και θέρμανσης. Οι ιστορικές καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος συγκεντρώθηκαν από τους αντίστοιχους εκκαθαριστικούς λογαριασμούς.

Οι πιο διαδεδομένες παρεμβάσεις για τη βελτίωση της ψύξης και της θέρμανσης σε κτίρια του οικιακού τομέα περιλαμβάνουν την εξωτερική θερμομόνωση, την αντικατάσταση των κουφωμάτων με καινούρια, πιο αποδοτικά, καθώς και την εγκατάσταση αντλίας θερμότητας για την κάλυψη των αναγκών ψύξης και θέρμανσης. Άλλες δυνατές παρεμβάσεις θα μπορούσαν να είναι η χρήση γεωθερμίας σε μονοκατοικίες και η χρήση φυσικού αερίου αντί για πετρέλαιο θέρμανσης. Η οικία που εξετάζεται στην προκείμενη περίπτωση δεν έχει πρόσβαση στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου, καταναλώνει πετρέλαιο για τις ανάγκες θέρμανσης του χώρου και διαθέτει ηλιακό θερμοσίφωνα για την παροχή ζεστού νερού χρήσης.

Όσον αφορά τις παρεμβάσεις που σχετίζονται με τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, συνηθέστερες είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στο κτίριο, αφού το μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από ηλιοφάνεια και υπάρχουν οικονομικά κίνητρα σχετικά με τις αποζημιώσεις (feed in tariff), και η αντικατάσταση λαμπτήρων πυρακτώσεως και φθορισμού με λαμπτήρες LED. Οι συγκεκριμένοι λαμπτήρες είναι παγκοσμίως από τις πιο ευρέως διαδεδομένες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια του οικιακού τομέα καθώς έχουν λίγο μεγαλύτερο κόστος από τις λάμπες πυρακτώσεως, αλλά προσφέρουν την ίδια φωτεινότητα χρησιμοποιώντας πολύ λιγότερη ισχύ, όντας έως και δέκα φορές πιο αποδοτικές και έχοντας έως και δεκαπέντε φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Τα ίδια πλεονεκτήματα ισχύουν και συγκριτικά με τους λαμπτήρες φωτισμού σε μικρότερο ωστόσο βαθμό. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μιας κατοικίας μπορεί επίσης να μειωθεί αντικαθιστώντας παλιές συσκευές και εξοπλισμό με νεότερες, πιο αποδοτικές και πιο εξελιγμένες τεχνολογικά, αλλά αυτές οι μεμονωμένες αλλαγές δεν μπορούν να θεωρηθούν παρεμβάσεις στο κτίριο, με την εξαίρεση των λαμπτήρων στους οποίους οφείλεται μεγάλο μέρος της κατανάλωσης μιας κατοικίας.

Οι προτεινόμενες παρεμβάσεις για τη συγκεκριμένη κατοικία που εξετάζεται, μαζί με το αντίστοιχο κόστος κεφαλαίου και την ετήσια εξοικονόμηση χρημάτων, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1. Το κόστος κεφαλαίου κάθε παρέμβασης βασίζεται σε τιμές της αγοράς, έπειτα από αναζήτηση και συζήτηση με εταιρείες ενεργειακών υπηρεσιών που δραστηριοποιούνται σε αυτή την περιοχή. Ανάλογα με την περίοδο που θα πραγματοποιηθεί η ανακαίνιση, το κόστος κεφαλαίου μπορεί να μειωθεί περαιτέρω εάν χρησιμοποιούνται τυχόν ενεργά χρηματοδοτικά προγράμματα. Σε αυτή την περίπτωση ενδεχομένως τα αποτελέσματα να διαφέρουν ανάλογα με τους όρους ενός τέτοιου προγράμματος. Όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων, προκύπτει από τις προϋπάρχουσες ενεργειακές ανάγκες και τιμές σε συνδυασμό με την εκτιμώμενη μείωση που θα επιφέρει κάθε παρέμβαση. Ο χρόνος αποπληρωμής είναι ο λόγος του κόστους κεφαλαίου προς το ετήσιο όφελος.

Για παράδειγμα, αντικαθιστώντας λαμπτήρες πυρακτώσεως ισχύος 1000W με λαμπτήρες LED ισχύος 120W, το κόστος υπολογίζεται σε περίπου 65€ (ανάλογα με

την εταιρεία κατασκευής), αλλά το αποτέλεσμα είναι το ίδιο επίπεδο φωτεινότητας με 880W λιγότερης εγκατεστημένης ισχύος. Το μεταβλητό κόστος ηλεκτρισμού για το συγκεκριμένο κτίριο είναι 0,14 €/kWh, συμπεριλαμβάνοντας χρέωση προμήθειας, ρυθμιζόμενες χρεώσεις και όλους τους φόρους και τέλη. Υποθέτοντας για τους λαμπτήρες 6-6,5 ώρες λειτουργίας ανά ημέρα, η ετήσια εξοικονόμηση υπολογίζεται σε περίπου 277€. Ομοίως προκύπτουν το κόστος και η εξοικονόμηση όλων των υπόλοιπων διαθέσιμων παρεμβάσεων.

Σε περίπτωση που κάποιος επιθυμεί να αξιολογήσει λιγότερο διαδεδομένες ή πιο καινοτόμες παρεμβάσεις, οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες σε όλες τις περιοχές και για όλα τα κτίρια του οικιακού τομέα, αρκεί να υπολογιστεί το αρχικό τους κόστος κεφαλαίου και η εξοικονόμηση που θα προκύψει προκειμένου να ενσωματωθούν στο προτεινόμενο μοντέλο.

Πίνακας 3-1: Διαθέσιμες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας

Παρεμβάσεις Δεδομένα	Εξωτερική θερμολόμωση	Κουφώματα	Λαμπτήρες LED	Φωτοβολταϊκά	Αντλία θερμότητας
Κόστος Κεφαλαίου (€)	$a_{1,1} = 6000$	$a_{1,2} = 8000$	$a_{1,3} = 65$	$a_{1,4} = 6900$	$a_{1,5} = 1100$
Ετήσια Εξοικονόμηση (€)	$a_{2,1} = 1208$	$a_{2,2} = 1072$	$a_{2,3} = 277$	$a_{2,4} = 988$	$a_{2,5} = 325$

3.4 Αποτελέσματα

Προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος αλγόριθμος του λογισμικού GAMS. Το λογισμικό αυτό είναι ένα σύστημα μοντελοποίησης υψηλού επιπέδου, το οποίο χρησιμοποιείται διεθνώς για μοντελοποίηση καθώς είναι κατάλληλο για προβλήματα βελτιστοποίησης που είναι ιδιαίτερος πολύπλοκα ή μεγάλης κλίμακας [13]. Ο αλγόριθμος που επιλύθηκε για την επίλυση των προβλημάτων γραμμικού και μεικτού ακέραιου προγραμματισμού προκύπτει από τη μέθοδο CPLEX [14]. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα, ωστόσο η ίδια μεθοδολογία και οι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε παρόμοια αριθμητικά παραδείγματα ή μελέτες περίπτωσης. Ο χρόνος επίλυσης των παρακάτω παραδειγμάτων, στα οποία πέντε παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας αξιολογούνται με βάση τρία κριτήρια, είναι μικρότερος από ένα δευτερόλεπτο. Επομένως η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι αποδοτική και εφαρμόσιμη ακόμα και σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας που περιλαμβάνουν πολλές διαθέσιμες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας και πολλά κριτήρια αξιολόγησης.

Στα παραδείγματα που ακολουθούν το κόστος κεφαλαίου και η ετήσια εξοικονόμηση εκφράζονται αριθμητικά σε χιλιάδες ευρώ ώστε τα τρία κόστη να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους, διαφορετικά το κόστος J_1 θα κυριαρχούσε στην αντικειμενική συνάρτηση λόγω μεγαλύτερης κλίμακας μεγέθους. Εναλλακτικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συγκρισιμότητα μπορεί να επιτευχθεί εάν η κλίμακα μεγέθους κάθε κόστους ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας. Επιπλέον, στα παραδείγματα αυτά αλλά και γενικότερα στις περισσότερες

περιπτώσεις, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι ο συντελεστής της μεταβλητής x_2 είναι θετικός και της μεταβλητής x_3 αρνητικός. Τα πρόσημα των υπολοίπων συντελεστών εξαρτώνται από την εκάστοτε επιλογή των συντελεστών βαρύτητας. Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρέπει να τονιστεί ότι οι αλγόριθμοι συγκλίνουν στη βέλτιστη κάθε φορά τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά για τον αποφασίζοντα πρακτική σημασία έχουν οι αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών απόφασης που αντιπροσωπεύουν την επιλογή ή όχι κάθε παρέμβασης.

Στα πρώτα παραδείγματα (Πίνακας 3-2) το πρόβλημα επιλύεται υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει αβεβαιότητα, επομένως όλες οι παράμετροι έχουν συγκεκριμένες τιμές και για κάθε σενάριο προκύπτει η βέλτιστη λύση. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα δεδομένα είναι γνωστά και ο αποφασίζοντας είναι σίγουρος για τις προτιμήσεις και τους περιορισμούς του.

Πίνακας 3-2: Παραδείγματα χωρίς αβεβαιότητα

Παράμετροι			Βέλτιστη Απόφαση						
w_1	w_2	w_3	Περιορισμοί	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	J_{opt}
0.1	0.7	0.2	$J_{1,max} = 10, J_{2,min} = 0, J_{3,max} = 5$	1	0	1	0	1	-0.504
0.1	0.7	0.2	$J_{1,max} = 15, J_{2,min} = 0, J_{3,max} = 7$	1	0	1	1	1	-0.505
0.1	0.7	0.2	$J_{1,max} = 8, J_{2,min} = 0, J_{3,max} = 5$	0	0	1	0	1	-0.258
0.1	0.4	0.5	$J_{1,max} = 10, J_{2,min} = 0, J_{3,max} = 5$	0	0	1	0	1	-0.007

Όπως αναμενόταν, όσο περισσότερο αυστηροποιούνται οι περιορισμοί που τίθενται, τόσο περιορίζονται και οι εφικτές λύσεις του προβλήματος, επομένως η βέλτιστη λύση θα περιλαμβάνει την υλοποίηση λιγότερων παρεμβάσεων και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης χειροτερεύει. Το αντίθετο συμβαίνει όσο οι περιορισμοί χαλαρώνουν. Για παράδειγμα, η χαλάρωση των περιορισμών όσον αφορά το κόστος κεφαλαίου και το χρόνο αποπληρωμής ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο παράδειγμα, επηρεάζει την επιλογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων, παρ' όλο που η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μεταβάλλεται ελάχιστα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κόστος κεφαλαίου των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι μεγάλο, επομένως και ο συνολικός χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης αυξάνεται. Επιπλέον, η βαρύτητα που δίνεται σε κάθε κόστος στην αντικειμενική συνάρτηση είναι δυνατόν να επηρεάσει τη βέλτιστη λύση ακόμα και αν δεν μεταβληθούν οι περιορισμοί του προβλήματος. Για παράδειγμα, η διαφορά ανάμεσα στο πρώτο και το τελευταίο παράδειγμα του Πίνακα 3-2 είναι η αύξηση της σημασίας του χρόνου αποπληρωμής εις βάρος της ετήσιας εξοικονόμησης. Από αυτή την αλλαγή επηρεάζεται η επιλογή της εξωτερικής θερμομόνωσης, η οποία οδηγεί σε μεγάλη ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων αλλά απαιτεί υψηλό κόστος κεφαλαίου.

Στο επόμενο σύνολο παραδειγμάτων (Πίνακας 3-3) γίνεται η υπόθεση ότι αυτός που θα λάβει την απόφαση μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια τους περιορισμούς στο πρόβλημα, αλλά δεν είναι απολύτως σίγουρος για τους συντελεστές βαρύτητας που σχετίζονται με τις προτιμήσεις του. Επομένως η αντικειμενική

συνάρτηση περιλαμβάνει διαστηματικούς συντελεστές w_j^\pm για $j = 1, 2, 3$, ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές έχουν σταθερές τιμές.

Πίνακας 3-3: Παραδείγματα με αβεβαιότητα στους συντελεστές βαρύτητας

Παράμετροι			Βέλτιστη Απόφαση						
w_1^\pm	w_2^\pm	w_3^\pm	Περιορισμοί	x_1^\pm	x_2^\pm	x_3^\pm	x_4^\pm	x_5^\pm	J_{opt}^\pm
[0.3, 0.5]	[0.4, 0.6]	[0.1, 0.2]	$J_{1,max} = 10$ $J_{2,min} = 1.5$ $J_{3,max} = 6$	[1,1]	[0,0]	[1,1]	[0,0]	[1,1]	[1.087,2.905]
[0.1, 0.3]	[0.4, 0.7]	[0.2, 0.3]	$J_{1,max} = 15$ $J_{2,min} = 1$	[1,1]	[0,0]	[1,1]	[0,1]	[0,1]	[-0.505,1.296]

Από το πρώτο παράδειγμα προκύπτει ότι η βέλτιστη απόφαση μπορεί να μην επηρεάζεται τελικά από την αβεβαιότητα, ενώ από το δεύτερο παράδειγμα φαίνεται ότι η ευρωστία των λύσεων μειώνεται όσο αυξάνεται η αβεβαιότητα ή αλλάζουν οι περιορισμοί. Στο πρώτο παράδειγμα προτείνονται τρεις παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας παρ' όλο που ο αποφασίζων δεν είναι απολύτως βέβαιος για τη βαρύτητα κάθε κόστους. Οι παρεμβάσεις αυτές είναι η εξωτερική θερμομόνωση, οι λαμπτήρες LED και η εγκατάσταση αντλίας θερμότητας. Στο δεύτερο παράδειγμα, το εργαλείο καταλήγει ότι η αβεβαιότητα που υπάρχει επηρεάζει την επιλογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων και της αντλίας θερμότητας στην βέλτιστη λύση. Και στα δυο αυτά παραδείγματα η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων που εξαρτώνται από τις πιθανές τιμές των συντελεστών βαρύτητας, δηλαδή η τιμή J_{opt} μπορεί να μεταβάλλεται ακόμα και αν οι παρεμβάσεις εξοικονόμησης που θα επιλεγούν είναι δεδομένες. Σε αυτή την περίπτωση η βέλτιστη λύση μπορεί να θεωρηθεί εύρωστη καθώς ο αποφασίζων ενδιαφέρεται περισσότερο για την επιλογή των κατάλληλων παρεμβάσεων παρά για το εύρος τιμών της J_{opt} .

Τέλος, στον Πίνακα 3-4, γίνεται η υπόθεση ότι οι συντελεστές βαρύτητας είναι σταθεροί, αλλά υπάρχει αβεβαιότητα στους περιορισμούς και πιο συγκεκριμένα στα όρια που καθορίζονται από τον αποφασίζοντα. Επομένως, χρησιμοποιούνται διαστήματα για να εκφραστούν τα όρια $J_{j,max}^\pm$ και $J_{j,min}^\pm$ για $j = 1, 2, 3$.

Πίνακας 3-4: Παραδείγματα με αβεβαιότητα στους περιορισμούς

Παράμετροι			Βέλτιστη Απόφαση						
w_1	w_2	w_3	Περιορισμοί	x_1^\pm	x_2^\pm	x_3^\pm	x_4^\pm	x_5^\pm	J_{opt}^\pm
0.5	0.45	0.05	$J_{1,max} = 15$ $J_{2,min}^\pm = [1, 1.5]$	[1,1]	[0,0]	[1,1]	[0,0]	[0,1]	[2.376,2.780]
0.5	0.45	0.05	$J_{1,max}^\pm = [15, 20]$ $J_{2,min}^\pm = [1, 2.5]$	[1,1]	[0,0]	[1,1]	[0,1]	[0,1]	[3.303,7.775]

Παρατηρείται ότι ενώ η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να μην επηρεαστεί ιδιαίτερα από την αβεβαιότητα, η βέλτιστη λύση μπορεί να ποικίλλει. Στην περίπτωση του πρώτου παραδείγματος, που δεν υπάρχουν μεγάλες απαιτήσεις ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας, προκρίνονται μόνο οι παρεμβάσεις

I_1 και I_3 , δηλαδή η εξωτερική θερμομόνωση και οι λαμπτήρες LED. Εάν όμως απαιτηθεί περισσότερη εξοικονόμηση, πιθανόν λόγω κάποιου ρυθμιστικού ή νομοθετικού πλαισίου, θα πρέπει να επιλεγεί και η πέμπτη παρέμβαση που αφορά την εγκατάσταση αντλίας θερμότητας. Στο δεύτερο παράδειγμα, η αύξηση της αβεβαιότητας οδηγεί όπως αναμενόταν σε λιγότερο εύρωστη λύση. Το εύρος εντός του οποίου είναι η βέλτιστη λύση της αντικειμενικής συνάρτησης αυξάνεται, αλλά το σημαντικότερο είναι ότι αυξάνεται επίσης ο αριθμός των παρεμβάσεων που είναι αβέβαιο εάν πρέπει να επιλεγούν ή όχι. Μια εναλλακτική μέθοδος μελέτης της ευρωστίας της βέλτιστης λύσης θα μπορούσε να περιλαμβάνει την εξέταση πλήθους παραδειγμάτων με διαφορετικές σταθερές παραμέτρους, οι οποίες θα κάλυπταν όλο το εύρος της αβεβαιότητας. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική και τα παραδείγματα θα έπρεπε να επιλεγούν προσεκτικά ώστε να αποφευχθεί η λήψη ασυνάρτητων αποφάσεων.

Κρίνοντας από τα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν, η ύπαρξη αβεβαιότητας στους περιορισμούς ενδεχομένως επηρεάζει την ευρωστία της βέλτιστης λύσης περισσότερο από την ύπαρξη αβεβαιότητας στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας, τουλάχιστον όσον αφορά το συγκεκριμένο κτίριο. Ωστόσο, πρέπει να μελετηθούν περισσότερα παραδείγματα προκειμένου να επιβεβαιωθεί ένα αυτή η παρατήρηση ισχύει για άλλες περιπτώσεις ή κτίρια. Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, σε γενικές γραμμές δεν προτείνεται η αντικατάσταση των εξωτερικών κουφωμάτων με άλλα, ενεργειακά πιο αποδοτικά, για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας της οικίας, σε αντίθεση με την εγκατάσταση λαμπτήρων LED, οι οποίοι θεωρούνται μια πολύ προσιτή οικονομικά παρέμβαση που μπορεί να προσφέρει μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων και επομένως προκρίνονται σε όλα τα παραδείγματα. Η αντικατάσταση των κουφωμάτων ωστόσο θα μπορούσε να προταθεί για λόγους ηχομόνωσης εάν ο αποφασίζων ενσωμάτωνε και αυτό το κριτήριο στο μοντέλο, άρα η βέλτιστη λύση εξαρτάται κάθε φορά και από τη διατύπωση του προβλήματος.

Η ύπαρξη αβεβαιότητας στους περιορισμούς του προβλήματος και στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας ταυτόχρονα αναμένεται να λειτουργήσει προσθετικά επηρεάζοντας ακόμα περισσότερο την ευρωστία της βέλτιστης λύσης και δυσκολεύοντας ακόμα περισσότερο την τελική επιλογή των κατάλληλων παρεμβάσεων. Το προτεινόμενο πλαίσιο διευκολύνει τον αποφασίζοντα στην εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές συνθήκες επηρεάζουν τις βέλτιστες αποφάσεις. Εάν το πρόβλημα διατυπωνόταν και επιλυόταν σύμφωνα με το πιο πιθανό σενάριο, όλες οι παράμετροι θα ήταν σταθερές και δεν θα μπορούσε να καθοριστεί ποιες μεταβλητές απόφασης είναι πιο ευαίσθητες σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων.

3.5 Αναφορές τρίτου κεφαλαίου

- [1]. Nadarajan, M.; Kirubakaran, V. (2016) Simulation studies on small rural residential houses using sustainable building materials for thermal comfort–case comparison. *Adv. Build. Energy Res.*, 11, 193–207.
- [2]. Hobbs, B.F.; Meier, P. (2012) *Energy Decisions and the Environment: A Guide to the Use of Multicriteria Methods*; Springer Science & Business Media: New York, NY, USA; Volume 28.
- [3]. Hwang, C.L.; Masud, A.S.M. (2012) *Multiple Objective Decision Making—Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany; Volume 164.
- [4]. Marchi, B.; Ries, J.M.; Zanoni, S.; Glock, C.H. (2016) A joint economic lot size model with financial collaboration and uncertain investment opportunity. *Int. J. Prod. Econ.*, 176, 170–182.
- [5]. Zopounidis, C.; Doumpos, M. (2002) Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. *Eur. J. Oper. Res.*, 138, 229–246.
- [6]. Zavadskas, E.K.; Turskis, Z.; Kildienė, S. (2014) State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technol. Econ. Dev. Econ.*, 20, 165–179.
- [7]. Chen, D.S.; Batson, R.G.; Dang, Y. (2010) *Applied Integer Programming: Modeling and Solution*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
- [8]. Keeney, R.L.; Raiffa, H. (1993) *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*; Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- [9]. Moore, R.E.; Kearfott, R.B.; Cloud, M.J. (2009) *Introduction to Interval Analysis*; Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM): Philadelphia, PA, USA.
- [10]. Huang, G.H.; Baetz, B.W.; Patry, G.G. (1995) Grey integer programming: An application to waste management planning under uncertainty. *Eur. J. Oper. Res.*, 83, 594–620.
- [11]. Li, H.L. (1994) A global approach for general 0–1 fractional programming. *Eur. J. Oper. Res.*, 73, 590–596.
- [12]. Borza, M.; Rambely, A.S.; Saraj, M. (2012) Solving linear fractional programming problems with interval coefficients in the objective function. A new approach. *Appl. Math. Sci.*, 6, 3443–3459.
- [13]. McCarl, B.; Meeraus, A.; Van der Eijk, P. (2013) *McCarl Expanded GAMS User Guide*; GAMS Release 24.2.1; GAMS Development Corporation: Washington, DC, USA.
- [14]. GAMS Development Corporation (2013), Washington, DC, USA. *GAMS - The Solver Manuals*, GAMS Release 24.2.1.

4 Επιδοτούμενο πρόγραμμα περικοπής φορτίου σε αγορά ενέργειας διατυπωμένο ως παίγνιο Stackelberg

Σε αυτό το κεφάλαιο, το παίγνιο Stackelberg [1] που περιγράφηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο μοντελοποιείται υποθέτοντας ότι ένας προμηθευτής ενέργειας ανακοινώνει ένα πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου, το οποίο απευθύνεται σε διάφορους καταναλωτές, ώστε να μελετηθεί εάν και πώς μπορούν να επωφεληθούν από αυτό όλοι οι συμμετέχοντες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα. Κάθε παίκτης έχει τα δικά του χαρακτηριστικά τα οποία τον διαχωρίζουν από τους υπόλοιπους, όπως για παράδειγμα το επίπεδο της άνεσης που επιθυμεί και οι βασικές ενεργειακές ανάγκες που πρέπει να καλύψει, εάν είναι καταναλωτής, ή η συνάρτηση προσφοράς του και το κόστος προμήθειας, εάν είναι προμηθευτής. Το ζητούμενο είναι η βέλτιστη συμπεριφορά κάθε καταναλωτή βάσει της ανταμοιβής που του προσφέρεται και το τελικό όφελος κάθε παίκτη.

Ένας αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων αναπτύσσεται για την επίλυση του προβλήματος διεπίπεδου προγραμματισμού (bilevel programming) που διατυπώνεται και για την εύρεση των σημείων ισορροπίας Nash και Stackelberg, ώστε να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των κλασικών μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού. Για αυτό το λόγο ο αλγόριθμος πρέπει να συγκλίνει στη βέλτιστη για κάθε παίκτη λύση, λαμβάνοντας υπόψη τις δράσεις των υπολοίπων. Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι δεν είναι πολύ αποδοτικοί και αποτελεσματικοί όταν εφαρμόζονται σε σύνθετα προβλήματα μεγάλης κλίμακας, τα οποία προσομοιώνουν τη συμπεριφορά πολλών συμμετεχόντων σε μια αγορά. Επομένως αναπτύσσεται ένας μεταευρετικός αλγόριθμος PSO προκειμένου να επιλυθεί το διατυπωμένο παίγνιο Stackelberg που αναπαριστά την εφαρμογή του προγράμματος VLC. Στον αλγόριθμο UPSO που χρησιμοποιείται έχει προστεθεί μια προσέγγιση πολλαπλών σμηνών για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα ισορροπίας, δηλαδή διαφορετικά σμήνη επιλύουν ταυτόχρονα διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης και σε κάθε εκτέλεση του αλγόριθμου προκύπτει το άθροισμα των λύσεων όλων των σμηνών προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στην επόμενη επανάληψη. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος συνδυάστηκε επίσης και με μεθόδους πολλαπλασιαστών Lagrange (Lagrange Multiplier Methods) οδηγώντας σε αυξημένη αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Οι αλγόριθμοι που προέκυψαν δοκιμάστηκαν σε παραδείγματα προγραμμάτων VLC συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους με αυτά που προέκυψαν από αλγόριθμους του GAMS, ενός εξειδικευμένου λογισμικού που αναπτύχθηκε για την μοντελοποίηση και την επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης [2].

Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι εύκολα επεκτάσιμη, επομένως μπορεί να εφαρμοστεί και σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των παραδειγμάτων αυτού του κεφαλαίου υποδεικνύουν ότι ο αλγόριθμος είναι αρκετά αποδοτικός και αποτελεσματικός, ειδικά όσο αφορά την εύρεση σημείων ισορροπίας Nash, καθώς και ότι μέσω της εφαρμογής ενός κατάλληλου προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος της μείωσης της

συνολικής ενεργειακής ζήτησης και ταυτόχρονα να επωφεληθούν τόσο ο ηγέτης όσο και οι ακόλουθοι. Επομένως, αυτού του είδους τα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ευρέως προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία του συστήματος και να αποφευχθούν πιθανοί κίνδυνοι.

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάζεται και διατυπώνεται το πρόβλημα καθώς και οι υποθέσεις που έγιναν για να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες επίλυσής του. Στη συνέχεια περιγράφεται πρώτα το πλαίσιο μαθηματικού προγραμματισμού που αφορά τα διεπίπεδα προβλήματα και έπειτα ο κλασικός αλγόριθμος UPSO και οι επεκτάσεις που έγιναν σε αυτόν. Ακολουθεί η δοκιμή του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, αναλύοντας αριθμητικά παραδείγματα που αφορούν διαφορετικά προγράμματα οικειοθελούς περικοπής φορτίου.

4.1 Περιγραφή του προβλήματος

Σε μια αγορά ενέργειας, όπως και σε κάθε αγορά, υπάρχει μια συνάρτηση προσφοράς και μια συνάρτηση ζήτησης που αντιπροσωπεύουν τη συνολική προσφορά ενέργειας από όλους τους παραγωγούς και τη συνολική ζήτηση ενέργειας από όλους τους καταναλωτές αντίστοιχα. Αυτές οι συναρτήσεις θεωρείται ότι είναι γραμμικές για λόγους απλοποίησης του προβλήματος, χωρίς αυτό να επηρεάζει το θεωρητικό μοντέλο της αγοράς. Στην τομή αυτών των δυο συναρτήσεων βρίσκεται το σημείο ισορροπίας της αγοράς ενέργειας το οποίο αντιστοιχεί στην ποσότητα και την τιμή της ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί τελικά. Αυτό το σημείο ισορροπίας μπορεί να υπολογιστεί πριν γίνει η εκκαθάριση της αγοράς και ο ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός, καθώς η συνάρτηση προσφοράς προκύπτει από την αναμενόμενη έγχυση ενέργειας στην αγορά και η συνάρτηση ζήτησης μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας ιστορικά στοιχεία κατανάλωσης. Όταν η αιχμή του φορτίου ή η τιμή της ενέργειας αναμένεται να είναι πολύ υψηλή υπερβαίνοντας κάποιο καθορισμένο όριο, είναι θεμιτό να υπάρξει κάποια παρέμβαση ώστε η τελική ισορροπία να μετατοπιστεί σε χαμηλότερο σημείο για λόγους είτε οικονομικούς είτε σταθερότητας του συστήματος. Σε αυτή τη μετατόπιση μπορούν να βοηθήσουν τα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης και πιο συγκεκριμένα τα προγράμματα οικειοθελούς περικοπής φορτίου. Κάθε καταναλωτής γνωρίζει πόση ενέργεια αναμένεται να καταναλώσει για να καλύψει τις ανάγκες του και την κατανάλωσή του, καθώς και τη συνολική αναμενόμενη ζήτηση, μπορεί να την εκτιμήσει και ο προμηθευτής του χρησιμοποιώντας δεδομένα που προέρχονται από εγκατεστημένους σύγχρονους ηλεκτρονικούς μετρητές. Με βάση αυτά τα δεδομένα, ο καταναλωτής θα ανταποκριθεί στο πρόγραμμα χωρίς να μπορεί να δηλώσει αυθαίρετα την κατανάλωση που θα είχε υπό κανονικές συνθήκες με σκοπό να επωφεληθεί από μεγαλύτερη αποζημίωση. Τελικά, οι καταναλωτές οι οποίοι το κρίνουν συμφέρον και σκόπιμο θα περικόψουν οικειοθελώς μια ποσότητα ενέργειας, οπότε θα μειωθεί η συνολική κατανάλωση που θα προέκυπε για το σύστημα και το σημείο ισορροπίας θα είναι στην πραγματικότητα διαφορετικό από αυτό που είχε εκτιμηθεί αρχικά.

Επομένως με αυτόν τον τρόπο ομαλοποιείται η καμπύλη ζήτησης και αποφεύγονται οι ακραίες τιμές.

Το πιο σημαντικό στοιχείο ενός προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου είναι η ανταμοιβή που θα δοθεί στους συμμετέχοντες. Η αμοιβή αυτή είναι ένα είδος επιδότησης που λειτουργεί ως κίνητρο ώστε να πειστούν να μειώσουν την κατανάλωσή τους οικειοθελώς και μπορεί να παρέχεται είτε από κάποιο διαχειριστή που είναι υπεύθυνος για την εύρυθμη λειτουργία της αγοράς και την ασφάλεια του δικτύου, είτε από κάποιον προμηθευτή ενέργειας, εάν κρίνει ότι είναι σκόπιμο. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί εάν ο διαχειριστής του συστήματος υποχρεώσει τους προμηθευτές να μειώσουν τη ζήτησή τους ή εάν ο προμηθευτής κρίνει ότι δεν είναι συμφέρον οικονομικά να εξυπηρετήσει όλη τη ζήτηση των καταναλωτών που εκπροσωπεί, καθώς το κόστος μπορεί να είναι αυξημένο λόγω σφαλμάτων στην πρόβλεψη ζήτησης, τεχνικών προβλημάτων σε μονάδες παραγωγής κλπ. Επιπροσθέτως, ένα πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της συνολικής ζήτησης του συστήματος με στόχο την αναβολή κάποιων ιδιαίτερα ακριβών ενεργειακών επενδύσεων, αλλά απαιτείται να υπάρχει το κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο για να μην επιδράσει αυτό αρνητικά μακροπρόθεσμα. Δεδομένου ότι οι διαχειριστές των συστημάτων και των αγορών είναι ανεξάρτητοι εποπτευόμενοι φορείς οι οποίοι έχουν ρυθμιζόμενα κέρδη και δεν πρέπει να καταγράφουν ζημίες, είναι δύσκολο να συμμετάσχουν στην υλοποίηση ενός τέτοιου προγράμματος που θα οδηγούσε στην επιβολή ενός επιπλέον κόστους στους καταναλωτές, προκειμένου να χρηματοδοτηθούν οι κατάλληλες αμοιβές. Καθώς αυτή η λογική δεν θα μπορούσε εύκολα να δημιουργήσει το κατάλληλο κίνητρο στους καταναλωτές, η συνήθης πρακτική, η οποία ακολουθείται και σε αυτό το κεφάλαιο, είναι αυτά τα προγράμματα να υλοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα από τους προμηθευτές ενέργειας οι οποίοι έχουν άλλους τρόπους διαχείρισης τέτοιων χρηματοδοτικών εργαλείων.

Προκειμένου να μοντελοποιηθεί ένα πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κόστη και τα οφέλη που θα επιφέρει η διακοπή φορτίου σε κάθε παίκτη αυτού του προγράμματος. Όσον αφορά τους καταναλωτές, εκτός από το κόστος της ενέργειας που πληρώνουν με βάση την κατανάλωσή τους και το οποίο αναμένεται να μειωθεί από την εφαρμογή ενός τέτοιου προγράμματος, θα υπάρξει επίσης ένα όφελος από την αμοιβή που θα παραλάβουν λόγω της οικειοθελούς περικοπής αλλά και ένα νέο κόστος που θα προκύψει. Στην περίπτωση βιομηχανικών και εμπορικών καταναλωτών, αυτό το κόστος αντιπροσωπεύει τις οικονομικές απώλειες που θα προκληθούν από την περικοπή, επομένως μπορεί να ποσοτικοποιηθεί εύκολα, αλλά στην περίπτωση των οικιακών καταναλωτών πρόκειται για ένα κόστος άνεσης το οποίο δεν είναι μόνο οικονομικό. Το κόστος άνεσης είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη για να αποτυπωθεί ο δισταγμός ενός καταναλωτή να περιορίσει τη ζήτησή του, αφού σε αυτή την περίπτωση δεν θα μπορεί να πραγματοποιήσει όλες τις δραστηριότητες στο χρόνο που είχε προγραμματίσει και άρα θα αισθάνεται άβολα. Είναι ένα ποιοτικό κριτήριο το οποίο όμως πρέπει να ποσοτικοποιηθεί προκειμένου να ενσωματωθεί στα μαθηματικά μοντέλα και τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης οι οποίοι θα

χρησιμοποιηθούν. Η συνάρτηση κόστους άνεσης μπορεί να αναπαρασταθεί με βάση κάποιους μετρήσιμους δείκτες που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας, όπως για παράδειγμα η εσωτερική θερμοκρασία, οι ώρες μετακίνησης των προγραμματισμένων εργασιών κλπ.

Τελικά το όφελος αμοιβής και τα νέα κόστη που προκύπτουν πιθανόν να είναι είτε σταθερά, ανεξαρτήτως μεγέθους περικοπής, ή να εξαρτώνται, με γραμμικό ή μη γραμμικό τρόπο, από την ποσότητα της ενέργειας την οποία θα περικόψουν τελικά οι καταναλωτές. Το κόστος άνεσης διαφέρει για κάθε καταναλωτή, επομένως οι παράμετροί του διαφοροποιούνται ανά περίπτωση, όπως και η βέλτιστη απόκριση κάθε καταναλωτή σε ένα πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου. Αντίθετα, η αμοιβή εξαρτάται από τον προμηθευτή που υλοποιεί το πρόγραμμα και μπορεί να είναι ίδια για όλους ή ανά τύπο καταναλωτή. Σε κάθε περίπτωση, προκειμένου ένας καταναλωτής να συμμετάσχει σε ένα τέτοιο πρόγραμμα οικειοθελώς, η αμοιβή που θα λάβει θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το όποιο κόστος προκύψει για αυτόν.

Όσον αφορά έναν προμηθευτή ενέργειας, τα έσοδα προέρχονται κυρίως από την ποσότητα ενέργειας που παρέχει στους καταναλωτές που εκπροσωπεί βάσει συμβολαίων. Αυτή η ποσότητα μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές, αλλά πρακτικά πρόκειται για ενέργεια που, είτε την προμηθεύεται σε χαμηλότερες τιμές εξαιτίας μακροπρόθεσμων συμφωνιών που έχει υπογράψει, είτε την προμηθεύεται σε υψηλές τιμές επειδή προέκυψε κάποιο έκτακτο γεγονός. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει πάλι να φροντίσει να προμηθευτεί με οποιοδήποτε κόστος την ενέργεια που θα ζητηθεί από τους καταναλωτές που εκπροσωπεί. Ο διαχωρισμός αυτός σημαίνει ότι διαφέρουν οι συναρτήσεις κόστους για αυτές τις δυο κατηγορίες πηγών ενέργειας και ότι θα υπάρξει κάποιο όφελος εάν δε χρειαστεί τελικά να προμηθευτεί ο ίδιος ενέργεια σε πολύ υψηλές τιμές. Λόγω του φορτίου που θα περικοπεί υπάρχει και ένα επιπλέον κόστος για τον προμηθευτή, που αντιστοιχεί στην αμοιβή που θα πρέπει να δώσει στα πλαίσια του προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου. Σε κάθε περίπτωση, πριν την δημοσιοποίηση και εφαρμογή ενός προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου, ο προμηθευτής θα πρέπει να εξετάσει ποιο θα είναι το συνολικό του όφελος, ώστε να σχεδιαστεί το πρόγραμμα σωστά.

Συμπερασματικά, για οποιοδήποτε πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου, ο προμηθευτής και κάθε καταναλωτής θέλουν να ωφεληθούν, επομένως επιζητούν τη βελτιστοποίηση της δικής τους αντικειμενικής συνάρτησης. Ωστόσο, το πρόβλημα βελτιστοποίησης του προμηθευτή εξαρτάται από την απόκριση των καταναλωτών στην αμοιβή που θα ανακοινώσει, επομένως τα προβλήματα βελτιστοποίησης όλων των καταναλωτών προστίθενται στους περιορισμούς του προβλήματος του προμηθευτή και τελικά προκύπτει ένα παίγνιο Stackelberg στο οποίο ο προμηθευτής λειτουργεί ως ηγέτης.

4.2 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος

Στη συγκεκριμένη μελέτη γίνεται η υπόθεση ότι η αγορά αποτελείται από έναν προμηθευτή ενέργειας και n καταναλωτές, όπου n οποιοσδήποτε θετικός

ακέραιος αριθμός. Εάν η μεταβλητή q αντιπροσωπεύει την ποσότητα ενέργειας, η συνάρτηση προσφοράς από τη μεριά του προμηθευτή είναι $f_s = b_1 q$, $b_1 \geq 0$ και η συνολική συνάρτηση ζήτησης των καταναλωτών έχει τη μορφή $f_d = a_2 - b_2 q$ με $a_2, b_2 \geq 0$. Οι συναρτήσεις αυτές στην πραγματικότητα είναι μη γραμμικές αλλά για την απλοποίηση του προβλήματος γίνεται η υπόθεση ότι είναι γραμμικές συναρτήσεις της ποσότητας q , χωρίς αυτό να επηρεάζει την ακολουθούμενη μεθοδολογία. Το σημείο όπου η προσφορά ισούται με τη ζήτηση, δηλαδή $f_s = f_d$, είναι το εκτιμώμενο σημείο ισορροπίας της αγοράς όπου η τιμή p^* και η ποσότητα q^* , δίνονται από τις εξισώσεις $p^* = \frac{b_1 a_2}{b_1 + b_2}$ και $q^* = \frac{a_2}{b_1 + b_2}$ αντίστοιχα.

Κατά την υλοποίηση ενός προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου, ο καταναλωτής i στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του δικού του συνολικού κόστους. Επομένως το πρόβλημά του εκφράζεται ως $\min_{q_{d,i}, q_{c,i}}^i (p q_{d,i} + C_i - F_i)$, όπου η μεταβλητή $q_{d,i}$ αντιπροσωπεύει την ποσότητα της ενέργειας που χρησιμοποιεί τελικά ο καταναλωτής i , η μεταβλητή p αντιπροσωπεύει την τιμή της ενέργειας που θα καταναλώσει, η συνάρτηση $C_i(q_{c,i}) = c_{1,i} q_{c,i}^{n_i}$ εκφράζει το κόστος άνεσής του και η συνάρτηση $F(q_{c,i}) = r_1 q_{c,i}^m$ την αμοιβή που θα λάβει από τον προμηθευτή. Στις συναρτήσεις αυτές, οι οποίες θεωρείται ότι είναι πολυωνυμικές, ισχύει ότι $c_{1,i}, n_i, r_1, m \geq 0$ και η μεταβλητή $q_{c,i}$ αντιπροσωπεύει το φορτίο που θα περικοπεί από τον καταναλωτή i . Για το φορτίο αυτό ισχύει ότι $q_{c,i} = q_i^* - q_{d,i}$, όπου q_i^* είναι η ποσότητα που εκτιμάται ότι θα καταναλώσει ο πελάτης εάν δεν εφαρμοστεί το πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου. Κάθε καταναλωτής έχει τις δικές του βασικές ανάγκες και προτιμήσεις, επομένως υπάρχει μια συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας $q_{\min,i}$ την οποία δε θα δεχτεί οικειοθελώς να μην καταναλώσει ανεξαρτήτως αμοιβής, επομένως $q_{d,i} \geq q_{\min,i} \geq 0$. Όσον αφορά την τιμή p , σε κάποιες αγορές ενέργειας είναι σταθερή για έναν καταναλωτή, όπως για παράδειγμα στην ελληνική αγορά ηλεκτρισμού, ενώ σε άλλες είναι κυμαινόμενη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα στην ελληνική αγορά φυσικού αερίου. Στην περίπτωση σταθερής τιμής, είναι πολύ δύσκολο τα έκτακτα κόστη του προμηθευτή ή οι έκτακτες ανάγκες του συστήματος να γίνουν αντιληπτά από τον τελικό καταναλωτή, δημιουργώντας επομένως κινδύνους για την ασφαλή και ομαλή λειτουργία του συστήματος σε περιπτώσεις έντονων ή παρατεταμένων αιχμών και καθιστώντας τέτοιου είδους προγράμματα διαχείρισης ζήτησης ακόμα πιο σημαντικά. Στη συγκεκριμένη μελέτη γίνεται η υπόθεση ότι η τιμή προκύπτει από την εκκαθάριση της αγοράς, βάσει προσφοράς και ζήτησης, επομένως $p = b_1 q_d$, όπου η μεταβλητή $q_d = \sum_i q_{d,i}$ εκφράζει τη συνολική ζήτηση ενέργειας.

Επομένως κάθε καταναλωτής $i, i = 1, \dots, n$ καλείται να λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\min_{q_{d,i}, q_{c,i}}^i (p q_{d,i} + c_{1,i} q_{c,i}^{n_i} - r_1 q_{c,i}^m) \quad (1)$$

με τους περιορισμούς:

$$c_{1,i}q_{c,i}^{n_i} < r_1q_{c,i}^m \quad (2)$$

$$q_{c,i} = q_i^* - q_{d,i} \quad (3)$$

$$q_{d,i} \geq q_{\min,i} \quad (4)$$

και κοινό περιορισμό για όλους τους καταναλωτές:

$$p = b_1q_d = b_1 \sum_i q_{d,i} \quad (5)$$

Το παραπάνω πρόβλημα είναι ένα μη γραμμικό παίγνιο Nash μεταξύ των καταναλωτών. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών όλων των καταναλωτών, η οποία παρατηρείται στον περιορισμό (5) που είναι κοινός, είναι ένα παράδειγμα γενικευμένης ισορροπίας Nash (generalized Nash equilibrium) [3,4].

Από τη μεριά του, ο προμηθευτής που υλοποιεί το πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου επιθυμεί επίσης να ελαχιστοποιήσει το δικό του κόστος. Η συνολική ενέργεια που παρέχει στους καταναλωτές που εκπροσωπεί δίνεται από τη μεταβλητή q_s . Ισχύει επίσης ότι $q_s = q_{pr} + q_A$, όπου η μεταβλητή q_{pr} εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που προμηθεύεται σε φθηνή τιμή και η μεταβλητή q_A εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας που θα αναγκαστεί να προμηθευτεί σε ακριβότερη τιμή προκειμένου να καλύψει τη ζητούμενη ενέργεια. Η συνάρτηση κόστους για την φθηνή ενέργεια υποθέτουμε για λόγους απλοποίησης ότι είναι γραμμική και δίνεται από την εξίσωση $C_{pr}(q_{pr}) = c_{pr}q_{pr}$, $c_{pr} \geq 0$. Η ποσότητα q_{pr} έχει ένα άνω όριο q_{\max} το οποίο εκφράζει τη μέγιστη ποσότητα που μπορεί να εξασφαλιστεί σε χαμηλές τιμές μέσω μακροχρόνιων συμβάσεων ή παραγωγής, εάν ο προμηθευτής είναι καθετοποιημένος, άρα $q_{pr} \leq q_{\max}$. Το κόστος της ακριβής ενέργειας q_A υποθέτουμε ότι είναι τετραγωνικό και δίνεται από την εξίσωση $C_A(q_A) = c_Aq_A^2$, όπου $c_A \geq 0$. Αντίστοιχα, η συνολική αμοιβή που θα δοθεί στους καταναλωτές ως επιδότηση δίνεται από την εξίσωση $F = \sum_i F_i$ και αφορά την ποσότητα ενέργειας q_c η οποία θα περικοπεί συνολικά από το σύστημα. Επομένως το πρόβλημα του προμηθευτή είναι $\min_{q_{pr}, q_A, q_s, q_{c,i} \forall i} (C_{pr}(q_{pr}) + C_A(q_A) - pq_s + F)$, το οποίο έπειτα από την αντικατάσταση των συναρτήσεων κόστους και αμοιβής γίνεται $\min_{q_{pr}, q_A, q_s, q_{c,i} \forall i} (c_3q_{pr} + M(q_{\max} - q_{pr}) + c_4q_A^2 - pq_s + \sum_i r_1q_{c,i}^m)$, όπου το M είναι ένας αρκετά μεγάλος θετικός αριθμός, ώστε να διασφαλίζεται ότι ο προμηθευτής θα καταφύγει στην αγορά ακριβής ενέργειας μόνο εάν αυτό καταστεί απαραίτητο.

Όσον αφορά τους υπόλοιπους περιορισμούς, πρέπει να ισχύει $q_{pr}, q_A, q_s \geq 0$. Από τη μεριά του προμηθευτή, το άθροισμα της ποσότητας q_s με την οποία θα προμηθεύσει τους καταναλωτές του και της ποσότητας q_c που θα περικόψουν αυτοί οικειοθελώς, όπου $q_c = \sum_i q_{c,i}$, ισούται με την ποσότητα της ενέργειας που εκτιμάται ότι θα απαιτούνταν εάν δεν υλοποιούνταν το πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου και την οποία ο προμηθευτής μπορεί να υπολογίσει χρησιμοποιώντας τα ιστορικά στοιχεία κατανάλωσης τα οποία διαθέτει. Αυτό σημαίνει ότι $q_s + q_c = q^*$

και επαγωγικά προκύπτει ότι $q_{pr} + q_A + q_c = q^*$. Στο σημείο ισορροπίας της αγοράς η προσφορά ισούται με τη ζήτηση, άρα $q_s = q_d$ και η τιμή που προκύπτει από την εκκαθάριση της αγοράς είναι κοινή για όλους και δίνεται από την εξίσωση $p = b_1 q_s$.

Συμπερασματικά, ο προμηθευτής καλείται να βελτιστοποιήσει την αντικειμενική του συνάρτηση βασισόμενος στις αποφάσεις των καταναλωτών, οι οποίοι θα αξιολογήσουν πρώτα το πρόγραμμα και την προσφερόμενη αμοιβή. Συνήθως ο προμηθευτής έχει υπόψη του ένα συνολικό ποσό επιδότησης και με βάση αυτό ανακοινώνει την παράμετρο r_1 από την οποία εξαρτάται η αμοιβή κάθε καταναλωτή. Το πρόβλημα προς επίλυση, στο οποίο ο προμηθευτής είναι ο ηγέτης, μοντελοποιείται μαθηματικά ως:

$$\min_{q_{pr}, q_s, r_1} (C_{pr} + M(q_{max} - q_{pr}) + C_A - p q_s + F) \quad (6)$$

με τους περιορισμούς:

$$q_{pr} \leq q_{max} \quad (7)$$

$$q_s = q_{pr} + q_A \quad (8)$$

$$q_s + q_c = q^* \quad (9)$$

$$q_d = \sum_i q_{d,i} \quad (10)$$

$$q_c = \sum_i q_{c,i} \quad (11)$$

$$q_{pr}, q_s, q_A \geq 0 \quad (12)$$

$$\min^i_{q_{d,i}} (p q_{d,i} + C_i - F_i) \text{ όπου } C_i < F_i, q_{c,i} = q_i^* - q_{d,i}, q_{d,i} \geq q_{min,i} \forall i \quad (13)$$

$$q_s = q_d \quad (14)$$

$$p = b_1 q_s \quad (15)$$

Το παραπάνω πρόβλημα αντιπροσωπεύει ένα στατικό παίγνιο Stackelberg με μη γραμμικά κόστη. Η εξωτερική αντικειμενική συνάρτηση αντιστοιχεί στον ηγέτη του προβλήματος, ενώ οι εσωτερικές αντικειμενικές συναρτήσεις στους ακολούθους, δηλαδή τους καταναλωτές. Οι περιορισμοί (14) και (15) είναι κοινói και για τα δυο επίπεδα του προβλήματος, εξωτερικό και εσωτερικό, αφού προκύπτουν από τις συνθήκες εκκαθάρισης της αγοράς. Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι πρώτες αλγοριθμικές προσπάθειες για να επιλυθούν τέτοιου είδους προβλήματα ξεκίνησαν πριν αρκετά χρόνια, αλλά πλέον έχουν εξελιχθεί σημαντικά.

Για να απλοποιηθεί περαιτέρω η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, οι περιορισμοί ισότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αντικατασταθούν στις αντικειμενικές συναρτήσεις οι μεταβλητές που αυτοί περιλαμβάνουν. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να απαλειφθούν από το πρόβλημα οι μεταβλητές $q_S, q_A, q_{C,i}, p$, ωστόσο σε αυτή τη μελέτη δεν προτιμάται η συγκεκριμένη μοντελοποίηση καθώς οι μεταβλητές αυτές είναι χρήσιμες στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Το πρόβλημα τελικά είναι ένα παίγνιο Stackelberg ανάμεσα στον ηγέτη-προμηθευτή και τους ακόλουθους-καταναλωτές, οι οποίοι αποφασίζουν για την ποσότητα που θα περικόψουν οικειοθελώς παίζοντας ένα παίγνιο Nash μεταξύ τους, το οποίο βασίζεται στην αμοιβή που ανακοινώνει ο προμηθευτής και στις συναρτήσεις κόστους του καθενός. Σε περίπτωση που όλες οι χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις είναι κυρτές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν παραδοσιακές τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού προκειμένου να βρεθεί η τελική ισορροπία. Γενικά όμως τέτοιου είδους προβλήματα είναι δύσκολο να επιλυθούν καθώς τα κόστη προμήθειας ενέργειας, τα κόστη των καταναλωτών και η προσφερόμενη αμοιβή ενδεχομένως να προκύπτουν από μη κυρτές ή μη διαφορίσιμες συναρτήσεις. Τα παραδείγματα που επιλύονται στην Ενότητα 4.5 καλύπτουν και τις δυο περιπτώσεις προκειμένου να αξιολογηθεί συνολικά ο προτεινόμενος αλγόριθμος και να μελετηθούν οι αλληλεπιδράσεις των συμμετεχόντων.

4.3 Πλαίσιο Μαθηματικού Προγραμματισμού

Ένα μαθηματικό πρόβλημα με περιορισμούς ισορροπίας είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που οι περιορισμοί του περιλαμβάνουν άλλα προβλήματα βελτιστοποίησης τα οποία αντιπροσωπεύουν συνθήκες ισορροπίας. Η γενική μορφή ενός τέτοιου προβλήματος είναι:

$$\min f(x, y) \quad (16)$$

με τους περιορισμούς:

$$x \in \Omega \quad (17)$$

$$y \in S(x) \quad (18)$$

όπου $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ και $S(x)$ είναι ένα σύνολο λύσεων, το οποίο αντιπροσωπεύει έναν περιορισμό ισορροπίας. Ένα πρόβλημα προγραμματισμού δυο επιπέδων (bilevel programming problem) αποτελεί ειδική περίπτωση ενός MPEC, καθώς οι περιορισμοί στο πρόβλημα του άνω επιπέδου εξαρτώνται άμεσα από το σύνολο λύσεων των προβλημάτων του κάτω επιπέδου. Το MPEC που διατυπώθηκε στην προηγούμενη ενότητα αποτελείται από το εξωτερικό (άνω) πρόβλημα βελτιστοποίησης του προμηθευτή-ηγέτη και τα εσωτερικά (κάτω) αλληλοεξαρτώμενα προβλήματα

βελτιστοποίησης των καταναλωτών-ακολούθων. Επομένως, συνολικά προκύπτει μια εμφωλευμένη δομή.

Οι βέλτιστες λύσεις του προβλήματος ισορροπίας στο κάτω επίπεδο θα πρέπει να ικανοποιούν τις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (KKT), εφόσον μπορούν αυτές να διατυπωθούν [5,6]. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στη γενική του μορφή διατυπώνεται ως:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (19)$$

με τους περιορισμούς:

$$h(\mathbf{x}) = 0 \quad (20)$$

$$g(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (21)$$

όπου $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ είναι η μεταβλητή απόφασης, $f(\mathbf{x})$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση και $h(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$ είναι ισοτικοί και ανισοτικοί περιορισμοί αντίστοιχα. Οι συνθήκες KKT για αυτό το πρόβλημα είναι:

$$\nabla_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \nabla_{\mathbf{x}} h(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\mu}^T \nabla_{\mathbf{x}} g(\mathbf{x}) = 0 \quad (22)$$

$$h(\mathbf{x}) = 0 \quad (23)$$

$$g(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (24)$$

$$\boldsymbol{\mu}^T g(\mathbf{x}) = 0 \quad (25)$$

$$\boldsymbol{\mu} \geq 0 \quad (26)$$

όπου $f(\mathbf{x}), h(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$ είναι συναρτήσεις συνεχείς και διαφορίσιμες εντός της περιοχής εφικτών τιμών της μεταβλητής \mathbf{x} , το $\boldsymbol{\lambda}$ και το $\boldsymbol{\mu}$ είναι τα διανύσματα των πολλαπλασιαστών Lagrange για τις ισότητες και τις ανισότητες αντίστοιχα, ενώ το $\nabla_{\mathbf{x}}$ συμβολίζει το διαφορικό ως προς το \mathbf{x} . Οι περιορισμοί (24)-(26) είναι γνωστοί ως συνθήκες συμπληρωματικότητας (complementarity conditions) και μπορούν να εκφραστούν συνοπτικά ως:

$$0 \leq \boldsymbol{\mu} \perp g(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (27)$$

Προκειμένου οι συνθήκες KKT να μπορούν να διατυπωθούν, που είναι αναγκαία συνθήκη, πρέπει να ικανοποιούν κάποια συγκεκριμένη συνθήκη περιορισμών. Υπάρχουν αρκετές τέτοιες συνθήκες, πολλές από τις οποίες έχουν διατυπωθεί ειδικά για προβλήματα MPECs. Μία από τις απλούστερες, η οποία ικανοποιείται στο πρόβλημα που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, είναι η συνθήκη γραμμικής ανεξαρτησίας των περιορισμών (linear independence constraint

qualification - LICQ) [7]. Επιπροσθέτως, τα προβλήματα των ακολούθων έχει υποτεθεί ότι είναι κυρτά, επομένως οι συνθήκες ΚΚΤ είναι ταυτόχρονα και επαρκείς. Αυτό σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση τα προβλήματα βελτιστοποίησης του κάτω επιπέδου, τα οποία είναι ταυτόχρονα και περιορισμοί στο άνω πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορούν να αντικατασταθούν από τις αντίστοιχες συνθήκες ΚΚΤ.

Ακόμα και μετά την αντικατάσταση των κάτω προβλημάτων βελτιστοποίησης, το πρόβλημα που προκύπτει τελικά είναι περίπλοκο καθώς έχει μη κυρτή εφικτή περιοχή, οπότε είναι δύσκολο να επιλυθεί κυρίως λόγω των ισοτικών περιορισμών της εξίσωσης (25). Υπάρχουν ωστόσο κάποιες τεχνικές ώστε το πρόβλημα να απλοποιηθεί περαιτέρω, όπως η γραμμικοποίηση Fortuny-Amat McCarl [8]. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μεθοδολογία, οι συνθήκες συμπληρωματικότητας στην (27) μπορούν να αντικατασταθούν από το παρακάτω σύνολο γραμμικών περιορισμών:

$$0 \leq \mu \leq M\mathbf{u} \quad (28)$$

$$0 \leq -g(\mathbf{x}) \leq M(1 - \mathbf{u}) \quad (29)$$

όπου \mathbf{u} είναι διάνυσμα δυαδικών μεταβλητών και M είναι αρκετά μεγάλη σταθερά ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα αριθμητικά προβλήματα (ill-conditioning). Μέσω της τεχνικής αυτής ένα MPEC μπορεί να μετατραπεί σε ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού, το οποίο μπορεί να επιλυθεί ευκολότερα.

4.4 Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων

Από όταν παρουσιάστηκε ο πρώτος αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) [9], έχουν προταθεί πολλές παραλλαγές προκειμένου να βελτιωθεί η συμπεριφορά και η ταχύτητα σύγκλισης του αρχικού αλγόριθμου. Οι αλγόριθμοι σμήνους σωματιδίων έχουν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που συνδέονται γενικότερα με τους μεταερευνητικούς αλγόριθμους, αλλά είναι πολύ διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται σε όλα τα είδη δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης [10].

Σύμφωνα με την κλασική εκδοχή του αλγόριθμου, ένας πληθυσμός N σωματιδίων αρχικοποιείται εντός του χώρου λύσεων A και στη συνέχεια αυτά μετακινούνται επαναλαμβανόμενα εντός του. Για κάθε σωματίδιο του σμήνους, η μεταβολή της θέσης του ονομάζεται ταχύτητα $u_i, i = 1, \dots, N$ και η θέση του x_i αποτελεί υποψήφια λύση του προβλήματος. Κάθε σωματίδιο μπορεί να αποθηκεύσει τη βέλτιστη λύση p_i στην οποία έχει βρεθεί και όλα τα σωματίδια του σμήνους ενημερώνονται για τη βέλτιστη θέση p_g που έχει προκύψει συνολικά κάθε φορά. Σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου, η ταχύτητα κάθε σωματιδίου ανανεώνεται βάσει των πληροφοριών που έχουν προκύψει από τις προηγούμενες, λαμβάνοντας υπόψη και την ολικά βέλτιστη λύση που είναι σε ισχύ. Η μαθηματική διατύπωση των

μεταβολών της ταχύτητας και της θέσης κάθε σωματιδίου i δίνεται σε διανυσματική μορφή από τις εξισώσεις:

$$u_i(t + 1) = \chi \left[u_i(t) + c_1 R_1 (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 R_2 (p_g(t) - x_i(t)) \right] \quad (30)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + u_i(t + 1) \quad (31)$$

όπου t είναι ο μετρητής των επαναλήψεων του αλγόριθμου, R_1 και R_2 είναι τυχαία διανύσματα με στοιχεία ομοιόμορφα κατανομημένα εντός του διαστήματος $[0,1]$, c_1 και c_2 είναι συντελεστές βαρύτητας που επηρεάζουν την ικανότητα αναζήτησης του σμήνους μέσω της μεταβολής της ταχύτητας ή του εύρους της αναζήτησης και χ είναι μια παράμετρος που λειτουργεί ως συντελεστής αδράνειας [11].

Σε αυτή την μελέτη χρησιμοποιείται μια παραλλαγή της PSO, η οποία ονομάζεται ενοποιημένη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (UPSO) [12]. Η παραλλαγή αυτή συνδυάζει τις ιδιότητες της κλασικής PSO με μια τροποποίηση που επιτρέπει να ληφθεί υπόψη η γειτονιά κάθε σωματιδίου. Ο όρος γειτονιά σημαίνει ότι κάθε σωματίδιο ανήκει σε μια μικρότερη ομάδα, δηλαδή σε ένα υποσύνολο του σμήνους, οπότε κάποιες πληροφορίες μπορούν να ανταλλάσσονται αποκλειστικά μεταξύ των μελών αυτής της ομάδας. Με αυτή την έννοια, η εξίσωση (30) αντιπροσωπεύει τη συνολική ταχύτητα του σμήνους, ενώ η τοπικά βέλτιστη λύση p_i που προκύπτει από τα μέλη μιας γειτονιάς σωματιδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντίστοιχα για να προκύψει η τοπική ταχύτητα των σωματιδίων που ανήκουν σε αυτό το υποσύνολο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο διαχωρισμός των σωματιδίων σε υποσύνολα θα γίνει βάσει της σειράς αρχικοποίησής τους, αλλά θα μπορούσε να επιλεγεί και οποιοδήποτε άλλο κριτήριο ομαδοποίησης, το οποίο επηρεάζει τον προσδιορισμό του τοπικού βέλτιστου σημείου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο η ολικά όσο και η τοπικά βέλτιστες λύσεις χρησιμοποιούνται σε κάθε επανάληψη για την ανανέωση της ταχύτητας των σωματιδίων, αλλά όχι άμεσα και στην μεταβολή της θέσης τους. Με αυτόν τον τρόπο, τα σωματίδια κατευθύνονται εμμέσως προς τις περισσότερο υποσχόμενες περιοχές του χώρου αναζήτησης, χωρίς όμως να τους επιβληθεί η μετακίνηση αυτή, γεγονός που θα οδηγούσε πιθανώς σε εγκλωβισμό γύρω από τοπικές υποβέλτιστες λύσεις ή στην παράλειψη άλλων υποσχόμενων περιοχών λύσεων. Στον αλγόριθμο UPSO η επιρροή του ολικού και του τοπικού βέλτιστου στην μεταβολή της ταχύτητας, που αντιπροσωπεύεται από τις συναρτήσεις G_i και L_i αντίστοιχα, ελέγχεται από μια παράμετρο u που ονομάζεται συντελεστής ενοποίησης. Επομένως, η μεταβολή της ταχύτητας σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου δίνεται από την εξίσωση:

$$u_i(t + 1) = uG_i(t + 1) + (1 - u)L_i(t + 1) \quad (32)$$

Το τμήμα της εξίσωσης αυτής που σχετίζεται με το ολικό βέλτιστο ελέγχει τις ιδιότητες εκμετάλλευσης της ατελούς λύσης του αλγορίθμου, ενώ το τμήμα που σχετίζεται με το τοπικό βέλτιστο τις ιδιότητες εξερεύνησης του χώρου λύσεων αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος UPSO προτιμάται στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς περιέχει μια επέκταση που βελτιώνει τον κλασικό αλγόριθμο PSO. Πρόκειται για μια

πολλά υποσχόμενη παραλλαγή του, ωστόσο η επιλογή της παραμέτρου u εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και καθορίζει την αποδοτικότητα του αλγόριθμου [12].

Προκειμένου να αποφευχθεί ο πρόωρος τερματισμός του αλγόριθμου αλλά και περιττές επαναλήψεις του αφού έχει ήδη συγκλίνει στη λύση, πρέπει να εισαχθεί ένα κατάλληλο κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου. Υπάρχουν αρκετά δοκιμασμένα κριτήρια τερματισμού για στοχαστικούς αλγόριθμους, όπως ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και η ανεκτικότητα (tolerance) [13]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται το κριτήριο του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων για να μελετηθεί η επαναληπτική μετακίνηση των σωματιδίων στο χώρο λύσεων, αλλά προστίθεται και ένα δυναμικό κριτήριο τερματισμού που εξαρτάται από τη μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου, ώστε να βελτιωθεί και ο χρόνος εκτέλεσης.

Οι τυπικοί αλγόριθμοι PSO και UPSO βελτιστοποιούν προβλήματα που δεν υπόκεινται σε περιορισμούς. Προκειμένου να επιλυθεί ένα πρόβλημα με περιορισμούς, ένας τρόπος είναι να αντικατασταθεί η αντικειμενική του συνάρτηση με μια μεταβαλλόμενη συνάρτηση ποινής (penalty function), ώστε να αποφευχθούν οι μη εφικτές λύσεις [10,14]. Οι συναρτήσεις ποινής είναι από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους για επίλυση προβλημάτων με περιορισμούς καθώς δεν απαιτούν υποθέσεις σχετικές με τη συνέχεια και τη διαφορισιμότητα των συναρτήσεων. Για ένα γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς της μορφής:

$$\min f(x) \quad (33)$$

με τους περιορισμούς:

$$g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, k \quad (34)$$

η συνάρτηση ποινής που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη έχει τη μορφή:

$$F(x) = f(x) + h(t)H(x) \quad (35)$$

όπου $f(x)$ είναι η αρχική αντικειμενική συνάρτηση, $h(t)$ είναι ένας συντελεστής ποινής που εξαρτάται κάθε φορά από τον αριθμό της επανάληψης του αλγόριθμου και $H(x)$ είναι μια συνάρτηση ποινής της μορφής:

$$H(x) = \sum_k [\theta(q_i(x))q_i(x)^{\gamma(q_i(x))}] \quad (36)$$

όπου $q_i(x) = \max \{0, g_i(x)\}$, $\theta(q_i(x))$ είναι μια συνάρτηση αντιστοίχισης και $\gamma(q_i(x))$ είναι η δύναμη της συνάρτησης ποινής.

Οι συναρτήσεις ποινής είναι ευρέως αποδεκτές, όμως έχουν δυο σημαντικά μειονεκτήματα. Αυτά είναι ότι συνήθως οδηγούν σε χαμηλό ρυθμό σύγκλισης και, ακόμα πιο σημαντικό, ότι υψηλές τιμές του συντελεστή ποινής $h(t)$ μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα στην ευαισθησία των συναρτήσεων (ill-conditioning). Για αυτό το λόγο, υπό την προϋπόθεση της κυρτότητας, δοκιμάζεται σε αυτή τη μελέτη ακόμα μια παραλλαγή του αλγόριθμου UPSO, η οποία συνδυάζει τη βελτιστοποίηση σωματιδίων σμήνους με τις μεθόδους πολλαπλασιαστών Lagrange που εμπεριέχουν τόσο την ιδέα της ποινής όσο και τη φιλοσοφία πρωτεύοντος και δυτικού προβλήματος [5]. Σε αυτές τις μεθόδους, η συνάρτηση ποινής δεν προστίθεται στην αντικειμενική

συνάρτηση αλλά στη συνάρτηση Lagrange οδηγώντας σε μια επαυξημένη συνάρτηση Lagrange.

Για τη γενική μορφή ενός πρόβλημα βελτιστοποίησης σύμφωνα με την εξίσωση (3), εάν χρησιμοποιηθεί η τετραγωνική μέθοδος ποινής, η επαυξημένη συνάρτηση Lagrange L_a δίνεται από την εξίσωση:

$$L_c(x, \lambda, \mu) = f(x) + \lambda' h(x) + \frac{c}{2} \|h(x)\|^2 + \frac{1}{2c} \sum_j \left\{ \left(\max\{0, \mu_j + c g_j(x)\} \right)^2 - \mu_j^2 \right\} \quad (37)$$

όπου τα διανύσματα λ και μ είναι τα διανύσματα πολλαπλασιαστών Lagrange για ισότητες και ανισότητες αντίστοιχα, ο δείκτης j εκφράζει την j -οστή συνιστώσα του διανύσματος μ και c είναι μια θετική παράμετρος ποινής.

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την επίλυση μια ακολουθία προβλημάτων της μορφής:

$$\min L_{c^k}(x, \lambda^k, \mu^k) \quad (38)$$

με τον περιορισμό:

$$x \in X \quad (39)$$

όπου δίνονται αρχικές τιμές στην παράμετρο c^0 και τα διανύσματα λ^0, μ^0 και η ακολουθία εξελίσσεται ως εξής:

$$0 < c^k < c^{k+1}, \forall k, c^k \rightarrow \infty \quad (40)$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + c^k h[x(\lambda^k, \mu^k, c^k)] \quad (41)$$

$$\mu_j^{k+1} = \max\{0, \mu_j^k + c_k g_j[x(\lambda^k, \mu^k, c^k)]\} \quad (42)$$

Οι αρχικές τιμές που επιλέγονται καθορίζουν την αποδοτικότητα του αλγόριθμου, ωστόσο δεν είναι απαραίτητο να προσεγγίσει η παράμετρος c_k το άπειρο προκειμένου να συγκλίνει η μέθοδος. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί το πρόβλημα ill-conditioning που αναφέρθηκε και λαμβάνοντας υπόψη τον βελτιωμένο βαθμό σύγκλισης, η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι πολύ πιο αποτελεσματική από τις απλές μεθόδους ποινής. Για να επιλυθεί αυτή η ακολουθία προβλημάτων βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος UPSO. Το πλεονέκτημα, όπως αναφέρθηκε ήδη, είναι ότι οι αλγόριθμοι σμήνους σωματιδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν με οποιαδήποτε αντικειμενική συνάρτηση, αν και η μέθοδος των πολλαπλασιαστών προϋποθέτει ορισμένες παραδοχές για να είναι αποτελεσματική.

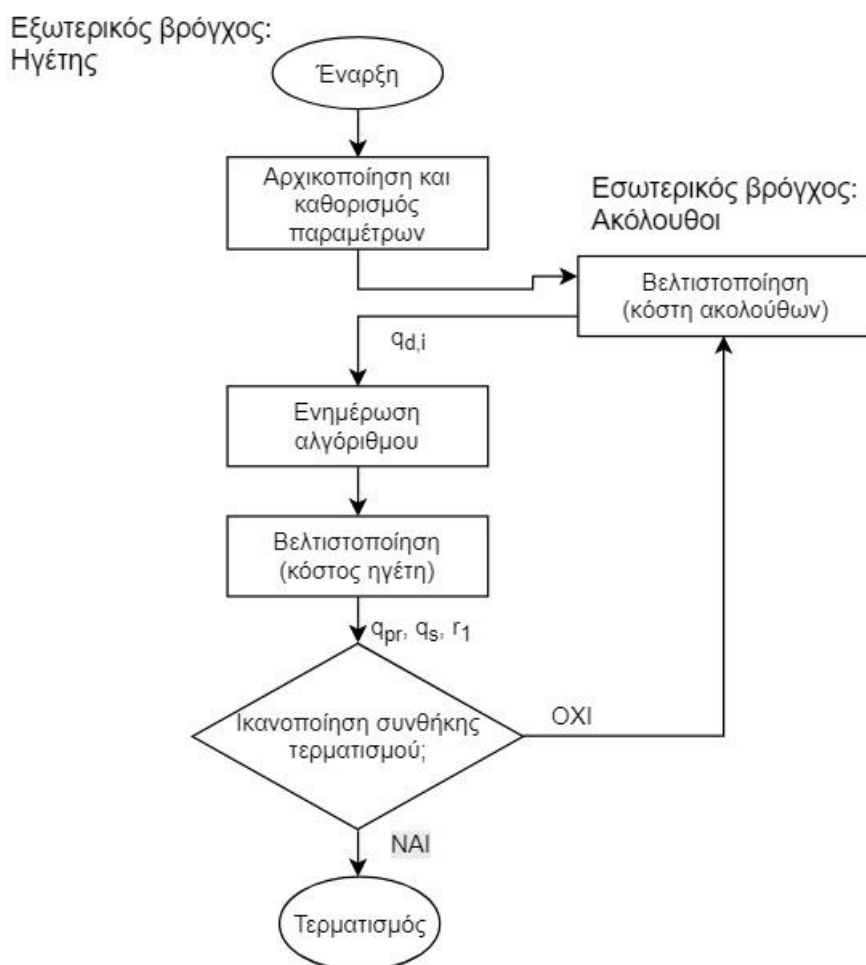
Οι κλασικοί αλγόριθμοι PSO, επομένως και η παραλλαγή UPSO, μπορούν να επιλύσουν ένα μονό πρόβλημα βελτιστοποίησης, άρα πρέπει να επεκταθούν προκειμένου να αντιμετωπίσουν προβλήματα εύρεσης ισορροπιών σε παίγνια Nash και Stackelberg όπου συμμετέχουν πολλοί παίκτες. Στα παίγνια Nash ιδιαίτερα, οι παίκτες αποφασίζουν ταυτόχρονα τις δράσεις τους βασιζόμενοι στις στρατηγικές των υπόλοιπων παικτών. Επιπλέον, στο πρόβλημα που περιεγράφηκε σε αυτό το κεφάλαιο τα προβλήματα βελτιστοποίησης των παικτών είναι αλληλένδετα μεταξύ

τους καθώς οι αποφάσεις τους επηρεάζουν τη συνολική ζήτηση ενέργειας και συνακόλουθα την τελική τιμή. Γίνεται λοιπόν η υπόθεση ότι κάθε καταναλωτής ενημερώνεται για τη συνολική ζήτηση του συστήματος και τα εσωτερικά προβλήματα βελτιστοποίησης που διατυπώθηκαν με την (13) επιλύονται ταυτόχρονα από διαφορετικά σμήνη σωματιδίων με δεδομένη την παράμετρο της προσφερόμενης ανταμοιβής. Κάθε καταναλωτής γνωρίζει τη δική του εκτιμώμενη ζήτηση και τις αποφάσεις του, δεδομένης λοιπόν της συνολικής ζήτησης μπορεί να υπολογίσει το άθροισμα της ζήτησης των υπολοίπων παικτών και έτσι να βελτιστοποιήσει τη δική του αντικειμενική συνάρτηση. Έπειτα, κάθε επανάληψη οδηγεί σε επικαιροποίηση της συνολικής ζήτησης και τιμής, τις οποίες λαμβάνει πάλι υπόψη προκειμένου να προσαρμόσει κατάλληλα την απόφασή του. Η διαδικασία αυτή προσομοιάζει ένα δυναμικό παίγνιο και επαναλαμβάνεται μέχρι οι αποφάσεις όλων των καταναλωτών να συγκλίνουν σε μια ισορροπία κατά Nash. Η υπόθεση ότι ένας καταναλωτής ενημερώνεται για τη συνολική ζήτηση, αλλά όχι για τις επιμέρους αποφάσεις κάθε άλλου παίκτη, είναι συνεπής και με τη λειτουργία μιας αγοράς ενέργειας καθώς τέτοιου είδους πληροφορίες είναι διαθέσιμες στους συμμετέχοντες.

Η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε παίγνια Stackelberg. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης στο εσωτερικό επίπεδο μπορούν να επιλυθούν με πολλαπλά αλληλένδετα σμήνη σωματιδίων, όπως περιεγράφηκε, και τα αποτελέσματα αυτά θα γίνουν διαθέσιμα στον ηγέτη ο οποίος στη συνέχεια θα καθορίσει την προσφερόμενη αμοιβή. Η διαδικασία αυτή θα επαναλαμβάνεται έως ο ηγέτης μείνει ικανοποιημένος από το τελικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος βασίζεται κυρίως στις συνεχείς δοκιμές παρά σε έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Σκοπός είναι η σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας με το πλαίσιο μαθηματικού προγραμματισμού για προβλήματα δύο επιπέδων, επομένως τα εσωτερικά προβλήματα βελτιστοποίησης αντικαθίστανται σε αυτή τη μελέτη με τις αντίστοιχες ΚΚΤ συνθήκες, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.3, και το πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς, το οποίο προκύπτει, επιλύεται με έναν αλγόριθμο UPSO. Όπως και στον μαθηματικό προγραμματισμό, το πρόβλημα που προκύπτει είναι δύσκολο να επιλυθεί κυρίως λόγω των περιορισμών της εξίσωσης (25). Προκειμένου να απλοποιηθεί το πρόβλημα, έγινε εκμετάλλευση της δομής του συγκεκριμένου προγράμματος καθώς κάποιες μεταβλητές και πολλαπλασιαστές Lagrange μπορούν να αποφασιστούν εύκολα χωρίς να απαιτείται βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (για παράδειγμα, η ποσότητα q_{pr} είναι φθηνότερη από την ποσότητα q_A , άρα η πρώτη θα είναι ίση είτε με τη συνολική ζήτηση των καταναλωτών είτε με την οριακή ποσότητα q_{max} , αναλόγως αν ο περιορισμός (7) είναι δεσμευτικός ή όχι).

Το παρακάτω εποπτικό διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθόδου αποτυπώνει τη σειρά των βημάτων του αλγόριθμου:

Διάγραμμα 4-1: Εποπτικό διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας



4.5 Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγόριθμου μέσω της επίλυσης μερικών αριθμητικών παραδειγμάτων (με στρογγυλοποίηση στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο). Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από τη χρήση των τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.3. Επιπλέον, μελετώντας τις λύσεις που προκύπτουν μπορεί να αξιολογηθεί εάν ένα πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου θα ήταν αποτελεσματικό σε μια αγορά ενέργειας καθώς και πώς θα επηρεάζοταν κάθε παίκτης από την εφαρμογή του.

Οι παράμετροι του αλγόριθμου UPSO είναι αυτές του σύγχρονου πρότυπου αλγόριθμου PSO [15] και επιλέχθηκε η τιμή $u = 0,5$ ώστε ο αλγόριθμος να είναι ισορροπημένος μεταξύ του τοπικού και του ολικού τμήματός του. Η ακτίνα γειτνίασης θεωρήθηκε ίση με 1 και το μέγεθος του σμήνους ίσο με 10. Επιπλέον παραδείγματα με διαφορετικές τιμές παραμέτρων μπορούν να εξεταστούν, ώστε να μελετηθεί πώς επηρεάζουν οι τιμές αυτές την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Στα παραδείγματα που χρησιμοποιήθηκε ο τροποποιημένος αλγόριθμος UPSO με

εισαγωγή ποινής (modified Penalty UPSO) σύμφωνα με τις (35) και (36), οι τιμές των παραμέτρων ποινής βασίστηκαν σε αποτελέσματα μελετών όπου έχουν δοκιμαστεί τέτοιου είδους συναρτήσεις [10,14]. Ωστόσο, η τιμή ποινής $h(t)$ που χρησιμοποιήθηκε αυξήθηκε έπειτα από δοκιμές προκειμένου να αποφευχθούν κάποια προβλήματα ευαισθησίας και παραβίασης των περιορισμών που παρατηρήθηκαν. Στα παραδείγματα που επιλύθηκαν με τον τροποποιημένο αλγόριθμο UPSO με χρήση πολλαπλασιαστών (modified Multiplier UPSO) σύμφωνα με την (38), προτιμήθηκε η τετραγωνική συνάρτηση ποινής που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.4. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγόριθμου ορίστηκε ίσος με 800 και προστέθηκε επιπλέον κριτήριο τερματισμού που ενεργοποιείται όταν η μεταβολή στην αντικειμενική συνάρτηση είναι μικρότερη από 10^{-5} για 100 συνεχόμενες επαναλήψεις. Οι παράμετροι τερματισμού μπορούν να αλλάζουν ανάλογα με την ποιότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Αρχικά παρουσιάζονται παραδείγματα με σημεία ισορροπίας Nash. Γίνεται η υπόθεση ότι ο ηγέτης του προβλήματος θέλει απλώς να μελετήσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ακολούθων χωρίς να βελτιστοποιεί τη δική του αντικειμενική συνάρτηση. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να πειραματιστεί με διάφορα σχήματα επιδοτήσεων που θα οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα ζήτησης από την πλευρά των καταναλωτών. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση επιλύεται ένα παίγνιο Nash μεταξύ των ακολούθων όπου αναζητείται το σημείο ισορροπίας. Στα παραδείγματα που ακολουθούν παρουσιάζονται μόνο οι τιμές που προκύπτουν για τις μεταβλητές απόφασης $q_{d,i}$ καθώς οι υπόλοιπες μπορούν να υπολογιστούν εύκολα στη συνέχεια. Ο αλγόριθμος είναι στοχαστικός, οπότε οι τιμές που παρουσιάζονται αντιπροσωπεύουν τις μέσες λύσεις 20 πειραμάτων.

Στη συνέχεια επιλύονται δυο παραδείγματα παίγνιων Stackelberg, όπου ένας ηγέτης προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την επιδότηση που θα προσφέρει με βάση την αντίδραση δυο καταναλωτών. Σε αυτά τα παραδείγματα οι μεταβλητές απόφασης είναι η παράμετρος της επιδότησης, η ζήτηση κάθε καταναλωτή και η ποσότητα προσφερόμενης ενέργειας σε χαμηλή τιμή. Τέλος, επιλύεται ένα πιο σύνθετο πρόβλημα με έναν ηγέτη, δεκαπέντε ακόλουθους και δυο διαφορετικές προσφερόμενες επιδοτήσεις. Στις αγορές ενέργειας υπάρχουν πολλοί συμμετέχοντες που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τα χαρακτηριστικά τους, άρα το τελευταίο παράδειγμα είναι το πιο ρεαλιστικό και χρήσιμο για να μελετηθούν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων παικτών.

Για την επίλυση των παραδειγμάτων στο λογισμικό GAMS χρησιμοποιείται το πρόγραμμα DICOPT, το οποίο είναι κατάλληλο για προβλήματα μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP). Ο αλγόριθμος MINLP εντός του DICOPT επιλύει μια σειρά υπο-προβλημάτων NLP και MIP με τη χρήση άλλων μεθόδων όπως η CONOPT και η CPLEX αντίστοιχα [16]. Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν στη συνέχεια, όπου είναι δυνατό, με αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή του πλαισίου μαθηματικού προγραμματισμού.

4.5.1 Ισορροπία Nash δυο καταναλωτών

Έστω ότι υπάρχουν δυο ακόλουθοι με συνολική εκτιμώμενη ζήτηση ίση με δώδεκα μονάδες (έξι για τον κάθε καταναλωτή) και ότι $b_1 = 10$. Επιπλέον, έστω ότι η επιδότηση που τους παρέχεται δίνεται από μια γραμμική συνάρτηση, άρα $m = 1$. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για το Παράδειγμα 1 είναι: $r_1 = 11$, $c_{1,1} = 4$, $c_{1,2} = 2,5$, $n_1 = n_2 = 1$, $q_{min,1} = 4,1$, $q_{min,2} = 3,7$. Αντίστοιχα στο Παράδειγμα 2: $r_1 = 10$, $c_{1,1} = 7$, $c_{1,2} = 5$, $n_1 = 1$, $n_2 = 2$, $q_{min,1} = 3$, $q_{min,2} = 3,2$ και στο Παράδειγμα 3: $r_1 = 6$, $c_{1,1} = 3,5$, $c_{1,2} = 4$, $n_1 = n_2 = 2$, $q_{min,1} = q_{min,2} = 2,5$. Σε αυτά τα απλά παραδείγματα δοκιμάζονται γραμμικές και μη γραμμικές συναρτήσεις κόστους άνεσης των καταναλωτών, τόσο με την παραλλαγή UPSO με ποινή, όσο και με πολλαπλασιαστές, καθώς όλες οι υποθέσεις εφαρμογής τους ισχύουν. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από το GAMS. Στους δυο τροποποιημένους αλγόριθμους UPSO χρησιμοποιείται η ίδια τιμή ποινής. Οι αρχικές τιμές των λ^0, μ^0 επιλέχθηκαν τυχαία.

Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μεταβλητές απόφασης $q_{d,i}$. Παρατηρείται ότι και οι δυο προτεινόμενοι αλγόριθμοι συγκλίνουν στις βέλτιστες λύσεις του GAMS αφού οι διαφορές μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, ειδικά για την παραλλαγή με τους πολλαπλασιαστές. Με τη χρήση του ίδιου υπολογιστικού συστήματος, το εξειδικευμένο λογισμικό έλυσε το πρόβλημα σε 2,013 δευτερόλεπτα, ενώ ο αλγόριθμος UPSO με ποινή χρειάστηκε 4,168 δευτερόλεπτα και ο αλγόριθμος UPSO με πολλαπλασιαστές 3,839 δευτερόλεπτα αντίστοιχα για την επίλυση των 20 πειραμάτων.

Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα παραδειγμάτων παιγνίων Nash με δυο καταναλωτές

Μέθοδος	Παράδειγμα 1	Παράδειγμα 2	Παράδειγμα 3
Modified penalty	$q_{d,1} = 4,108$	$q_{d,1} = 2,998$	$q_{d,1} = 4,289$
UPSO	$q_{d,2} = 3,710$	$q_{d,2} = 4,007$	$q_{d,2} = 4,486$
Modified multiplier	$q_{d,1} = 4,101$	$q_{d,1} = 3,001$	$q_{d,1} = 4,287$
UPSO	$q_{d,2} = 3,701$	$q_{d,2} = 4,001$	$q_{d,2} = 4,501$
GAMS	$q_{d,1} = 4,100$	$q_{d,1} = 3,000$	$q_{d,1} = 4,286$
solver	$q_{d,2} = 3,700$	$q_{d,2} = 4,000$	$q_{d,2} = 4,500$

Ωστόσο, η τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων της πρώτης παραλλαγής είναι πολύ μικρή, δηλαδή ο αλγόριθμος Modified penalty UPSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί μια λύση πολύ κοντά στη βέλτιστη σε πολύ λιγότερες από 20 επαναλήψεις, πιθανόν ακόμα και μία. Η δεύτερη παραλλαγή σύγκλινε πάντα στις ίδιες λύσεις με όριο ανοχής το 0,001, άρα αρκεί μόνο μια επανάληψη του αλγόριθμου Modified multiplier UPSO η οποία συγκλίνει σε 0,192 δευτερόλεπτα. Επίσης, ο χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων UPSO μειώθηκε κατά περίπου 70%

έπειτα από την εφαρμογή του προσαρμοστικού κριτηρίου τερματισμού, δηλαδή οι περισσότερες επαναλήψεις εκτέλεσης σε κάθε πείραμα ήταν περιττές αφού οι αλγόριθμοι συγκλίνουν πολύ γρήγορα σε μια σχεδόν βέλτιστη λύση. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι ενδεικτικές της αποδοτικότητας και αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων αλγορίθμων, οι οποίοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και για την εύρεση ισορροπιών Nash μεταξύ λίγων ακολούθων σε ζωντανό χρόνο.

4.5.2 Ισορροπία Nash πέντε καταναλωτών

Το κύριο πλεονέκτημα του αλγόριθμου UPSO με ποινή που αναπτύχθηκε είναι η δυνατότητα επίλυσης μη κυρτών, σύνθετων προβλημάτων μεγάλης κλίμακας χωρίς την ανάγκη υποθέσεων συνέχειας ή διαφορισιμότητας στις αντικειμενικές συναρτήσεις. Στο επόμενο παράδειγμα αναζητείται η ισορροπία Nash μεταξύ πέντε καταναλωτών, ο καθένας εκ των οποίων έχει εκτιμώμενη ζήτηση 6 μονάδων ενέργειας. Επομένως η συνολική εκτιμώμενη ζήτηση είναι ίση με 30 μονάδες και η παράμετρος b_1 θεωρείται ξανά ίση με 10. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι $r_1 = 22$, $q_{min,1} = 2,7$, $q_{min,2} = 3$, $q_{min,3} = 3,3$, $q_{min,4} = 3,6$, $q_{min,5} = 3,9$ και το κόστος άνεσης C_i για κάθε καταναλωτή i δίνεται από τη συνάρτηση:

$$C_i = \begin{cases} 4,5q_{c,i}, & q_{c,i} < 1 \\ 5, & 1 \leq q_{c,i} \leq 2 \\ 8q_{c,i}^2, & q_{c,i} > 2 \end{cases}$$

Οι μέσες τιμές καθώς και οι πιο συνήθειες λύσεις από 20 πειράματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2.

Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα παραδείγματος παιγνίου Nash με πέντε καταναλωτές

Παράδειγμα	Μέσες λύσεις	Πιο συνήθειες λύσεις
Παράδειγμα 4	$q_{d,1} = 3,314$	$q_{d,1} = 3,250$
	$q_{d,2} = 3,336$	$q_{d,2} = 3,250$
	$q_{d,3} = 3,427$	$q_{d,3} = 3,300$
	$q_{d,4} = 3,647$	$q_{d,4} = 3,600$
	$q_{d,5} = 4,005$	$q_{d,5} = 4,000$

Σε αυτό το παράδειγμα οι καταναλωτές έχουν την ίδια εκτιμώμενη ζήτηση και κόστος άνεσης, οπότε διαφέρουν μόνο στις ελάχιστες ενεργειακές ανάγκες τους. Παρατηρώντας τις πιο συνήθειες λύσεις για τις μεταβλητές $q_{d,1}$ και $q_{d,2}$, μπορεί να εξαχθεί ότι η βέλτιστη λύση για τους καταναλωτές 1 και 2 είναι 3,250 καθώς η τιμή $q_{min,i}$ δεν αποτελεί για αυτούς δεσμευτικό περιορισμό. Για τους καταναλωτές 3 και 4 οι βέλτιστες λύσεις είναι ίσες με τις ελάχιστες ανάγκες τους καθώς οι περιορισμοί που σχετίζονται με την $q_{min,i}$ γίνονται πλέον δεσμευτικοί, ενώ ο καταναλωτής 5 έχει

αυξημένες ενεργειακές ανάγκες και ο τρίτος κλάδος της συνάρτησης κόστους άνεσης οδηγεί σε μεγάλο κόστος για τον οικειοθελή περιορισμό φορτίου.

Στα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι μέσες λύσεις είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες πιο συνήθειες. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην αυστηρότερη ποινή που επιλέχθηκε προκειμένου να αποφευχθούν οι παραβιάσεις των περιορισμών. Σε κάθε περίπτωση οι διαφορές είναι σχετικά μικρές, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει γενικά σε τιμές αρκετά κοντά στις βέλτιστες λύσεις.

4.5.3 Ισορροπία Stackelberg ενός ηγέτη και δυο ακολούθων

Στα παρακάτω παραδείγματα αναζητείται το σημείο ισορροπίας στο οποίο βελτιστοποιούνται ταυτόχρονα οι αντικειμενικές συναρτήσεις του ηγέτη και των ακολούθων. Επομένως, εκτός από τη ζήτηση των καταναλωτών, ο ηγέτης πρέπει επίσης να καταλήξει στην ποσότητα που θα παράξει ή θα προμηθευτεί από τις μακροχρόνιες συμβάσεις του και στην επιδότηση που θα προσφέρει. Γίνεται πάλι η υπόθεση ότι η συνολική ζήτηση είναι ίση με δώδεκα μονάδες (έξι για κάθε καταναλωτή), $b_1 = 10$ και $m = 1$. Ο αλγόριθμος UPSO με ποινή εκτελείται μία φορά και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από το λογισμικό GAMS βάσει των μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.3.

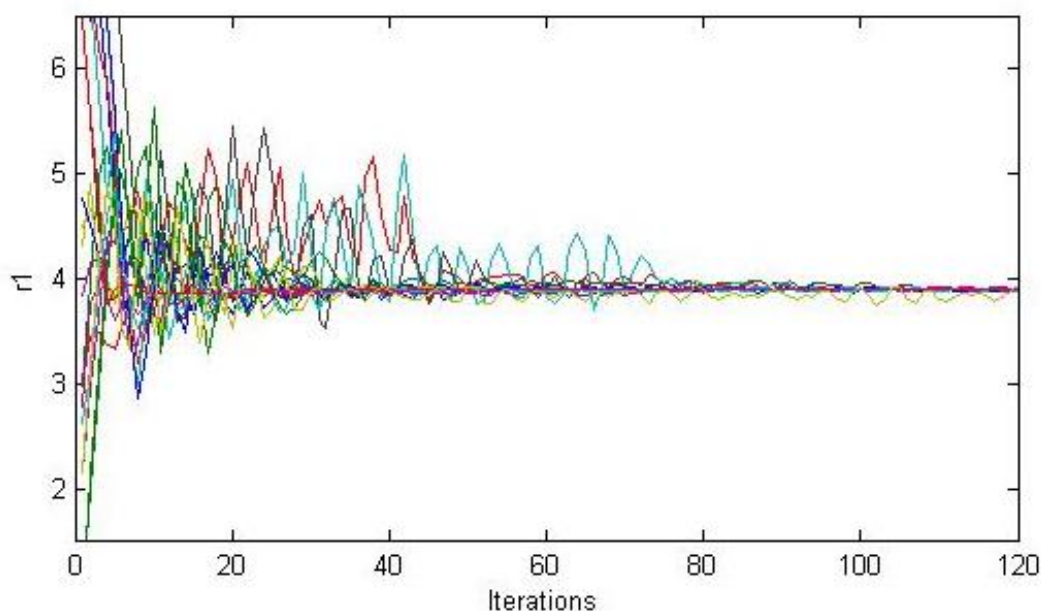
Οι παράμετροι για το Παράδειγμα 5 είναι: $c_{pr} = 8$, $c_{ex} = 50$, $q_{max} = 8$, $c_{1,1} = 5,5$, $c_{1,2} = 6,5$, $n_1 = n_2 = 2$, $q_{min,1} = 3$, $q_{min,2} = 3,5$. Οι αντίστοιχες τιμές για το Παράδειγμα 6 είναι: $c_{pr} = 10$, $c_{ex} = 40$, $q_{max} = 7$, $c_{1,1} = 2,5$, $c_{1,2} = 4$, $n_1 = n_2 = 2$, $q_{min,1} = 4$, $q_{min,2} = 2$. Τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τις αποφάσεις των παικτών και το τελικό κόστος J για τον ηγέτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3: Αποτελέσματα παραδείγματος παιγνίου Stackelberg με ένα ηγέτη και δυο ακολούθους

Μέθοδος	Παράδειγμα 5	Παράδειγμα 6
Modified penalty UPSO	$q_{pr} = 8$	$q_{pr} = 7$
	$q_{d,1} = 5,088$	$q_{d,1} = 4,439$
	$q_{d,2} = 5,228$	$q_{d,2} = 5,024$
	$r_1 = 5,017$	$r_1 = 3,903$
	$J = -723,650$	$J = -572,927$
GAMS solver	$q_{pr} = 8$	$q_{pr} = 7$
	$q_{d,1} = 4,992$	$q_{d,1} = 4,439$
	$q_{d,2} = 5,147$	$q_{d,2} = 5,024$
	$r_1 = 5,545$	$r_1 = 3,902$
	$J = -724,909$	$J = -572,927$

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα για τη μεταβλητή απόφασης q_{pr} ταυτίζονται και στις δυο μεθόδους καθώς η απόφαση αυτή μπορεί να εξαχθεί εύκολα λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό (7). Στο Παράδειγμα 5 τα αποτελέσματα για τις αποφάσεις των καταναλωτών και το κόστος του ηγέτη είναι παρόμοια, αλλά η μεταβλητή επιδότησης r_1 διαφέρει περίπου 10% στις δυο λύσεις. Αντίθετα, στο Παράδειγμα 6 οι δυο λύσεις μπορούν να θεωρηθούν ίδιες. Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζεται πώς το σμήνος του Παραδείγματος 6 συγκλίνει στην τελική τιμή για τη μεταβλητή απόφασης r_1 . Τα σωματίδια του σμήνους που αντιστοιχούν σε διαφορετικά χρώματα ξεκινούν από τυχαίες θέσεις στο χώρο αναζήτησης λύσεων και κινούνται προς τη βέλτιστη λύση με κάθε επανάληψη μέχρι να συγκλίνουν.

Εικόνα 4-1: Σύγκλιση σμήνους στην τιμή της r_1 για το Παράδειγμα 6



Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι γενικά αποτελεσματικός και σε παίγνια Stackelberg με έναν ηγέτη, ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να προκύψουν αποκλίσεις όσο αφορά τις τιμές κάποιων μεταβλητών απόφασης. Οι αποκλίσεις αυτές πιθανόν να οφείλονται σε τοπικά βέλτιστα που είναι πολύ κοντά στο ολικό καθώς το πρόβλημα είναι πολύ σύνθετο και περιλαμβάνει μη γραμμικές και μη κυρτές συναρτήσεις. Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις όμως, ο ηγέτης θα έχει τελικά κόστος πολύ κοντά στο βέλτιστο. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου διπλασιάστηκε καθώς το πρόβλημα είναι πιο σύνθετο και ο χρόνος επίλυσης ήταν περίπου 9 δευτερόλεπτα, ενώ το λογισμικό GAMS χρειάστηκε 2,42 δευτερόλεπτα, αποδεικνύοντας ότι τα παίγνια Stackelberg είναι πιο δύσκολο να επιλυθούν από τα παίγνια Nash. Η ενσωμάτωση του δυναμικού κριτηρίου τερματισμού δεν βελτίωσε το χρόνο εκτέλεσης καθώς τα σωματίδια φαίνεται να ταλαντώνονται γύρω από τη βέλτιστη λύση. Αυτές οι μεταβολές όμως είναι μικρές, επομένως η χαλάρωση του κριτηρίου σε όριο ανοχής μεταβολής 10^{-3} οδηγεί σε σύγκλιση εντός περίπου 3,5 δευτερολέπτων. Επομένως, σε

αυτού του είδους τα παίγνια ο αλγόριθμος δεν είναι τόσο αποδοτικός όσο στα προηγούμενα παραδείγματα, αλλά το κύριο πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και αν η αντικειμενική συνάρτηση του ηγέτη είναι μη κυρτή ή μη διαφορίσιμη, όπως στην υποενότητα 4.5.2. Οι παράμετροι για τον αλγόριθμο UPSO και τη συνάρτηση ποινής προέκυψαν από γενικές δοκιμές σε διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης, άρα η κατάλληλη διαμόρφωση του αλγόριθμου για αυτό το είδος προβλημάτων θα μπορούσε ίσως να βελτιώσει περαιτέρω την απόδοση.

Τα κόστη για κάθε παίκτη ανάλογα με την εφαρμογή ή μη του προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-4. Σε αυτόν τον πίνακα, το κόστος J αντιστοιχεί στον ηγέτη και τα κόστη J_1, J_2 στους δυο ακόλουθους αντίστοιχα. Υποτέθηκε ότι δεν υπάρχει ελαστικότητα στην τιμή, άρα οι δυο καταναλωτές χωρίς την εφαρμογή του προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου θα είχαν το ίδιο κόστος αφού εκτιμάται ότι έχουν την ίδια ζήτηση. Σε αυτή την περίπτωση το κόστος του ηγέτη εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους c_{pr} και c_{ex} . Ωστόσο, με την εφαρμογή του προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου μπορούν να εξαχθούν κάποια πρώτα συμπεράσματα. Πρώτον, οι καταναλωτές μπορούν να κινητοποιηθούν να περικόψουν φορτίο οικειοθελώς, αλλά αυτό εξαρτάται από την αμοιβή που θα λάβουν ως αντάλλαγμα. Η ποσότητα που θα περικόψουν σε κάθε περίπτωση, είναι αυτή την οποία δεν θεωρούν ως σημαντική για την κάλυψη των βασικών αναγκών τους ή έστω ένα τμήμα αυτής. Επιπλέον, η αντίδρασή τους εξαρτάται επίσης από τη συνάρτηση κόστους άνεσης του καθενός, η οποία διαφοροποιεί τους καταναλωτές σε ομάδες και ο διαχωρισμός αυτός πρέπει να ληφθεί υπόψη από τον προμηθευτή για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό του προγράμματος. Ο προμηθευτής από τη μεριά του δε χρειάζεται να υλοποιήσει ένα τέτοιο πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου εάν μπορεί να προσφέρει όλη τη ζητούμενη ποσότητα με βάση τον προγραμματισμό του, αλλά σε έκτακτες περιπτώσεις επωφελείται και αυτός από τη μείωση της ζήτησης καθώς θα αποφύγει να προμηθευτεί ποσότητες σε τιμές οι οποίες του προκαλούν ζημίες. Ο περιορισμός της τελικής ζήτησης ενέργειας οδηγεί σε κάθε περίπτωση σε ένα σημείο ισορροπίας που αντιστοιχεί σε μικρότερες ποσότητες και τιμή αντίστοιχα.

Ιδιαίτερη προσοχή ωστόσο θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι καταναλωτές λόγω της προσφερόμενης αμοιβής ενδέχεται να συμπεριφερθούν στρατηγικά, αυξάνοντας τεχνητά πριν την εφαρμογή του προγράμματος τη ζήτησή τους ώστε να διεκδικήσουν μεγαλύτερη αποζημίωση, διακινδυνεύοντας με αυτό τον τρόπο την σταθερότητα του δικτύου. Αυτές οι συμπεριφορές μπορούν να αποτραπούν χρησιμοποιώντας προηγμένους ηλεκτρονικούς μετρητές, ώστε η εκτιμώμενη ζήτηση κάθε καταναλωτή να βασίζεται σε πραγματικά ιστορικά στοιχεία.

Πίνακας 4-4: Κόστη παικτών με και χωρίς εφαρμογή προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου

Μέθοδος	Παράδειγμα 5	Παράδειγμα 6
Μη εφαρμογή	$J_1 = 720$	$J_1 = 720$
διακοψιμότητας	$J_2 = 720$	$J_2 = 720$
	$J = -576$	$J = -370$

Εφαρμογή διακοψιμότητας	$J_1 = 506,096$	$J_1 = 420,083$
	$J_2 = 521,823$	$J_2 = 475,479$
	$J = -724,909$	$J = -572,927$

4.5.4 Ισορροπία Stackelberg ενός ηγέτη και πολλών ακολούθων

Στην πράξη, ο αριθμός των ακολούθων που συμμετέχουν οικειοθελώς σε ένα πρόγραμμα οικειοθελούς περικοπής φορτίου μπορεί να είναι μεγάλος. Επιπλέον, ο ηγέτης πιθανόν να προτιμά να προσφέρει διαφορετικές αμοιβές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε συμμετέχοντα. Η δυνατότητα κλιμάκωσης στην προτεινόμενη μεθοδολογία καθιστά δυνατό να επιλυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα με πολλούς ακολούθους. Στο παρακάτω παράδειγμα γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχουν δεκαπέντε ακόλουθοι, μερικοί από τους οποίους έχουν τετραγωνικές και μερικοί γραμμικές συναρτήσεις κόστους. Υπάρχουν επίσης δυο παράμετροι επιδότησης: r_1 για όσους έχουν μικρή εκτιμώμενη ζήτηση και r_2 για όσους έχουν μεγάλη εκτιμώμενη ζήτηση και επομένως θεωρούνται σημαντικοί για την επιτυχία του προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο Παράδειγμα 7 είναι: $c_{pr} = 8$, $c_{ex} = 50$, $q_{max} = 40$. Τα χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα κάθε καταναλωτή παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-5.

Πίνακας 4-5: Παράδειγμα παιγνίου Stackelberg με έναν ηγέτη και 15 καταναλωτές

Παίκτης i	Χαρακτηριστικά παίκτη				Αποτελέσματα		
	κόστος C_i	αμοιβή F_i	$q_{min,i}$	q_i^*	$q_{d,i}$	J_i με VLC	J_i χωρίς VLC
Καταν. 1	$0,1q_{c,1}^2$	$r_1q_{c,1}$	0,5	2	0,500	2080	374,850
Καταν. 2	$0,1q_{c,2}$	$r_1q_{c,2}$	1	2	1	2080	761,350
Καταν. 3	$0,5q_{c,3}^2$	$r_1q_{c,3}$	0,1	1	0,100	1040	71,730
Καταν. 4	$1,5q_{c,4}^2$	$r_1q_{c,4}$	1	1	1	1040	767,250
Καταν. 5	$1,5q_{c,5}^2$	$r_1q_{c,5}$	2	4	2	4160	1528,500
Καταν. 6	$3q_{c,6}^2$	$r_1q_{c,6}$	1	3	1	3120	767,250
Καταν. 7	$3q_{c,7}$	$r_1q_{c,7}$	1	3	1	3120	767,250
Καταν. 8	$q_{c,8}^2$	$r_2q_{c,8}$	3	9	4	9360	3069,000
Καταν. 9	$q_{c,9}$	$r_2q_{c,9}$	3	9	3	9360	2307,750
Καταν. 10	$2,5q_{c,10}^2$	$r_2q_{c,10}$	4	10	8	10400	6138,000
Καταν. 11	$2,5q_{c,11}^2$	$r_2q_{c,11}$	8	10	8	10400	6138,000
Καταν. 12	$4q_{c,12}^2$	$r_2q_{c,12}$	6	12	10,750	12480	8247,937
Καταν. 13	$5q_{c,13}^2$	$r_2q_{c,13}$	6	12	11	12480	8439,750
Καταν. 14	$8q_{c,14}^2$	$r_2q_{c,14}$	5	13	12,375	13520	9494,719
Καταν. 15	$8q_{c,15}$	$r_2q_{c,15}$	5	13	13	13520	9974,250

Όσον αφορά τον ηγέτη, $q_{pr} = 40$, $q_{ex} = 36,725$ και το κόστος του μετά την εφαρμογή του προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου είναι ίσο με 9.034,8 αντί για 96.960 που θα ήταν σε διαφορετική περίπτωση. Επιπλέον, η τιμή και η συνολική ζήτηση ενέργειας μειώνονται επίσης πάνω από 26% χάρη στο εφαρμοζόμενο πρόγραμμα. Όσον αφορά τις αμοιβές $r_1 = 6$ και $r_2 = 5$ υποδεικνύοντας ότι καταναλωτές με μεγάλη εκτιμώμενη ζήτηση μπορεί να ικανοποιηθούν και με μικρότερη αμοιβή αφού θα αποζημιωθούν για μεγαλύτερη περικομμένη ποσότητα, όμως πρέπει να μελετηθούν περισσότερα παραδείγματα για να προκύψουν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των ακολούθων. Και σε αυτό το παράδειγμα φαίνεται πως όλοι οι παίκτες, τόσο ο ηγέτης όσο και οι ακόλουθοι, μπορούν να ωφεληθούν από την εφαρμογή ενός κατάλληλου προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου.

4.6 Αναφορές τέταρτου κεφαλαίου

- [1]. Simaan, Marwan, and Jose B. Cruz Jr. (1973) "On the Stackelberg strategy in nonzero-sum games." *Journal of Optimization Theory and Applications* 11.5: 533-555.
- [2]. Bruce A. McCarl et al. (2013) "McCarl Expanded GAMS User Guide", GAMS Release 24.2.1. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA.
- [3]. Harker, Patrick T. (1991) "Generalized Nash games and quasi-variational inequalities. «*European journal of Operational research* 54.1: 81-94.
- [4]. Facchinei, Francisco, and Christian Kanzow. (2007) "Generalized Nash equilibrium problems." *4OR* 5.3: 173-210.
- [5]. Bertsekas, Dimitri P. (1999) *Nonlinear programming*. Belmont: Athena scientific.
- [6]. Luenberger, David G., and Yinyu Ye. (1984) *Linear and nonlinear programming*. Vol. 2. Reading, MA: Addison-wesley.
- [7]. Wachsmuth, Gerd. (2013) "On LICQ and the uniqueness of Lagrange multipliers. «*Operations Research Letters* 41.1: 78-80.
- [8]. Fortuny-Amat, José, and Bruce McCarl. (1981) "A representation and economic interpretation of a two-level programming problem." *Journal of the operational Research Society* 32.9: 783-792.
- [9]. Eberhart, Russ C., and James Kennedy (1995) "A new optimizer using particle swarm theory." *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*. Vol. 1.
- [10]. Parsopoulos, Konstantinos E., ed. (2010) *Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications: advances and applications*. IGI Global.
- [11]. Clerc, M., & Kennedy, J. (2002). The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58–73
- [12]. Parsopoulos, Konstantinos E., and Michael N. Vrahatis (2007) "Parameter selection and adaptation in unified particle swarm optimization." *Mathematical and Computer Modelling* 46.1: 198-213.
- [13]. A. I. Selvakumar and K. Thanushkodi (2007) "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 42-51
- [14]. Yang, Jinn-Moon, et al (1997) "Applying family competition to evolution strategies for constrained optimization." *International Conference on Evolutionary Programming*. Springer Berlin Heidelberg.
- [15]. Clerc, Maurice, and James Kennedy (2002) "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space." *IEEE transactions on Evolutionary Computation* 6.1: 58-73.
- [16]. GAMS Development Corporation (2013), Washington, DC, USA. *GAMS - The Solver Manuals*, GAMS Release 24.2.1.

5 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Η προσπάθεια για την κάλυψη των αυξημένων ενεργειακών αναγκών σε παγκόσμιο επίπεδο σε συνδυασμό με την προσπάθεια αντιμετώπισης του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει σε νέες προκλήσεις για τον ενεργειακό τομέα σε όλα τα επίπεδα. Στο πλαίσιο αυτό προωθείται η απελευθέρωση, με κατάλληλη ρύθμιση, των αγορών ενέργειας και η εξοικονόμηση ενέργειας σε επίπεδο τελικής κατανάλωσης. Οι εξελίξεις αυτές που συνοδεύονται από σημαντικές αλλαγές στο ρυθμιστικό πλαίσιο και το σχεδιασμό των αγορών, έχουν οδηγήσει σε σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων σε όλα τα επίπεδα της αγοράς και σε ένα πιο σύνθετο πλαίσιο λήψης αποφάσεων, ειδικά για τους μικρότερους καταναλωτές που δεν διαθέτουν εξειδίκευση σε θέματα ενέργειας. Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκαν προβλήματα που έχουν προκύψει στον ενεργειακό τομέα τα τελευταία έτη, είτε αφορούν τις ρυθμιστικές αρχές και τους συμμετέχοντες των αγορών, είτε τους τελικούς καταναλωτές. Τα προβλήματα αυτά μοντελοποιήθηκαν και επιλύθηκαν εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης προκειμένου να αναπτυχθούν μεθοδολογίες υποστήριξης των εν λόγω αποφάσεων.

Μετά από μια αρχική εισαγωγική παρουσίαση των θεμάτων που αναλύονται στην παρούσα διατριβή, στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφηκε αναλυτικά μια πολυκριτηριακή προσέγγιση του προβλήματος επιλογής της κατάλληλης ενεργειακής πηγής ή επένδυσης. Στις απελευθερωμένες αγορές ενέργειας, οι εποπτεύουσες ρυθμιστικές αρχές καλούνται να λάβουν σύνθετες αποφάσεις καθώς οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων είναι πλέον περίπλοκες, ενώ κάθε απόφαση δύναται να επηρεάσει την ισορροπία της αγοράς. Σε αυτό το πλαίσιο, πρέπει να αποφασίσουν ποιες ενεργειακές πηγές είναι περισσότερο ωφέλιμες, όχι μόνο από οικονομικής απόψεως αλλά με βάση διάφορα κριτήρια τα οποία στοχεύουν στη μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους. Επομένως η Εποπτεύουσα Αρχή κάθε αγοράς καλείται να αποφασίζει και να προσαρμόζει, όταν κρίνεται απαραίτητο, τους συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο που θα ενσωματωθεί στην αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζει το όφελος του κοινωνικού συνόλου. Στη συνέχεια προστίθενται οι περιορισμοί που κρίνονται απαραίτητοι και είτε η συνάρτηση βελτιστοποιείται, είτε συγκεντρώνονται όλες οι εφικτές λύσεις ώστε να επιλεγεί μία από αυτές. Η ακολουθούμενη ενεργειακή πολιτική, δηλαδή οι συντελεστές βαρύτητας για τα διάφορα κόστη και οι προτιμήσεις της Εποπτεύουσας Αρχής, είναι πολύ σημαντικοί. Επομένως απαιτείται περισσότερη έρευνα σχετικά με τον τρόπο που η Εποπτεύουσα Αρχή επιλέγει αυτούς τους συντελεστές και μια ανάλυση των διαθέσιμων μεθοδολογιών ώστε να επιλεγεί η πιο κατάλληλη. Η ύπαρξη πολλών συμμετεχόντων στις αγορές ενέργειας, όπως οι διάφοροι παραγωγοί ενέργειας που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες και πηγές, οι κατηγορίες τελικών καταναλωτών, οι δημοτικές αρχές, οι οργανώσεις και κινήσεις πολιτών, μπορεί τελικά να οδηγήσουν σε μεθοδολογίες και έννοιες οι οποίες πηγάζουν από τη θεωρία παιγνίων.

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο επικεντρώνεται στον τρόπο με τον οποίο το πρόβλημα μοντελοποιείται και επιλύεται ως πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού. Προκρίνεται η χρήση δυαδικών μεταβλητών οι οποίες μειώνουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος και διευκολύνουν στην αντιμετώπιση μη γραμμικών κλασματικών συναρτήσεων, όπου αυτές συναντώνται. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πολύ πιο γενικών και ρεαλιστικών προβλημάτων από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως παραδείγματα και επιλύθηκαν. Μια περίπτωση που θα πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω είναι αυτή στην οποία μια ενεργειακή πηγή αναπαριστά στην πραγματικότητα έναν παραγωγό ενέργειας ο οποίος διαθέτει ένα χαρτοφυλάκιο με πολλές διαφορετικές πηγές ενέργειας, επομένως είναι πιο σύνθετος ο τρόπος αξιολόγησής του για τα διάφορα κριτήρια.

Τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν υποστηρίζουν το συμπέρασμα ότι αυστηρά όρια στους περιορισμούς του προβλήματος περιορίζουν το σύνολο των εφικτών λύσεων, άρα και τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Η αξιολόγηση των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να γίνεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς ακόμα και μικρές μεταβολές ενδεχομένως αλλάζουν τη βέλτιστη απόφαση, ανάλογα και με τη διατύπωση του προβλήματος. Επομένως προκύπτει η ανάγκη για έρευνα προς την κατεύθυνση μελέτης της αβεβαιότητας που προκύπτει σε ένα τέτοιο πολυκριτηριακό πρόβλημα.

Η αβεβαιότητα αυτή μελετήθηκε στα πλαίσια ενός άλλου πολυκριτηριακού προβλήματος, το οποίο αφορά την αξιολόγηση παρεμβάσεων εξοικονόμησης σε κτίρια του οικιακού τομέα και αναπτύχθηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Η ανακαίνιση κτιρίων του οικιακού τομέα έχει αποκτήσει προτεραιότητα σε παγκόσμιο επίπεδο δεδομένου του μεγάλου ανεκμετάλλευτου δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας που υπάρχει σε αυτόν τον τομέα, για αυτό το λόγο παρέχονται διάφορα κίνητρα και χρηματοδοτικά εργαλεία για την υλοποίηση τέτοιων δράσεων. Πριν όμως από κάθε απόφαση πρέπει να αξιολογούνται όλες οι διαθέσιμες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας για ένα κτίριο, ώστε να βελτιστοποιηθεί τελικά η αύξηση της ενεργειακής του αποδοτικότητας.

Προκειμένου να διευκολυνθεί η λήψη αποφάσεων, αναπτύχθηκε ένα εργαλείο υποστήριξης της που ενσωματώνει όλες τις προτιμήσεις των ενδιαφερομένων χρησιμοποιώντας το πολυκριτηριακό πλαίσιο λήψης αποφάσεων και μεθόδους μεικτού ακέραιου προγραμματισμού. Η προτεινόμενη μεθοδολογία προσφέρει μια ολιστική προσέγγιση στο πρόβλημα της ανακαίνισης, ενώ επίσης ενσωματώνει με έναν συνεπή και κατανοητό τρόπο την επίδραση της αβεβαιότητας πάνω στη βέλτιστη απόφαση. Στον ακέραιο προγραμματισμό, η αβεβαιότητα ως προς κάποιες παραμέτρους μπορεί να αντιμετωπιστεί με διάφορες μεθοδολογίες όπως τα ασαφή σύνολα και η στοχαστικότητα. Προτιμότερη όμως στην προκείμενη περίπτωση είναι η διαστηματική ανάλυση, η οποία είναι κατάλληλη για προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού στον τομέα της μηχανικής, όταν κάποιες από τις παραμέτρους δεν είναι ντετερμινιστικές. Ο λόγος που το πλαίσιο της διαστηματικής ανάλυσης είναι καταλληλότερο έγκειται στο γεγονός πως δεν απαιτεί περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τις συναρτήσεις κατανομής των αβέβαιων παραμέτρων. Επιπλέον, στα σύνθετα προβλήματα μηχανικής τα οποία σχετίζονται με τον ενεργειακό σχεδιασμό

και τη λειτουργία των αγορών, αυτοί που λαμβάνουν τις αποφάσεις ενδιαφέρονται κάθε φορά περισσότερο για το εύρος εντός του οποίου κινείται η πιθανώς βέλτιστη λύση καθώς και στον τρόπο που επιδρούν επάνω της οι μεταβλητές απόφασης, παρά για την πιθανοτική κατανομή των διαφόρων λύσεων. Πρακτικά, στη διανυσματική ανάλυση κάθε αριθμός εκφράζεται ως ένα διάστημα που έχει άνω και κάτω άκρο, εντός του οποίου μπορεί να λάβει τιμές η αβέβαια παράμετρος. Όλες οι συνήθεις μαθηματικές πράξεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και με διαστήματα αριθμών, επομένως ένα γραμμικό πρόβλημα είναι εύκολο να ενσωματώνει την αβεβαιότητα με χρήση διανυσματικής ανάλυσης και με τους κατάλληλους μετασχηματισμούς αυτό επεκτείνεται και σε μη γραμμικά προβλήματα, όπως αυτά που παρουσιάστηκαν στα πρώτα κεφάλαια.

Τελικά, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία η οποία είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τις δυσκολίες επιλογής και τις αβεβαιότητες όσον αφορά τα επιτρεπτά όρια και τη σημαντικότητα κάθε κριτηρίου, καθώς και πώς αυτές με τη σειρά τους επηρεάζουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και την επιλογή των κατάλληλων παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας σε μια κατοικία. Με αυτόν τον τρόπο, αυτοί που καλούνται να λάβουν αποφάσεις είναι σε θέση να μελετήσουν εύκολα πώς επηρεάζονται αυτές οι αποφάσεις τους και οι καλύτερες επιλογές βάσει της αβεβαιότητας που υπάρχει στους περιορισμούς και στους συντελεστές βαρύτητας. Αυτή η προσέγγιση είναι καλύτερη από τη μελέτη μόνο του καλύτερου και του χειρότερου σεναρίου καθώς παρέχεται σε αυτόν που καλείται να αποφασίσει ένα σύνολο εφικτών και ταυτόχρονα εύρωστων λύσεων. Επίσης, η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να ενσωματώσει και μη γραμμικές κλασματικές συναρτήσεις κριτηρίων, οι οποίες είναι συνήθεις σε προβλήματα μηχανικής, καθώς και συνέργειες που μπορεί να προκύψουν μεταξύ των παρεμβάσεων, αυξάνοντας έτσι την πρακτικότητα του εργαλείου.

Μελλοντικά, περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας σε ομάδες κτιρίων, χρησιμοποιώντας επεκτάσεις του προτεινόμενου μοντέλου ώστε να ενσωματώνονται όλες οι παρεμβάσεις και οι μεταξύ τους συνέργειες. Επιπλέον, θα μπορούσε να μελετηθεί η ευρωστία των λύσεων στην περίπτωση ύπαρξης αβεβαιότητας στα δεδομένα που σχετίζονται με τις παρεμβάσεις, δηλαδή το κόστος κεφαλαίου και την ενεργειακή εξοικονόμηση που αυτές επιφέρουν. Το προτεινόμενο μοντέλο θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα πολυκριτηριακά προβλήματα επιλογής στα οποία πρέπει κάθε φορά να ληφθούν υπόψη τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά κριτήρια.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφηκε και διατυπώθηκε το πρόβλημα επιδότησης των καταναλωτών μέσω ενός προγράμματος οικειοθελούς περικοπής φορτίου προκειμένου να μειώσουν την ενεργειακή τους ζήτηση. Η απελευθέρωση των αγορών ενέργειας είναι ένα πεδίο μελέτης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφόρων συμμετεχόντων, οι οποίες ενδεχομένως να πρέπει να είναι άμεσες ή συνεργατικές, ειδικά σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις οδηγούν σε σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης που συνήθως περιλαμβάνουν έννοιες από τη θεωρία παιγνίων καθώς πρέπει να βρεθούν τα σημεία ισορροπίας μεταξύ των παικτών. Τα αλληλένδετα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι δύσκολο να επιλυθούν

χρησιμοποιώντας κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης, οπότε οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι θεωρούνται προτιμότεροι.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αναπτύχθηκε μια επέκταση του αλγόριθμου UPSO προκειμένου να βρεθούν οι αντίστοιχες ισορροπίες Nash και Stackelberg, αλλά ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα προβλήματα δυο επιπέδων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος περιλαμβάνει κατάλληλη αναδιατύπωση του προβλήματος και πολλαπλά σμήνη που επιλύουν τα προβλήματα βελτιστοποίησης των διαφόρων παικτών ταυτόχρονα, συγκλίνοντας στο σημείο ισορροπίας χωρίς να απαιτούνται υποθέσεις συνέχειας ή διαφορισιμότητας των συναρτήσεων. Επίσης, αναπτύχθηκε και μια ακόμα παραλλαγή του αλγόριθμου UPSO σε συνδυασμό με τη μέθοδο πολλαπλασιαστών Lagrange, η οποία προτείνεται για τον υπολογισμό απλών ισορροπιών Nash καθώς δείχνει να οδηγεί σε ακόμα πιο ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Ωστόσο, περαιτέρω έρευνα απαιτείται για να εκτιμηθεί πώς η απαραίτητες υποθέσεις για την εφαρμογή της μεθόδου πολλαπλασιαστών μπορούν να περιορίσουν τα κύρια πλεονεκτήματα των μεταευρετικών αλγορίθμων.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν υποδεικνύουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκλίνει πολύ αποδοτικά σε ισορροπίες Nash, ενώ μπορεί να συγκλίνει και σε ισορροπίες Stackelberg. Κατάλληλη διαμόρφωση του αλγόριθμου για το συγκεκριμένο τύπο προβλημάτων, έπειτα από πειραματισμούς με το συντελεστή ενοποίησης και τις παραμέτρους του αλγόριθμου και της συνάρτησης ποινής, θα μπορούσε να βελτιώσει περαιτέρω τα αποτελέσματα.

Επιπλέον, βάσει των αποτελεσμάτων, η οικειοθελής περικοπή φορτίου φαίνεται ότι είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση της κατανάλωσης σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης που ενδεχομένως οδηγήσουν σε προβλήματα στο δίκτυο ή σε αυξημένες τιμές, καθώς τόσο ο ηγέτης όσο και οι καταναλωτές μπορούν να ωφεληθούν από την εφαρμογή ενός τέτοιου προγράμματος. Τα έξυπνα δίκτυα και οι νέες τεχνολογίες προσφέρουν πλέον νέες δυνατότητες σχετικά με την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ενεργειακής κατανάλωσης, καθιστώντας δυνατή τη συμμετοχή και μικρών οικιακών καταναλωτών σε τέτοιου είδους προγράμματα, επομένως τα οφέλη μπορούν να αυξηθούν περαιτέρω και η οικειοθελής περικοπή φορτίου να λειτουργήσει ως ένας γενικός μηχανισμός κινήτρων προκειμένου να μειωθούν οι αιχμές ζήτησης στις αγορές ενέργειας. Το εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό κατάλληλων προγραμμάτων οικειοθελούς περικοπής φορτίου, ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των καταναλωτών που αναμένεται να συμμετάσχουν. Τα σύνθετα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης μεγάλης κλίμακας χρειάζονται κατάλληλο σχεδιασμό, αλλά απλά προγράμματα μικρής κλίμακας θα μπορούσαν να δοκιμαστούν ακόμα και σε ζωντανό χρόνο δεδομένης και της υψηλής ταχύτητας σύγκλισης του αλγόριθμου.

Περαιτέρω έρευνα θα πρέπει να γίνει όσον αφορά την μοναδικότητα των ισορροπιών στα παίγνια αυτά καθώς και στο εάν ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να επεκταθεί για να επιλύει και προβλήματα με πολλούς ηγέτες και πολλούς ακολούθους, δηλαδή όταν τέτοιου είδους προγράμματα εφαρμόζονται μαζικά σε μια αγορά ενέργειας από διάφορους ενδιαφερόμενους, είτε είναι διαχειριστές

συστημάτων, είτε άλλοι φορείς που εμπλέκονται σε προγράμματα απόκρισης ζήτησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παικτών θα είναι χρήσιμες για την μελέτη ρεαλιστικών παιγνίων μεγάλης κλίμακας με πολλούς παίκτες σε κάθε επίπεδο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Γλωσσάρι όρων

ακέραιος προγραμματισμός	integer programming
ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής	Computational Fluid Dynamics (CFD)
Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)	Renewable Energy Resources (RES)
ανεκτικότητα	tolerance
ασαφές σύνολο	fuzzy set
βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων	Particle Swarm Optimization (PSO)
γενικευμένη ισορροπία Nash	generalized Nash equilibrium
γραμμικός προγραμματισμός	Linear Programming (LP)
διακλάδωση και οριοθέτηση	branch-and-bound
διαστηματική ανάλυση	interval analysis
διεπίπεδος προγραμματισμός	bilevel programming problem
δυαδικός ακέραιος προγραμματισμός	binary integer programming
ενοποιημένη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων	Unified Particle Swarm Optimization (UPSO)
κλασματικός προγραμματισμός	fractional programming
κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας	nearly Zero Energy Building (nZEB)
μαθηματικό πρόβλημα με περιορισμούς ισορροπίας	Mathematical Program with Equilibrium Constraints (MPEC)
μαθηματικός προγραμματισμός πολλαπλών στόχων	Multi-objective Mathematical Programming (MMP)
μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange	Lagrange Multiplier Method
μέθοδος στάθμισης	weighting method
μεικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός	Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP)
μεικτός ακέραιος προγραμματισμός	Mixed-Integer Programming (MIP)
μη γραμμικός προγραμματισμός	Nonlinear Programming (NLP)
οδηγία 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων	Energy Performance in Buildings Directive (EPBD)
οδηγία 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση	Energy Efficiency Directive (EED)
οικειοθελής περικοπή φορτίου	Voluntary Load Curtailment (VLC)
παίγνιο ηγέτη-ακολουθού	Leader-Follower game

πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων	Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)
πρόβλημα ικανοποιησιμότητας	satisfiability problem
πρόβλημα ισορροπίας με περιορισμούς ισορροπίας	Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints (EPEC)
πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης	demand management program
συνάρτηση ποινής	penalty function
συνάρτηση συμμετοχής	membership function
συνθήκες συμπληρωματικότητας	complementarity conditions
συνθήκη γραμμικής ανεξαρτησίας περιορισμών	Linear Independence Constraint Qualification (LICQ)
τροποποιημένος αλγόριθμος UPSO με εισαγωγή ποινής	modified Penalty UPSO
τροποποιημένος αλγόριθμος UPSO με χρήση πολλαπλασιαστών	modified Multiplier UPSO
φωτοβολταϊκά	Photovoltaic (PV)

Κατάλογος εργασιών και δημοσιεύσεων

Journals

1. Kontogiorgos, P., Chrysanthopoulos, N., & Papavassilopoulos, G. (2018). A Mixed-Integer Programming Model for Assessing Energy-Saving Investments in Domestic Buildings under Uncertainty. *Energies*, 11(4), 989.
2. Kakogiannis, N., Kontogiorgos, P., Sarri, E., & Papavassilopoulos, G. P. (2016). Multicriteria energy policy investments and energy market clearance via integer programming. *Central European Journal of Operations Research*, 24(3), 515-534.
3. P. Kontogiorgos, G. P. Papavassilopoulos. A Particle Swarm Optimizer for finding Nash and Stackelberg Equilibria in a Voluntary Load Curtailment Demand Response Program. *preparing for submission*

Conferences

1. Kontogiorgos, P., & Papavassilopoulos, G. P. (2017). A Game formulation of the Energy Load Control problem solved via Particle Swarm Optimization. In 13th European Meeting on Game Theory (SING13).
2. Kontogiorgos, P., & Papavassilopoulos, G. P. (2014). Subsidized power interruption for reducing peaks in energy demand: A stackelberg game. In 2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP). IEEE.
3. Kontogiorgos, P., Sarri, E., Vrahatis, M. N., & Papavassilopoulos, G. P. (2014). An energy market stackelberg game solved with particle swarm optimization. In 6th International Conference on Numerical Analysis (NumAn).
4. Kontogiorgos, P., Vrahatis, M. N., & Papavassilopoulos, G. P. (2014). Interval analysis to address uncertainty in multicriteria energy market clearance. In 9th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower). IET.
5. Kakogiannis, N. C., Kontogiorgos, P., Sarri, E., & Papavassilopoulos, G. P. (2010). Games among long and short term electricity producers and users. In 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower). IET.